

广东省天堂铜铅锌多金属矿床矽卡岩矿物学特征及其地质意义

郑伟¹, 陈懋弘², 赵海杰², 徐林刚², 张东阳¹, 凌世彬³, 姚磊¹,
于森¹, 常利忠¹

(1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037; 3. 云浮星辰矿业有限公司, 广东 云浮 527434)

摘要:天堂矿床是粤西地区以泥盆系上统天子岭组灰岩为围岩的大型矽卡岩型铜铅锌多金属矿床, 矿体呈似层状、层状、透镜状、不规则状等产出在矽卡岩和矽卡岩化大理岩中, 矿区发育石榴子石、透辉石、绿帘石、硅灰石、绿泥石等蚀变矿物, 金属矿物主要包括黄铜矿、黄铁矿、方铅矿和闪锌矿等。本文以主要矽卡岩矿物为研究对象, 利用电子探针技术对其矿物学特征进行研究。电子探针分析结果表明:天堂铜铅锌多金属矿床矽卡岩属于交代矽卡岩中典型的钙矽卡岩。石榴子石以钙铝榴石-钙铁榴石系列为主, 从早到晚具有从钙铝榴石为主到钙铁榴石为主的演化趋势, 说明成矿流体由酸性向碱性演化。辉石以透辉石为主, 石榴子石和辉石的矿物组分分别为 $Ad_{r4.60-96.47}Gr_{s2.10-94.28}(Prp + Sps)_{0.41-3.88}$ 和 $Di_{88.51-95.09}Hd_{3.31-9.76}Jc_{0.28-3.98}$, 其较大的成分变化特征反映出矽卡岩不是在一个完全封闭的平衡条件下形成的。帘石主要为绿帘石, 含有少量的黝帘石。矿物成分分析表明辉石的 Mn/Fe 比值和矿化金属元素存在一定的联系。通过矽卡岩矿物学特征分析, 进一步证实天堂铜铅锌多金属矿床是花岗岩类岩浆交代灰岩而形成的典型矽卡岩型矿床。

关键词:粤西地区; 天堂铜铅锌多金属矿床; 矿物学特征; 电子探针分析; 矽卡岩

中图分类号: P575.1; P588.31+2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)01-0023-18

Skarn mineral characteristics of the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit in Guangdong Province and their geological significance

ZHENG Wei¹, CHEN Mao-hong², ZHAO Hai-jie², XU Lin-gang², ZHANG Dong-yang¹,
LING Shi-bin³, YAO Lei¹, YU Miao¹ and CHANG Li-zhong¹

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geoscience, Beijing 100083, China; 2. Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 3. Yunfu Xingchen Mining Co. Ltd., Yunfu 527434, China)

Abstract: The large Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic skarn deposit in Yuexi area is hosted in limestone of Devonian Tianziling Formation, and the ore bodies occur in the skarn and skarnized marble in stratoid, lamellar, lenticular and irregular forms. Metallic minerals consist mainly of chalcopyrite, galena, sphalerite and pyrite, whereas gangue minerals are composed of garnet, diopside, epidote, wollastonite, chlorite etc. With skarn minerals as the study object and by using electron microprobe technology, the authors investigated the mineralogical characteristics. Electron microprobe analyses show that the skarns in the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

收稿日期: 2012-09-28; 修订日期: 2012-11-19

基金项目: 中国地质调查局地质调查工作项目(1212011120831); 国家自然科学基金(40930419); 国家重点基础研究发展计划 973 课题(2012CB416704)

作者简介: 郑伟(1988-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: zhengwei19880824@126.com; 通讯作者: 赵海杰(1982-), 女, 助理研究员, E-mail: zhaohaijie_610@163.com

belong to typical calcic skarns. Garnets in the ore deposit are mainly andradite-grossularite and varied with time from grossular to andradite, suggesting that the ore-forming fluid had a evolutionary trend from acidic to basic. Augites are mainly diopside. Components of garnet and proxene are $\text{Adr}_{4.60\sim 96.47}\text{Grs}_{2.10\sim 94.28}(\text{Prp} + \text{Sps})_{0.41\sim 3.88}$ and $\text{Di}_{88.51\sim 95.09}\text{Hd}_{3.31\sim 9.76}\text{Jo}_{0.28\sim 3.98}$, respectively, and their wide compositional variation range suggests that skarns were not formed under a totally enclosed equilibrium condition. The end member of the epidote group is dominated by epidote, and contains a little zoisite. The Mn/Fe ratio of pyroxene may be related to mineral metals. Characteristics of skarn in the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit shows that it is a typical skarn deposit resulting from the replacement of the marble by granitoid magma.

Key words: Yuexi area; Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit; mineral characteristics; electron microprobe analysis; skarn minerals

矽卡岩型矿床是一种具有重要意义的矿床类型, 其中的矽卡岩型 W、Sn、Cu、Mo、Fe、Zn、Pb 矿床均具有重要的经济价值 (Einaudi *et al.*, 1981; 赵一鸣等, 1990; Meinert, 1992, 1993; Mao *et al.*, 1996, 2006, 2011a, 2011b; Misra, 2000)。而我国又是世界上矽卡岩矿床分布最广的国家之一, 其中铜矿、铅锌矿分别占全国矿产总量的 30%、18.3% (赵一鸣等, 1990)。比较典型的大型矽卡岩型铅锌矿床有中国的内蒙古白音诺铅锌矿、辽宁八家子铅锌矿、湖南水口山铅锌矿、墨西哥 Providencia 矿, 美国 Grsoudhog 矿和日本 Nakatatsu 矿等; 典型的矽卡岩型铜矿有中国的河北寿王坟铜矿、西藏甲玛铜多金属矿、月山安庆铜矿、安徽铜官山铜矿, 俄罗斯 Tardanskoe 铜矿等。众所周知, 在矽卡岩型矿床的研究中, 矽卡岩矿物成分的研究工作具有十分重要的地位 (Einaudi *et al.*, 1981; Einaudi and Burt, 1982)。作为矽卡岩矿床的含矿岩石, 矽卡岩中不同矿物的组合、分布及成因等对于了解矿床的成因及其形成环境等均具有重要的意义 (Einaudi *et al.*, 1981; Einaudi and Burt, 1982; 赵一鸣等, 1990; 毛景文等, 1998; Xu and Lin, 2000; Somarin, 2004; Meinert *et al.*, 2003, 2005)。天堂矿床是粤西地区重要的矽卡岩型铜铅锌多金属矿, 前人的研究主要集中在对矿区普查和矿床地质的基本特征描述上 (地矿部地矿司南岭铅锌矿专题组, 1985; 梁约翰等, 1998; 司徒宏等, 2004), 但迄今为止对其矽卡岩矿物学特征的研究工作还很薄弱, 不利于对本区矽卡岩的形成过程及与成矿关系的深入认识。本文拟通过开展矽卡岩矿物学特征研究, 揭示矽卡岩及矿体形成过程中物理化学条件的变化规律, 从而为进一步认识该矿床的成矿机制奠定基础, 同时也为在该区寻找同类型矿床提供新的资料

和研究线索。

1 区域地质背景

粤西地区是广东省内重要的金、银、锡、铜、钨多金属成矿区之一, 大地构造上属于华南加里东褶皱系, 西面为云开大山北东向构造带, 北侧为南岭构造-岩浆岩带, 东临太平洋活动带。区内矿床类型多、规模大, 形成许多中型-大型甚至超大型矿床, 如河台韧性剪切带型金矿、东田沉积变质型金矿、庞西垌破碎带型银金铅锌矿、银岩斑岩锡钼矿、圆珠顶大型斑岩锡钼矿、石碁矽卡岩型铜矿、天堂矽卡岩型铜铅锌多金属矿及小南山热液石英脉型钨矿等。

区内地层比较齐全, 包括元古界、古生界、中生界和新生界地层。其中元古界主要为浅海相类复理石碎屑岩建造和硅质岩建造, 下古生界以笔石页岩建造为主, 这些地层出露范围比较广, 占据了粤西地区的绝大部分。上古生界泥盆系为浅海相类复理石碎屑岩建造和硅质岩建造, 主要沿一些局部构造盆地分布, 中生界一般以内陆湖泊相碎屑岩建造含煤系为主。区内的 Pb、Zn、Cu、Sn、Au、Ag 矿主要赋存在震旦系、奥陶系和中泥盆统地层中。

粤西地区的构造比较复杂, 形成多组不同方向的构造带, 但以北东向和北北东向构造为主, 主要受吴川-四会断裂带和罗定-广宁构造带控制。不同学者划分的构造演化阶段也各不相同: 袁正新 (1995) 将区内的构造演化分为震旦纪-志留纪、泥盆纪-三叠纪和侏罗纪-第三纪三个阶段, 彭少梅等 (1995) 认为区内主要经历了前晋宁期的陆核和古陆壳生长、晋宁期的张裂拉伸、加里东期的水平韧性剪切及褶皱隆起、海西-印支期的碰撞造山和逆冲推覆以及燕山-喜马拉雅期的陆内伸展 5 个主要构造演化阶段。

区内岩浆活动强烈，种类多样。赵子杰等(1985)根据岩石类型和含矿性，将盆地内花岗岩分为两类：一类是与铁、铜、钼及铅锌多金属矿床有关的中酸性花岗岩类，包括与岗尾、石菴、黑石岗、天堂等矿床的形成有关的岩体；另一类是与钨、锡矿床有关的黑云母花岗岩类，形成了小南山、锡山、鸚鵡岭等矿床。由于受断裂构造和褶皱隆起构造的控制呈NE向带状分布，成岩时代大致可分为加里东期、海西-印支期和燕山期(邵树勋等，2000)，尤其以燕山期的岩浆活动最为强烈，不但分布广、数量多，而且具有多旋回、多期次的特点，众多的金属和非金属矿床的形成均与该期岩浆作用有密切关系。

2 矿床地质特征

天堂铜铅锌多金属矿床是粤西地区新兴-阳春铜铅锌金(银)成矿带内重要的砂卡岩型矿床(图1)。结合详细的野外地质工作和前人的研究资料，对矿区地质特征概括如下。

2.1 地层

矿床出露的地层主要有泥盆系和第四系，泥盆系包括天子岭组、帽子峰组和老虎坳组，均为连续沉积，整合接触关系，其中大部分为天子岭组和帽子峰组地层。天子岭组(D₃t)为本矿区的主要赋矿围岩，

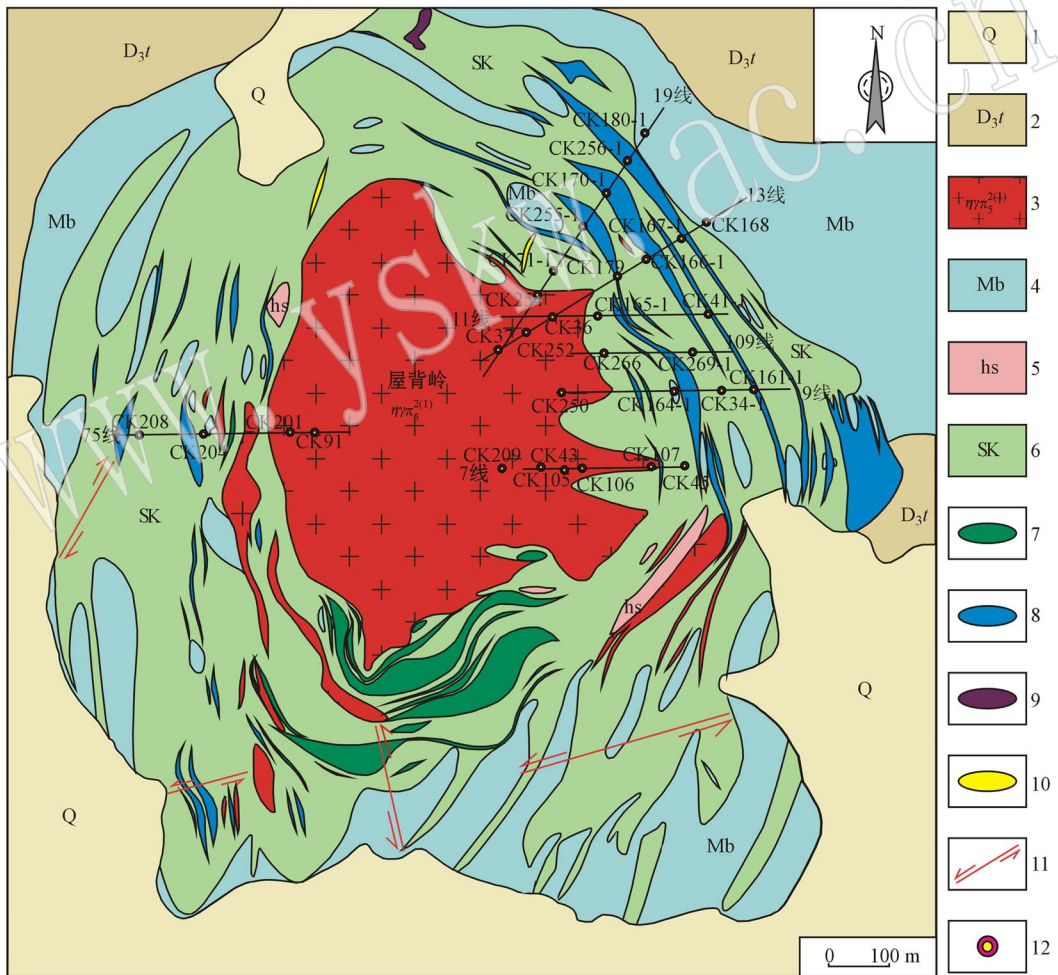


图1 天堂铜铅锌多金属矿矿区地质略图

Fig. 1 Simplified geological map of the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

- 1—第四系冲洪积物；2—泥盆系天子岭组灰岩、泥灰岩；3—二长花岗岩；4—大理岩；5—角岩；6—砂卡岩；7—铜矿体；8—铅锌矿体；9—褐铁矿体；10—重晶石脉；11—平移断层；12—钻孔
- 1—Quaternary alluvial-diluvial material；2—Devonian Tianziling Formation consisting of limestone, argillaceous limestone；3—adamellite；4—marble；5—hornstone；6—skarn；7—copper ore body；8—lead-zinc ore body；9—limonite ore body；10—vein of barite；11—translational fault；12—drill hole

主要由泥灰岩和灰岩组成,帽子峰组(D_3)由砂页岩互层组成,夹有少量的长石石英砂岩、绢云母石英细砂岩和钙质页岩薄层;中统老虎坳组仅见于本区的南东和北西的边缘部位,以石英砂岩为主。成矿侵入岩体与地层的接触部位发生强烈的接触交代作用或接触热变质作用,部分地层被交代形成一套具有典型钙砂卡岩矿物组成的砂卡岩类,也有部分角岩类。

2.2 构造

总体看来,矿区内断裂、褶皱构造发育。断裂包括成矿前的断裂、成矿期和成矿后的断裂。成矿前的断裂形成于燕山运动初期,主要发育在地堑式复

向斜两侧的边缘部位,均为北北东向断裂;成矿期断裂形成于燕山一到三期,规模较大,延长往往在几公里至数十公里,包括北东-北北东、北西和北东东三组,其中前两组最为发育;成矿后断裂形成于燕山三期后,主要包括北东-北北东、北北西、北西和北东东四组。褶皱以向斜褶曲为主,包括油麻岗向斜,屋背岭向斜及次一级的小向斜、小背斜。其中屋背岭向斜(图 2)为天堂铜多金属矿床的控矿构造,处于褶皱轴弯曲和波状起伏的枢纽部位,构造裂隙较为发育,二长花岗斑岩即沿此构造脆弱部位侵入。本矿区的主要铜铅锌矿段便赋存在这种层间的构造裂隙中。

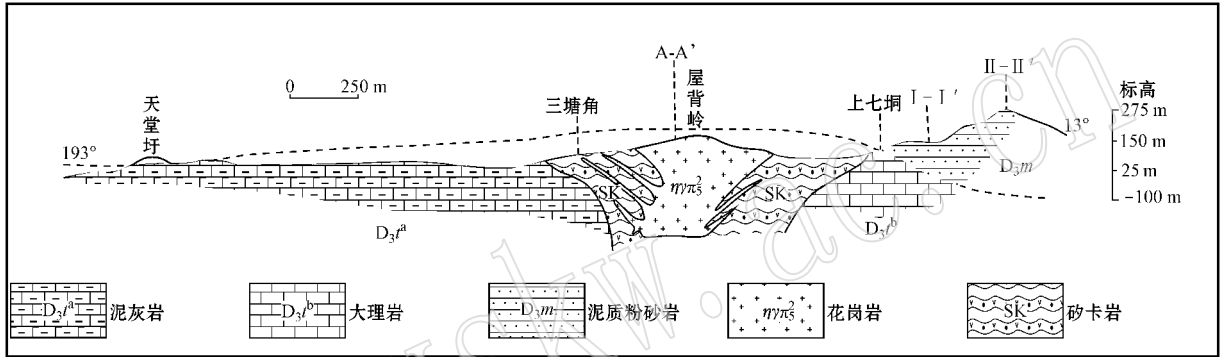


图 2 屋背岭向斜轴向剖面图

Fig. 2 Axis-directed geological section of Wubeiling syncline

2.3 岩浆岩

区内的成矿与岩浆活动关系非常密切,岩性主要为二长花岗斑岩,出露在屋背岭一带,位于天堂矿化带的中央,面积大约 0.34 km^2 ,以岩舌状超覆围岩(图 3)。二长花岗斑岩与围岩接触的部位,局部相变为花岗闪长岩,在屋背岭二长花岗斑岩中发育少量的包体,岩性为石英二长岩(马大铨等,1985)。

二长花岗斑岩与成矿关系最为密切,是矿床的成矿母岩。该岩石具斑状结构,斑晶以斜长石为主,斜长石粒度 $0.5 \sim 5 \text{ mm}$,石英 $0.8 \sim 4.5 \text{ mm}$,基质主要由钾长石和石英组成,含少量斜长石,基质粒度一般为 $0.05 \sim 0.1 \text{ mm}$ 。主要矿物斜长石(30%~35%)、钾长石(20%~25%)、石英(20%~30%)、黑云母(3%~5%)、副矿物包括磁铁矿、榍石、锆石及磷灰石等,磁铁矿的大量出现显示侵入体属于典型的磁铁矿系列花岗岩(Ishihara, 1981)。这与赵子杰等(1985)分类的与铁、铜、钼及铅锌多金属矿床有关的中酸性花岗岩类(岗尾-石碁型)一致。对矿区二长花岗斑岩的岩石地球化学和测年研究表明,岩体

为高钾钙碱性系列岩石(王联魁等,2001),成岩年龄为 111 Ma ,属燕山期岩浆活动的产物(袁正新,1995)。

2.4 蚀变-矿化类型及分带

砂卡岩矿床是在含矿气液的作用下形成的,大多数砂卡岩矿床的蚀变矿物、矿化元素等均具有一定的分带现象。由于组分活动性不同,扩散能力强弱不一,在交代作用进行的过程中,活动性大的组分容易随气液到达反应带的边缘,惰性组分虽然也参与反应,但多滞留在原地附近或迁移不远,因而形成矿化蚀变分带现象(张守林,2001),本矿床也不例外。天堂铜铅锌多金属矿床共 192 个矿体,其中主矿体 14 个,矿石品位(质量分数):Pb 一般在 1%~3% 之间,最高为 35.3%,全区平均 2.12%;Zn 一般在 0.9%~1.5% 间,最高达到 18.28%,全区平均 1.38%;Cu 一般为 0.4%~1%,最高 7.62%,平均 0.57%。矿石中伴生的 Ag、Ga、In、Se 等有益组分可供综合利用。

矿区围岩蚀变发育,主要为砂卡岩化(石榴子石

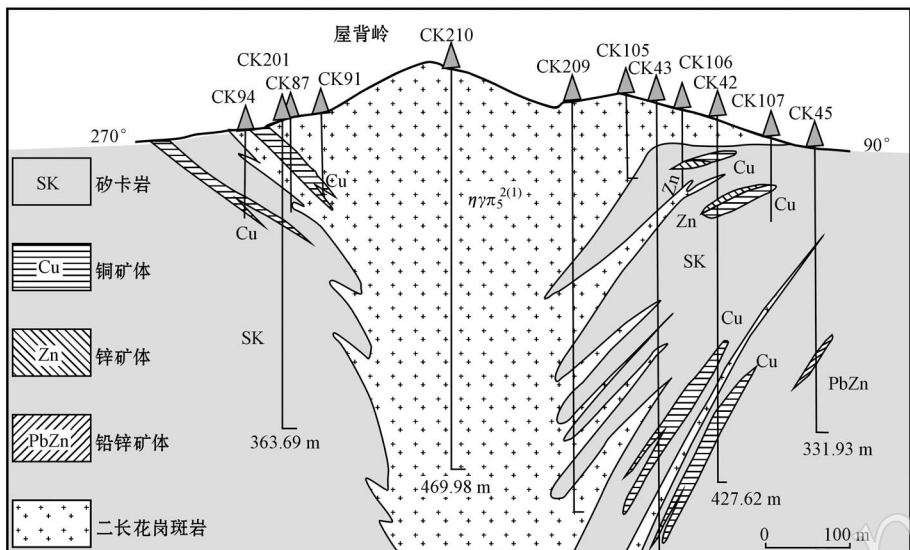


图 3 天堂矿区 75 线-7 线勘探线地质剖面图

Fig. 3 Geological cross section along No. 75-7 exploration line of the Tiantang deposit

化、透辉石化、绿帘石化、绿泥石化), 其次为硅化、碳酸盐化等。其中石榴子石化、透辉石化、绿帘石化、硅化等与铜铅锌矿化关系比较密切。绿帘石-绿泥石化作为中低温蚀变阶段的产物, 是常见的蚀变组合, 但天堂矿床蚀变阶段的磁铁矿化比较少见。以 2 号矿带 11 勘探线为例, 在垂直方向上, 显示比较明显的矿物分带(图 4), 从靠近二长花岗斑岩体的部位到远离岩体的方向, 矽卡岩组合依次为石榴子石矽卡岩→透辉石石榴子石矽卡岩→符山石石榴子石矽卡岩→硅灰石石榴子石矽卡岩→绿泥石石榴子石矽卡岩。在水平方向上, 成矿元素的分带相对比较明显, 离岩体比较近的部位铜矿化比较发育, 而离岩体比较远的地方, 逐渐锌矿化、铅锌矿化比较发育, 这与具有 2 号矿带 13 勘探线典型的成矿元素分带现象基本一致, 2 号矿带 13 勘探线对于铜铅锌等成矿元素从靠近岩体到远离岩体的方向具有明显的富集变化规律, 向远离岩体的方向表现出铜铁→铜锌→铅锌→铅矿的矿化分带规律(图 5)。

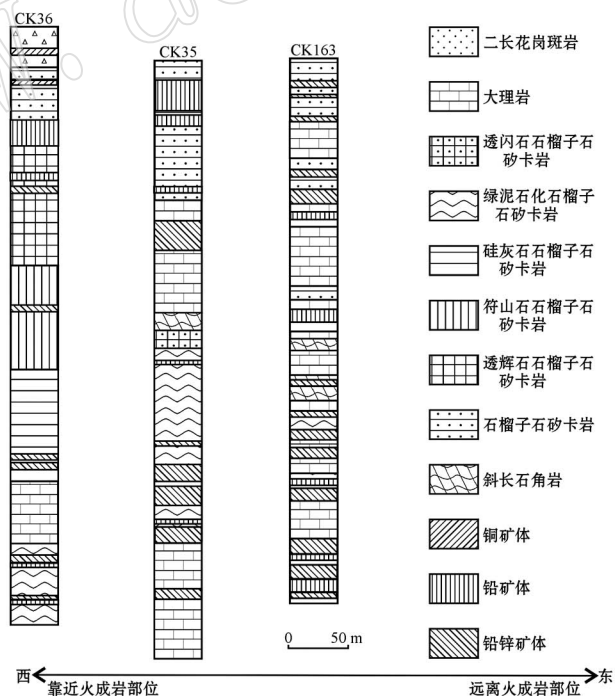


图 4 天堂铅锌多金属矿床二号矿带钻孔柱状图

Fig. 4 Bore columnar section of No. 2 metallogenic belt in the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

3 矽卡岩及成矿期次

天堂铜铅锌多金属矿床矽卡岩矿物发育广泛, 在空间上和成因上与成矿有着密切的关系。该矿的矽卡岩为钙矽卡岩, 主要由石榴子石、透辉石、符山石、硅灰石等组成, 退化蚀变矿物有绿帘石、绿泥石、蛇纹石等, 主要分布于二长花岗斑岩与大理岩的接

触带。根据矿物组合, 矽卡岩可分为石榴子石矽卡岩、透辉石矽卡岩、透辉石石榴子石矽卡岩、硅灰石石榴子石矽卡岩、石榴子石硅灰石矽卡岩、绿泥石石榴子石矽卡岩, 与相应的矿石类型相对应(图 6)。通过矿物的共生组合和穿插关系可将天堂铜铅锌多金

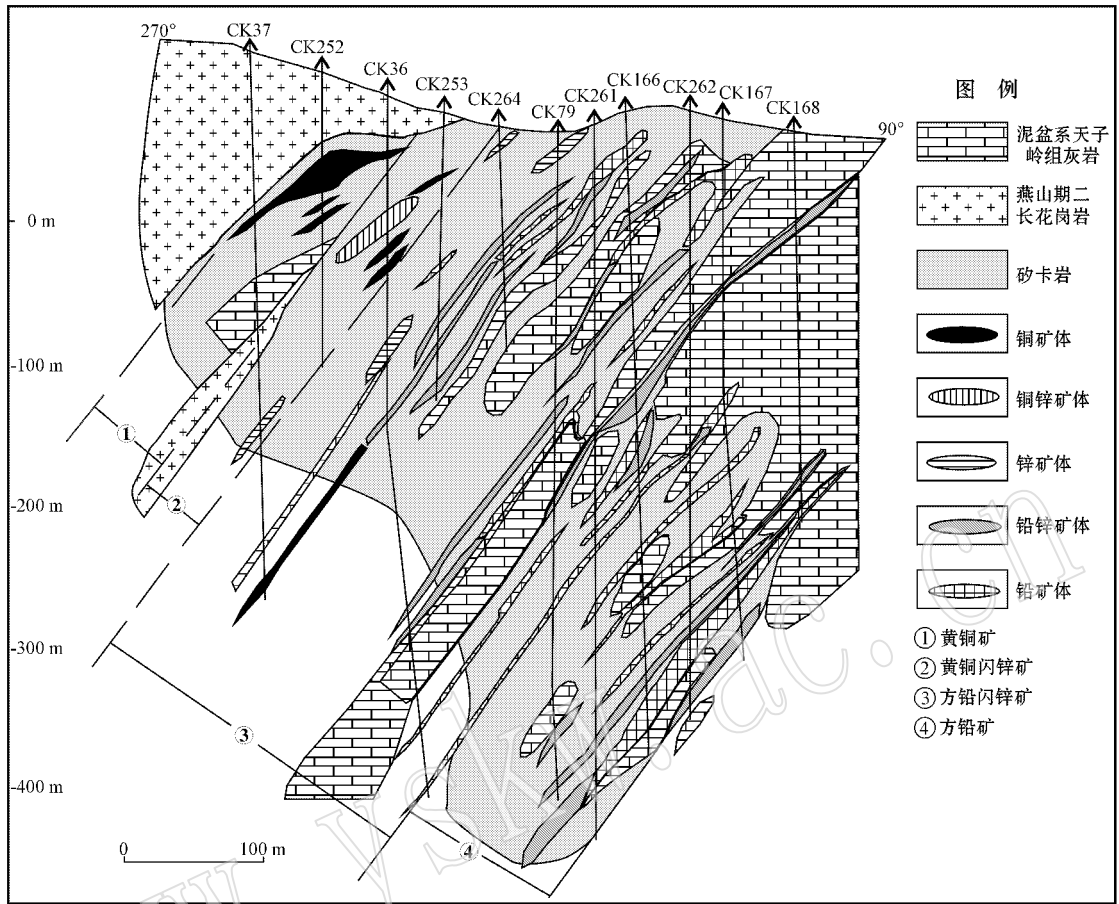


图 5 天堂铜铅锌多金属矿床二号矿带 13 勘探线剖面图

Fig. 5 Geological cross section along No. 13 exploration line of No. 2 metallogenic belt in the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

属矿床形成过程划分为 4 个阶段:早期矽卡岩阶段、矽卡岩退化蚀变阶段、石英硫化物阶段和碳酸盐阶段(图 7):

(1) 早期矽卡岩阶段:主要形成石榴子石、透辉石、硅灰石、符山石等无水硅酸盐矿物(图 7a~d)。石榴子石作为最常见的脉石矿物之一,主要有三种类型:第一类呈致密块状,浅黄绿色、蜡黄色和浅棕色,菱形十二面体或半自形晶产出,粒径 0.05~2.5 mm,具环带结构和压碎结构,在正交偏光镜下呈现一级灰和一级深灰的干涉色和弱非均质性,部分石榴子石的边部退蚀变成绿帘石、绿泥石等矿物,该种石榴子石在天堂矿床分布比较广,大多数石榴子石无论有无环带,由核部向边缘非均质性均逐渐增强;第二类为脉状的石榴子石,单偏光镜下无色,干涉色为灰色-暗灰色,弱非均质性,具正高突起,常穿切早期的石榴子石或透辉石等,这种脉状石榴子石在湖

南柿竹园 W-Sn-Mo-Bi 矿、湖南铜绿山矽卡岩型铜铁矿和鄂东南程潮矽卡岩型铁矿均有报道(毛景文等, 1996;赵海杰, 2010;赵海杰等, 2012;姚磊等, 2012)。透辉石也是主要矿物之一,手标本上呈墨绿、深绿色,在单偏光镜下一般无色,正交偏光下颜色鲜艳,干涉色比较高,具有弱的多色性,正高突起,镜下多为半自形粒状、短柱状,平均在 0.15~0.4 mm 之间,具有辉石式解理,横断面对称消光,常见后期退化蚀变的现象,多与粒状石榴子石密切共生。组成透辉石矽卡岩或与石榴子石、符山石、硅灰石等共生,主要产于外接触带。硅灰石,矽卡岩早期形成的矿物之一,在天堂矿床中含量仅次于石榴子石,与透辉石、钙铝榴石等矿物共生,硅灰石硬度较小,多以放射状、纤维状集合体和局部团块状产出在硅灰石石榴子石矽卡岩中。单个硅灰石矿物呈长柱状,柱长从几个毫米到几个厘米,手标本呈白色或乳白

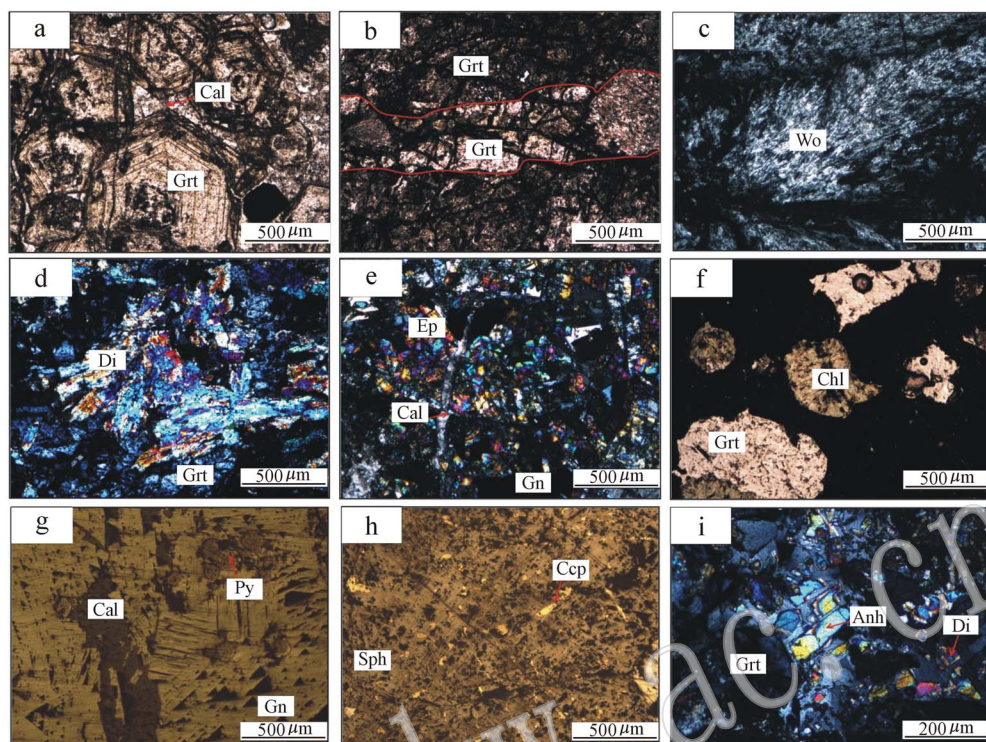


图 6 天堂铜铅锌多金属矿床矿物组合和矿石特征

Fig. 6 Mineral association and features of wall rocks in the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

a—石榴子石(Grt)矽卡岩被方解石(Cal)脉穿切,具条带状和细脉状矿化; b—透辉石矽卡岩,具少量黄铁矿(Py)化和黄铜矿(Ccp)化; c—硅灰石矽卡岩,具团块状方铅矿(Gn)和闪锌矿(Sph)化; d—绿泥石石榴子石矽卡岩,石榴子石(Grt)为淡绿色粒状; e—石榴子石硅灰石矽卡岩; f—块状矿石,含少量团块状方解石(Cal)和石英(Qtz); g—块状矿石,被石英(Qtz)细脉穿切; h—矽卡岩化大理岩,被两期石英(Qtz)脉穿切,早期含有闪锌矿(Sph)方铅矿(Gn)化石英(Qtz)脉穿切大理岩,而早期石英脉又被晚期无矿化石英脉穿切; i—矽卡岩化大理岩,被早期含有方铅矿(Gn)化的方解石(Cal)脉穿切,而该方解石脉又被后期纯的方解石脉穿切; Sph—闪锌矿; Gn—方铅矿; Ccp—黄铜矿; Py—黄铁矿; Qtz—石英; Cal—方解石; Grt—石榴子石; Di—透辉石; Wo—硅灰石; Chl—绿泥石

a—vein of calcite cutting through garnite-skarn, containing banded and veinlet mineralization; b—diopside-skarn containing some pyrite and chalcopyrite; c—wollastonite-skarn wrapping massive galena and sphalerite; d—chlorite-garent-skarn, containing garnet of greenish grains; e—garent-wollastonite-skarn; f—massive ore, containing a little lumpy calcite and quartz; g—vein of quartz cutting through massive ore body; h—two stages of quartz veins cutting through skarnized marble, the early stage quartz vein containing sphalerite and galena, but late vein having no mineralization; i—two stages of hydrothermal calcite veins cutting through skarnized marble, the early stage calcite vein containing galena, but late vein having no mineralization; Sph—sphalerite; Gn—galena; Ccp—chalcopyrite; Py—pyrite; Qtz—quartz; Cal—calcite; Grt—garent; Di—diopside; Wo—wollastonite; Ep—epidote; Chl—chlorite

色。单偏光镜下无色,正交偏光下干涉色多呈一级灰白,干涉色有时也呈一级黄白。可见硅灰石穿切石榴子石和透辉石的现象,硅灰石通常也组成单矿物矽卡岩或与透辉石、钙铝榴石共生,主要产于外矽卡岩带。符山石在CK34-1,CK36 钻孔可见,在钻孔深部含量比较高,多呈放射状集合体产出,常与透辉石、石榴子石等矿物共生。

(2) 矽卡岩退化蚀变阶段,该阶段又称含水矽卡岩阶段,主要生成绿帘石、绿泥石、角闪石等带状和复杂链状构造的含水硅酸盐矿物(图 7e~f),对早

期矽卡岩阶段的矿物具有明显的交代作用。绿帘石手标本上多为翠绿色,镜下呈粒状、柱状、板状,粒径在 0.05~0.25 mm 之间,颜色鲜艳,弱多色性,干涉色较高,正高突起。其有时叠加在石榴子石、辉石等矿物之上,有时以粒状集合体分布,部分绿帘石沿着石榴子石、辉石的边部或内部交代,从而形成交代残余结构或交代反应边结构。绿泥石呈深绿色,淡绿色,呈片状、板状及粒状产出,多色性弱,正低突起,镜下也可见绿泥石交代石榴子石、透辉石的现象。角闪石族矿物和磁铁矿比较少见。

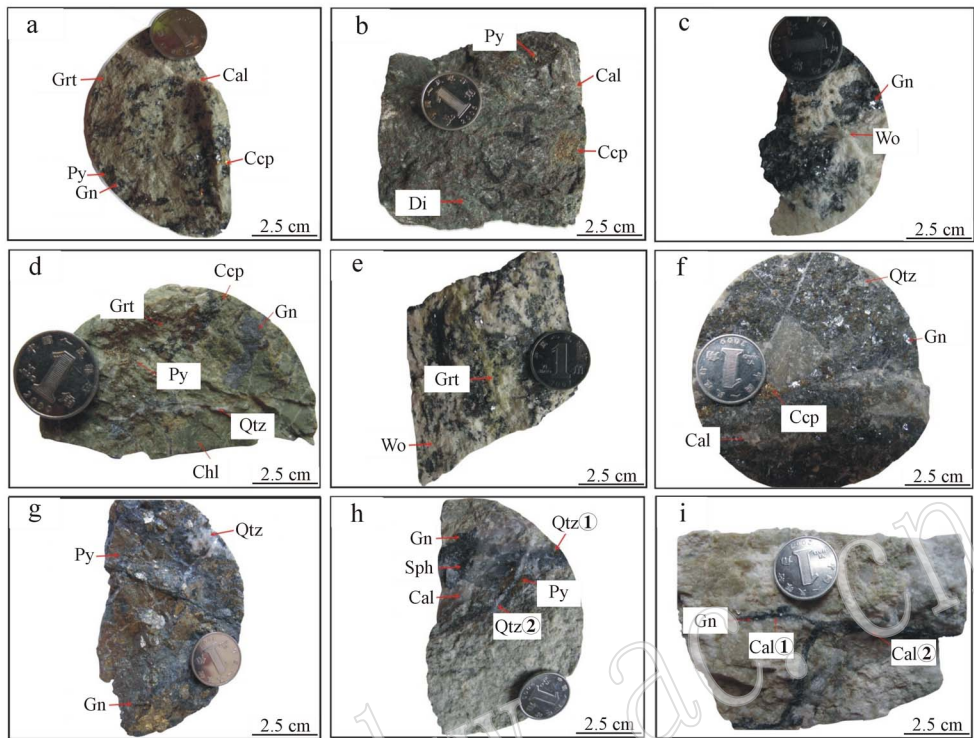


图 7 天堂铜铅锌多金属矿床岩石、矿石镜下显微特征

Fig. 7 Microscopic characteristics of rocks and ores in Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

a—具典型环带结构的石榴子石(Grt), 空隙被后期方解石(Cal)脉填充(单偏光); b—晚期脉状石榴子石(Grt)穿过早期石榴子石(Grt)(单偏光); c—硅灰石(Wo), 一级灰白放射状(正交偏光); d—透辉石(Di)和石榴子石(Grt)共生(正交偏光); e—绿帘石(Ep)被后期方解石(Cal)脉穿切(正交偏光); f—粒状绿泥石(Chl), 可见绿泥石(Chl)交代石榴子石(Grt)的现象(正交偏光); g—粒状黄铁矿(Py)嵌在方铅矿中, 方铅矿(Gn)又被后期方解石(Cal)细脉穿切(反射光); h—黄铜矿(Ccp)呈小乳滴分布在闪锌矿(Sph)中形成固溶体分离结构(反射光); i—粒状石榴子石(Grt)、透辉石(Di)和硬石膏(Anh)(正交偏光); Sph—闪锌矿; Gn—方铅矿; Ccp—黄铜矿; Py—黄铁矿; Qtz—石英; Cal—方解石; Grt—石榴子石; Di—透辉石; Wo—硅灰石; Ep—绿帘石; Chl—绿泥石; Anh—硬石膏

a—garnet with typical girdle structure, and late vein of calcite filling vacancy(plainlight); b—late vein of garnet cutting through early stages of garnet(plainlight); c—grayish white and radial wollastonite(crossed nicols); d—diopside associated with garnet(crossed nicols); e—late hydrothermal vein of calcite cutting through epidote(crossed nicols); f—granular chlorite replacing garnet(crossed nicols); g—galena containing granular pyrite, late vein of calcite cutting through galena(under reflective light); h—sphalerite and chalcopyrite assuming interstitial separation structure(under reflective light); i—granular garnet, diopside associated with anhydrite(crossed nicols); Sph—sphalerite; Gn—galena; Ccp—chalcopyrite; Py—pyrite; Qtz—quartz; Cal—calcite; Grt—garnet; Di—diopside; Wo—wollastonite; Ep—epidote; Chl—chlorite; Anh—anhydrite

(3) 石英硫化物阶段, 该阶段主要形成黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等硫化物以及石英、方解石等(图 7g~h)。金属硫化物在手标本上呈星点状、细脉状、稀疏浸染状、稠密浸染状、团块状、条带状产出。闪锌矿手标本上常呈团块状、稀疏浸染状、稠密浸染状等与方铅矿、黄铁矿、黄铜矿和方解石等矿物共生, 镜下呈他形粒状, 或不规则状集合体, 常含细小的黄铜矿乳滴, 具有多种不同的颜色, 从浅黄褐色到黄褐色、红棕色, 有时被后期纯的热液方解石细脉穿切, 有时也可见与方解石共生。方铅矿呈铅灰色, 金属光泽, 反射光下亮白色, 显微镜下可见特征明显的黑三角。多呈半自形-他形, 大部分为不规则细粒

集合体、星点状、斑点状和脉状分布, 常呈交代残余结构分布于闪锌矿中。黄铁矿多为半自形粒状, 以中细粒为主, 少数为自形和他形粒状聚合体, 少量呈碎裂状分布在方铅矿中或被方解石脉穿切。黄铜矿手标本呈铜黄色, 大多被氧化, 表面常有蓝、紫褐色的斑状锈色, 镜下常呈浸染状、不规则状, 在闪锌矿中呈乳滴状、团粒状、浸染星散状的固溶体分离形式产出。方解石较常见, 呈脉状或团块状产出, 该阶段的方解石脉与黄铁矿化、铅锌矿化等关系比较密切。也有部分矿化沿着石英细脉产出, 该阶段的石英脉和方解石脉大多比较细, 且石英脉和方解石脉常穿切矽卡岩和矽卡岩化大理岩。

(4) 碳酸盐阶段, 该阶段主要形成方解石、少量的石英和石膏等(图 7i)。此时的方解石脉比较大, 而且矿化比较少或者几乎没有, 并且包含多种不同的颜色, 有纯白色、粉红色、淡绿色等几种色调, 常穿切早期阶段形成的矿物。石英同样无矿化或矿化较少。

4 样品及分析方法

样品主要采自钻孔 CK166-1、CK34-1、CK269-1、CK256-1。将所采集的样品磨制成电子探针光薄片, 在详细的显微镜鉴定的基础上, 从代表性的样品中挑选出不同期次、种类和结构构造的石榴子石、辉石、绿帘石、绿泥石等矽卡岩矿物以及黄铁矿、黄铜矿和方铅矿等硫化物进行成分分析, 并进一步确定矿物端员组分含量和成分变化范围。实验在中国地质科学院矿产资源研究所进行, 仪器为 JEOL-JAX8230 型电子探针, 测试加速电压 20 kV, 束电流 20 nA, 束斑直径 5 μm , 标样采用天然矿物或合成金属国家标准, 分析误差小于 0.01%。

5 矿物学特征

5.1 石榴子石分析结果

天堂铅锌矿床 20 件石榴子石电子探针分析结果、阳离子数及端员组分见表 1, 计算得到的端员组分如图 8a 所示。该矿床的石榴子石属于钙铝榴石-钙铁榴石系列, 但两类石榴子石中钙铝榴石和钙铁榴石所占的比重不同: 第 1 类石榴子石的端员组分以钙铝榴石(Grs)为主, 其变化范围为 34.79% ~ 94.28%, 平均 68.29%, 其次是钙铁榴石(Adr), 其变化范围为 4.6% ~ 63.67%, 平均 30.05%, 镁铝榴石(Prp)和锰铝榴石(Sps)的含量较低, 两者之和的变化范围为 0.64% ~ 3.88%, 平均 1.39%, 而铁铝榴石和铬铁榴石的含量更低, 平均含量分别只有 0.22% 和 0.04%。第 2 类石榴子石属于典型的钙铝榴石-钙铁榴石系列, 钙铝榴石(Grs)其变化范围为 2.1% ~ 82.56%, 平均 37.87%; 其次是钙铁榴石(Adr), 其变化范围为 16.49% ~ 96.47%, 平均 61.04%, 镁铝榴石(Prp)和锰铝榴石(Sps)的含量较低, 两者之和的变化范围为 0.41% ~ 1.75%, 平均 1.03%, 而铁铝榴石和铬铁榴石的含量基本可以忽略不计。石榴子石的端员组分表明, 天堂铅锌矿床

的石榴子石总体主要为钙铁榴石-钙铝榴石系列(Grs_{2.1-94.28}Adr_{4.6-96.47}Prp + Sps_{0.41-3.88}), 从早到晚具有从钙铝榴石为主 → 钙铁榴石为主的演化过程, 这种演化趋势同湖北铜绿山矽卡岩铜铁矿床非常相似(赵海杰, 2010; 赵海杰等, 2012), 也与 Ein-audi 等(1981)、Meinert(1992)等提出的世界上多数矽卡岩系统中早期矽卡岩阶段形成的石榴子石倾向于富 Al, 晚期或退蚀变阶段形成的相对富 Fe 的结论相一致。

天堂矿床的石榴子石在显微镜下常显示环带结构, 为了进一步了解石榴子石环带的元素组成变化, 对部分具有环带结构的石榴子石从环带的核部向边缘依次进行电子探针分析(表 1)。分析结果表明, 石榴子石的内环和外环的成分有一定的变化, 环带从核部向边缘 Si 和 Ca 元素的含量变化不明显, 而 Fe 和 Al 之间的替代关系十分明显(图 9), 铁的含量由低到高, 而 Al 的含量却由高到低, Al₂O₃ 和 FeO 含量呈相反的变化趋势, 尽管单颗粒环带发育的石榴子石从核部到边缘其成分反映结晶过程中铁和铝的含量变化有一次或两次交替, 但总体表现为核部相对富 Al, 边缘富 Fe 的变化特征, 甚至出现核部为钙铝榴石、而边部为钙铁榴石的现象(图 9b), 但是也存在少数相反的情况。

5.2 辉石分析结果

辉石是矽卡岩的主要组成矿物之一, 12 件辉石电子探针分析的结果、阳离子数及端员组分见表 2, 计算得到的端员组分如图 8b 所示。辉石的端员组分以透辉石(Di)为主, 钙铁辉石(Hd)和锰钙辉石(Jo)相对含量比较低。透辉石含量变化范围为 88.51% ~ 95.09%, 平均 91.79%, 锰钙辉石含量变化范围为 3.31% ~ 9.76%, 平均 6.48%, 钙铁辉石含量变化为 0.28% ~ 3.98%, 平均 1.73%, 微量元素 Cr、Ti、Ni 含量部分低于检测限。李大新等(2011)报道矽卡岩矿床辉石的成分与围岩关系比较密切, 围岩为纯质的大理岩, 则辉石大多为含镁较高的透辉石, 而角岩内形成的辉石则会含有稍高的钙铁辉石分子, 这与天堂矿床的地质事实相吻合。

5.3 硅灰石分析结果

硅灰石的 8 件电子探针分析结果和端员组分见表 3。天堂矿区的硅灰石成分一般较纯, 主要含有 SiO₂、CaO。而硅灰石组分变化范围为 Wo 为 98.78% ~ 99.88%, 平均值为 99.35%, En 变化范围为 0.00% ~ 0.22%, 平均值为 0.07%, Fs 为 0.04%

表 1 天堂铜铅锌多金属矿代表性石榴子石电子探针分析结果

 $w_B/\%$

Table 1 Representative electron microprobe analyses of garnets from the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

类型	样号	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	MnO	Cr ₂ O ₃	FeO	TiO ₂	NiO	Total		
第 1 类	H95-2-2	0.01	0.13	20.85	0.01	40	0.01	36.2	0.1	-	2.77	0.3	0.01	100.37		
	T-17(1)4	0.14	0.02	19.31	0.04	38.66	-	35.19	1.78	-	4.53	0.01	0.01	99.68		
	T-10(2)1	0.11	0.18	11.74	0.03	37.49	0.03	35.98	0.18	-	12.51	0.5	0.03	98.8		
	T-49-1	-	0.06	21.04	0.01	39.2	-	36.63	0.9	0.02	2.86	0.03	-	100.74		
	T2-2(2)1	0.2	0.18	7.63	0.04	36.33	0.01	34.34	0.3	0.04	18.94	0.03	-	98.05		
	T-7-1-1	0.03	0.11	0.4	0.02	36.76	-	34.64	0.09	-	13.55	0.83	-	96.43		
	T-112-2-1	0.09	0.11	19.56	-	38.05	-	36.92	0.48	-	3.27	0.68	-	99.16		
	T-112-2-2	-	0.04	21.31	-	39.13	0.06	37.44	0.44	0.02	1.49	0.07	-	99.99		
	T-112-2-3	-	0.04	18.95	0.01	39.95	-	36.72	0.42	0.01	5.08	-	-	101.19		
	T-23-1	-	0.04	9.74	0.01	36.36	0.02	34.65	0.24	-	15.17	0.27	0.05	96.56		
T2-3(1)1-2	-	0.1	9.32	-	38.8	0.05	35.73	0.22	0.05	16.77	0.15	0.01	101.19			
T2-3(1)2-1	0.03	0.22	10.05	-	37.84	-	35.59	0.44	-	14.55	1.53	-	100.24			
第 2 类	T-7-4-2	0.11	-	12.83	0.01	36.17	0.01	34.73	0.31	-	10.82	0.29	-	95.27		
	T-7-4-3	0.23	0.09	17.31	0.12	37.45	-	35.71	0.28	-	5.08	0.45	-	96.72		
	T-74-1-1	0.01	0.06	7.04	-	36.42	0.02	35.4	0.08	0.01	19.66	0.12	-	98.82		
	T6-45(1)1-1	0.05	0.26	10.73	0.02	38.7	-	34.38	0.32	0.06	14.22	0.79	0.04	99.55		
	T6-45(1)1-2	0.01	0.27	0.09	-	34.13	0.04	33.24	0.14	-	27.79	0.03	0.03	95.77		
	T6-45(1)1-3	0.02	0.12	5.63	0.01	36.39	-	34.19	0.18	0.03	20.59	0.06	-	97.21		
	T6-45(1)1-4	-	0.24	0.05	-	34.61	0.04	33.01	0.04	0.03	27.33	0.02	0.02	95.4		
类型	样号	Si	Ti	Al	Cr	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Ura	Adr	Prp	Sps	Grs	Alm
第 1 类	H95-2-2	3.01	0.02	1.85	0	0.14	0.04	0.01	0.01	2.92	0	6.87	0.5	0.22	91.15	1.26
	T-17(1)4	2.97	0	1.75	0	0.27	0.02	0.12	0	2.9	0	13.51	0.06	3.82	82.02	0.59
	T-10(2)1	2.98	0.03	1.1	0	0.83	0	0.01	0.02	3.06	0	40.27	0.7	0.4	58.64	0
	T-49-1	2.95	0	1.87	0	0.16	0.02	0.06	0.01	2.96	0.07	7.83	0.23	1.89	89.29	0.7
	T2-2(2)1	2.96	0	0.73	0	1.29	0	0.02	0.02	3	0.13	63.67	0.73	0.67	34.79	0
	T-7-1-1	2.99	0.05	1	0	0.92	0	0.01	0.01	3.02	0	45.48	0.43	0.21	53.87	0
	T-112-2-1	2.93	0.04	1.77	0	0.21	0	0.03	0.01	3.04	0	10.23	0.4	1.01	88.36	0
	T-112-2-2	2.96	0	1.9	0	0.09	0	0.03	0	3.04	0.04	4.6	0.15	0.92	94.28	0
	T-112-2-3	3.01	0	1.68	0	0.32	0	0.03	0	2.96	0.04	15.81	0.15	0.9	82.97	0.13
	T-23-1	2.97	0.02	0.94	0	1.04	0	0.02	0	3.04	0	50.89	0.15	0.54	48.42	0
T2-3(1)1-2	3.02	0.01	0.86	0	1.09	0	0.01	0.01	2.98	0.16	54.47	0.38	0.47	44.52	0	
T2-3(1)2-1	2.97	0.09	0.93	0	0.96	0	0.03	0.03	2.99	0	47	0.83	0.96	51.22	0	
第 2 类	T-7-4-2	2.96	0.02	1.24	0	0.74	0	0.02	0	3.05	0	36.23	0	0.69	63.08	0
	T-7-4-3	2.97	0.03	1.62	0	0.34	0	0.02	0.01	3.04	0	16.49	0.34	0.61	82.56	0
	T-74-1-1	2.95	0.01	0.67	0	1.33	0	0.01	0.01	3.07	0.03	64.76	0.22	0.19	34.81	0
	T6-45(1)1-1	3.04	0.05	0.99	0	0.93	0	0.02	0.03	2.89	0.19	47.58	1.04	0.71	50.47	0
	T6-45(1)1-2	2.94	0	0.01	0	2	0	0.01	0.03	3.06	0	96.47	1.1	0.32	2.1	0
	T6-45(1)1-3	3	0	0.55	0	1.42	0	0.01	0.01	3.02	0.09	69.9	0.46	0.41	29.13	0
	T6-45(1)1-4	2.98	0	0.01	0	1.97	0	0	0.03	3.04	0.11	95.86	0.99	0.1	2.94	0

注：“-”为低于检测限，分析误差小于 0.01%，FeO 为 Fe^T，分析者：陈振宇、陈小丹。

~1.01%，平均值为 0.46%。从电子探针分析结果可以看出其 Mn、Fe 含量很低，微量的 Mn、Fe 等元素可能以类质同像的形式代替 Ca，其化学成分和典型的硅灰石成分十分相似（中国地质科学院地质矿产所，1977）。

5.4 绿帘石分析结果

绿帘石主要形成于退化蚀变岩阶段，一般产于内砂卡岩带。本文挑选了 13 件绿帘石样品进行电

子探针分析，分析结果见表 4。天堂矿床主要为绿帘石，含有少量的黝帘石。它的主要化学成分为：SiO₂ 平均 37.65%，Al₂O₃ 平均 24.24%，Fe₂O₃ 平均 10.29%，CaO 平均 23.71%，MgO 平均 0.06%，MnO 平均 0.60%，而 Ti、Na、Cr、K 等元素的含量很低，总体表现为富 Al、Ca，贫 Fe、Mg 的特点。它与绿泥石、阳起石等均是中低温退蚀变的产物，低温钙质交代作用的主要特征便是绿帘石化。

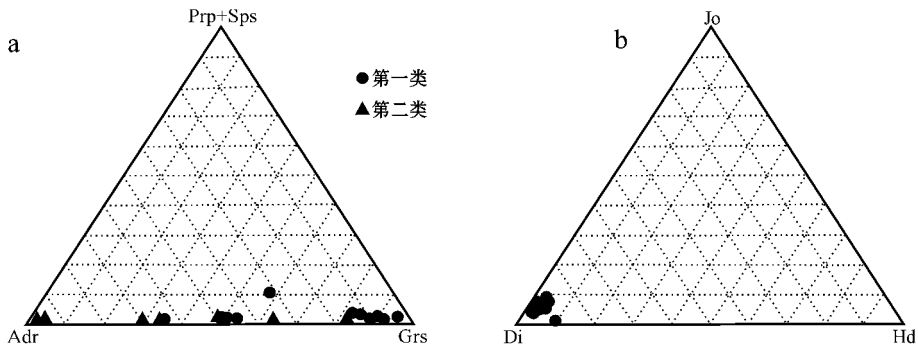


图 8 天堂铜铅锌矿石榴子石 (a) 和辉石 (b) 端员组分图解

Fig. 8 End members of garnets (a) and pyroxenes (b) from the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

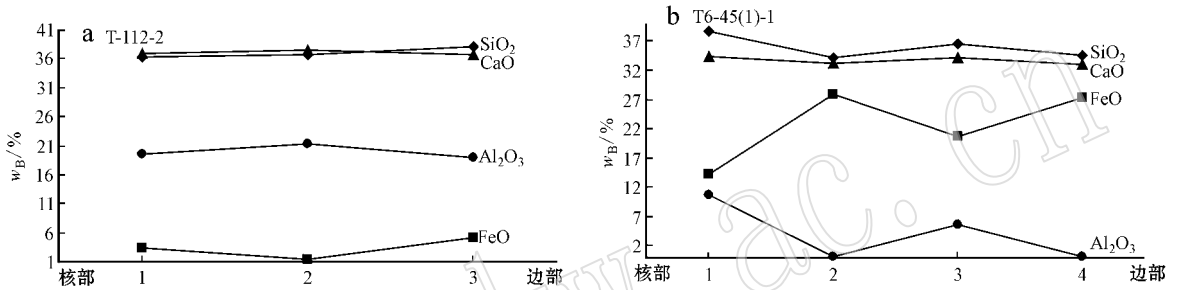


图 9 环带结构的石榴子石的成分变化趋势图

Fig. 9 Variation trend of composition of garnet from core to rim within zoning structure

表 2 天堂铜铅锌多金属矿代表性辉石电子探针分析结果

$w_B/\%$

Table 2 Representative electron microprobe analyses of pyroxene from the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

样号	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	MnO	Cr ₂ O ₃	FeO	TiO ₂	NiO	Total		
T-38-1-1	0.08	16.55	0.13	0.01	53.87	—	25.25	0.21	0.02	1.67	0.02	—	97.81		
T-62-1	0.34	17.30	0.17	0.14	53.43	0.02	25.26	0.54	—	1.38	—	0.02	98.59		
T-113-1	0.12	17.52	0.46	0.01	54.07	0.22	26.80	0.09	—	1.67	—	—	100.95		
T-115-1-1	0.07	17.32	0.14	—	55.79	—	26.12	0.42	0.05	2.00	—	0.02	101.94		
T-116-3-2	0.07	17.13	0.34	0.01	53.18	—	26.24	1.01	0.09	0.68	0.02	—	98.76		
T-130-1-2	0.12	16.77	0.14	0.01	52.89	0.01	26.22	0.58	0.12	1.88	—	—	98.74		
T2-8-1-4	0.09	18.15	0.13	0.02	55.99	—	26.44	0.53	0.06	0.92	0.03	0.03	102.37		
T2-8-2-2	0.04	17.73	0.14	—	55.13	0.05	25.99	0.53	0.07	1.10	—	0.02	100.80		
T3-9-1-1	0.02	16.62	0.04	—	53.93	—	25.19	1.29	—	2.00	—	0.02	99.09		
T6-2(1)-1	0.03	16.24	0.13	0.01	55.17	0.04	25.45	0.63	—	2.25	—	—	99.97		
T10-8-1-3	0.06	16.47	0.09	0.02	53.82	0.01	25.66	0.62	0.01	1.85	—	—	98.62		
T10-8-3-1	0.09	17.27	0.16	0.02	55.48	0.03	25.38	0.34	—	1.62	0.03	0.03	100.44		
样号	Si	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Ti	Cr	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	Di	Hd	Jo
T-38-1-1	2.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.05	0.01	0.92	1.01	0.01	0.00	94.00	0.67	5.33
T-62-1	1.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.02	0.95	1.00	0.02	0.01	89.00	1.57	9.21
T-113-1	1.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.95	1.04	0.01	0.00	90.36	0.28	9.37
T-115-1-1	1.99	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.01	0.92	1.00	0.00	0.00	92.72	1.28	5.99
T-116-3-2	1.97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.03	0.94	1.04	0.01	0.00	89.43	2.98	7.58
T-130-1-2	1.97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.02	0.93	1.04	0.01	0.00	88.51	1.73	9.76
T2-8-1-4	1.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.02	0.96	1.01	0.01	0.00	95.09	1.56	3.34
T2-8-2-1	1.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.02	0.95	1.01	0.00	0.00	95.08	1.61	3.31
T3-9-1-1	1.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.04	0.91	1.00	0.00	0.00	89.97	3.98	6.05
T6-2(1)-1	2.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.07	0.02	0.88	0.99	0.00	0.00	90.89	2.02	7.09
T10-8-1-3	1.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.02	0.91	1.02	0.00	0.00	92.24	1.96	5.80
T10-8-3-1	2.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.05	0.01	0.93	0.98	0.01	0.00	93.99	1.06	4.95

注：“—”为低于检测限，分析误差小于 0.01%。FeO 为 Fe^T；分析者：陈振宇、陈小丹。

表 3 天堂铜铅锌多金属矿代表性硅灰石电子探针分析结果

 $w_B/\%$

Table 3 Representative electron microprobe analyses of wollastonite from the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

样号	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	Cr ₂ O ₃	FeO	TiO ₂	NiO	Total		
T-23-2	49.71	47.54	0.12	0.01	-	0.01	0.05	-	0.01	0.02	0.01	-	97.48		
T-49-3	52.45	48.50	0.01	-	-	-	0.01	0.02	0.02	0.04	0.02	0.02	101.08		
T-100-1	49.81	48.27	0.02	0.08	-	0.13	-	0.21	-	0.17	0.02	0.03	98.73		
T-110-2	52.30	48.50	0.03	-	-	-	0.02	0.46	-	0.10	0.01	0.03	101.44		
T-118-2	52.50	48.67	-	0.07	-	-	0.01	0.51	0.03	0.12	-	-	101.92		
T2-8-1-3	52.09	49.13	0.08	0.01	-	0.01	0.01	-	0.01	0.02	-	0.06	101.43		
T6-27-1	49.41	47.42	0.02	0.01	-	-	-	0.12	-	0.07	-	0.02	97.07		
T6-38-2	52.07	48.02	0.01	-	0.01	-	-	0.32	-	0.08	0.04	-	100.56		
样号	Si	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Ti	Cr	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	Wo	En	Fs
T-23-2	1.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	2.03	0.01	0.00	99.51	0.02	0.04
T-49-3	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.99	0.00	0.00	99.88	0.01	0.09
T-100-1	1.97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	0.01	0.00	2.04	0.00	0.01	99.10	0.22	0.60
T-110-2	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	1.98	0.00	0.00	98.99	0.00	0.90
T-118-2	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	1.98	0.00	0.00	98.78	0.21	1.01
T2-8-1-3	1.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	2.01	0.01	0.00	99.64	0.03	0.04
T6-27-1	1.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	2.03	0.00	0.00	99.58	0.03	0.31
T6-38-2	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	1.98	0.00	0.00	99.28	0.01	0.66

注：“-”为低于检测限，分析误差小于0.01%，FeO为Fe^T；分析者：陈振宇、陈小丹。

表 4 天堂铜铅锌多金属矿代表性绿帘石电子探针分析结果

 $w_B/\%$

Table 4 Representative electron microprobe analyses of epidote from the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

样品	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
T-72-1	38.61	0.17	26.44	-	9.91	0.02	1.23	0.06	22.83	-	-	99.27
T-72-2	38.52	0.12	26.67	-	9.36	-	1.28	0.11	22.44	-	0.05	98.55
T-109-1	37.91	0.07	25.31	-	10.58	-	1.31	-	22.01	-	-	97.19
T3-4(2)-1-1	38.42	0.03	29.52	-	4.05	-	0.17	0.21	22.79	-	0.04	95.23
T3-4(2)-1-2	38.32	0.17	26.53	-	8.49	0.02	0.43	0.12	23.02	-	0.01	97.11
T3-4(2)-1-3	38.33	0.03	26.44	-	9.64	-	0.17	-	23.44	-	0.02	98.07
T3-6-1	37.98	0.02	24.29	-	11.85	0.03	0.09	0.07	23.30	-	-	97.63
T3-9-1-3	34.74	0.05	10.28	-	15.35	-	0.27	-	34.06	-	0.11	94.86
T4-2-1-2	37.18	0.09	23.17	-	11.80	0.03	0.22	0.02	22.85	-	0.01	95.37
T4-2-2-2	37.59	0.06	24.38	-	11.58	0.05	0.37	0.03	22.82	-	-	96.88
T4-2-3-1	37.20	0.06	24.50	-	11.22	-	1.05	-	22.05	-	-	96.08
T6-4(1)-1-2	37.76	0.07	22.54	-	11.67	0.01	0.40	0.15	23.78	-	0.01	96.39
样品	Si	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Ti	Cr	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K
T-72-1	3.00	0.00	2.41	0.01	0.00	0.00	0.58	0.08	0.01	1.90	0.00	0.00
T-72-2	3.00	0.00	2.45	0.01	0.00	0.00	0.55	0.09	0.01	1.88	0.00	0.01
T-109-1	3.01	0.00	2.37	0.00	0.00	0.00	0.63	0.09	0.00	1.87	0.00	0.00
T3-4(2)-1-1	3.03	0.00	2.74	0.00	0.00	0.00	0.24	0.01	0.03	1.93	0.00	0.00
T3-4(2)-1-2	3.02	0.00	2.46	0.01	0.00	0.00	0.50	0.03	0.01	1.94	0.00	0.00
T3-4(2)-1-3	3.00	0.00	2.44	0.00	0.00	0.00	0.57	0.01	0.00	1.97	0.00	0.00
T3-6-1	3.01	0.00	2.27	0.00	0.00	0.00	0.71	0.01	0.01	1.98	0.00	0.00
T3-9-1-3	3.06	0.00	1.07	0.00	0.00	0.00	1.02	0.02	0.00	3.22	0.00	0.01
T4-2-1-2	3.03	0.00	2.22	0.01	0.00	0.00	0.72	0.02	0.00	1.99	0.00	0.00
T4-2-2-2	3.01	0.00	2.30	0.00	0.00	0.00	0.70	0.03	0.00	1.96	0.00	0.00
T4-2-3-1	3.00	0.00	2.33	0.00	0.00	0.00	0.68	0.07	0.00	1.91	0.00	0.00
T6-4(1)-1-2	3.05	0.00	2.15	0.00	0.00	0.00	0.71	0.03	0.02	2.06	0.00	0.00

注：“-”为低于检测限，分析误差小于0.01%，FeO为Fe^T；分析者：陈振宇、陈小丹。

5.5 绿泥石分析结果

绿泥石在砂卡岩矿床中主要发生在砂卡岩期后酸性淋滤阶段。Foster(1962)根据绿泥石化学成分将其划分为 9 个变种,在砂卡岩矿床中绿泥石常是辉石、角闪石、石榴子石的主要蚀变矿物。本文挑选了 4 件绿泥石样品进行电子探针分析,分析结果见

表 5。绿泥石的主要化学成分为: SiO₂ 平均 37.65%, Al₂O₃ 平均 24.24%, FeO 平均 10.29%, CaO 平均 23.71%, MgO 平均 0.06%。从表 5 和图 10 中可以看出,天堂砂卡岩矿床主要发育鳞绿泥石和铁绿泥石等。

表 5 天堂铜铅锌多金属矿代表性绿泥石电子探针分析结果

w_B/%

Table 5 Representative microprobe analyses of chlorite from the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit

样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
T-19-1	28.28	0.02	19.35	0.02	17.92	-	1.15	20.79	0.01	0.02	0.07	87.63
T-19-2	28.71	-	17.99	0.05	17.69	-	1.12	20.98	0.03	0.12	0.05	86.74
T1-18-1	28.12	-	21.15	-	32.73	-	0.30	4.52	0.23	0.23	1.36	88.64
T5-3-1	33.75	0.01	23.43	-	20.73	-	0.04	3.41	0.09	0.12	3.58	85.16

样号	Si	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Ti	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Cr	Mn	Mg	Ca	Na	K	Fe/(Fe + Mg)	Mg/(Fe + Mg)
T-19-1	2.05	1.65	0.00	0.00	0.00	1.09	0.00	0.07	2.25	0.00	0.00	0.01	0.33	0.67
T-19-2	2.10	1.55	0.00	0.00	0.00	1.08	0.00	0.07	2.29	0.00	0.02	0.01	0.32	0.68
T1-18-1	2.17	1.93	0.00	0.00	0.00	2.12	0.00	0.02	0.52	0.02	0.03	0.13	0.80	0.20
T5-3-1	2.52	2.061	0.00	0.00	0.00	1.30	0.00	0.00	0.38	0.01	0.02	0.34	0.77	0.23

注：“-”为低于检测限,分析误差小于 0.01%,FeO 为 Fe^T 分析者 陈振宇、陈小丹。

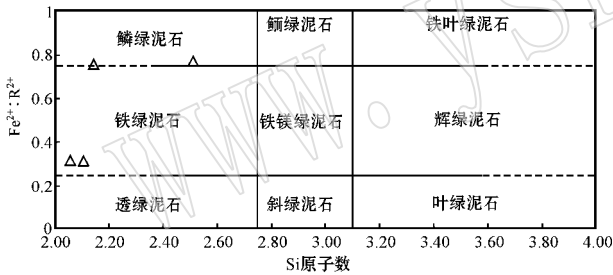


图 10 天堂矿床中绿泥石分类(底图根据 Foster, 1962)

Fig. 10 Classification of chlorites from the Tiantang deposit(modified after Foster, 1962)

6 讨论

6.1 砂卡岩形成机制

Einaudi 等(1981)根据砂卡岩形成机理不同,将砂卡岩划分为交代砂卡岩和变质砂卡岩两类。交代砂卡岩按其矿物组成和围岩的不同,又可划分为钙砂卡岩和镁砂卡岩两类。赵一鸣等(1990)在前人的基础上又提出了锰质砂卡岩和碱质砂卡岩。

通常认为,钙质砂卡岩首先形成石榴子石、辉石等矿物组合,由于形成环境的氧逸度可能比较高,在退化蚀变作用之初会有大量的绿帘石产出,接着先

后发生以阳起石和以绿泥石为代表的退化蚀变作用(赵一鸣等,2003;徐林刚等,2007;周振华等,2011)。从矿物组合上看,本区砂卡岩组合与钙质砂卡岩建造相近。天堂矿床石榴子石的三角图解表明(图 8),石榴子石虽然属于钙铁榴石-钙铝榴石系列,其端员组分的变化与世界大型砂卡岩型铅锌矿的石榴子石端员组分变化比较相似(图 11a),但比国外的砂卡岩型铅锌矿钙铝榴石的含量相对高一些,辉石属于典型的透辉石系列,与世界上砂卡岩型铅锌矿中辉石的端员组分相比(图 11b),显示高透辉石贫钙铁辉石的特征(Einaudi and Burt, 1982;赵斌等,1987;Meinert, 1992)。

Gaspar 等(2008)认为钙铝榴石或钙铁铝榴石主要是受流体的扩散交代作用形成的,而钙铁榴石则受岩浆流体的影响大一些。最近,郑伟等(未发表资料)通过闪锌矿及其共生矿物的 Rb-Sr 测年测得天堂铅锌矿成矿年龄为 98 Ma 左右,对应于毛景文等(2007, 2008, 2009),Mao 等(2008a, 2008b)提出的中国东部 135 Ma 之后由于太平洋板块运动方向的改变而引发的大规模的花岗岩岩浆活动,而花岗质岩浆的大量侵入可以为成岩成矿带来大量的成矿物质和成矿所需的热能等其他条件。天堂矿区位于吴川-四会断裂带控制的阳春盆地内,断裂构造非常发

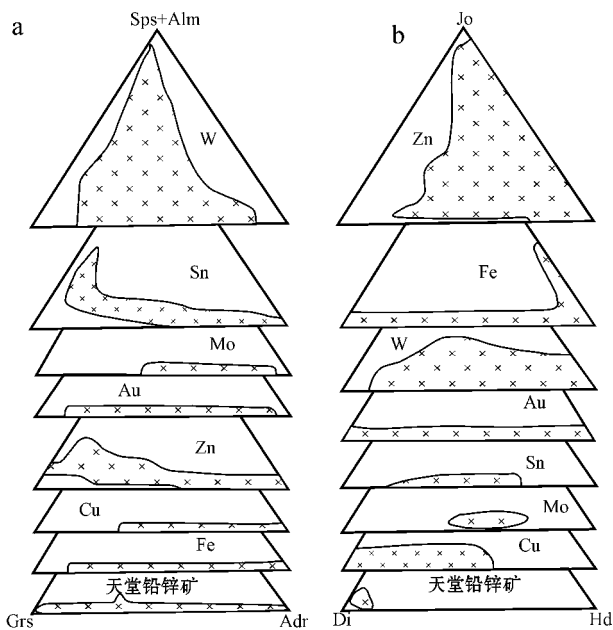


图 11 世界大型矽卡岩型矿床石榴子石(a)和辉石(b)组分(据 Meinert, 1992)

Fig. 11 Ternary plots of garnet (a) and pyroxene (b) compositions of major large skarn deposits (after Meinert, 1992)

育,可以为流体运移提供足够的通道。Kwak (1987)、Ahmed 和 Hariri (2006)等提出矽卡岩的寄主岩石通常是形成于大陆边缘或弧前环境的泥质至碳酸盐沉积物或火山岩,天堂铜铅锌多金属矿床的围岩地层是以灰岩、泥灰岩为主的华南泥盆系碳酸盐岩地层。笔者认为天堂矽卡岩铜铅锌矿是一个处在中国东部构造体制大转换下(Goldfarb *et al.*, 2007),由于古太平洋板块俯冲而形成的大陆边缘弧后伸展环境的产物。后来,随着成矿环境的变化,二长花岗斑岩体的作用减弱,温度和氧逸度逐渐降低,成矿物质大量析出沉淀,从而形成了天堂大型矽卡岩型铜铅锌多金属矿床。

6.2 矽卡岩与铅锌矿关系

矽卡岩和矿化之间不仅在空间上大致重合,时间上同时或相继形成,而且有着密切的成因联系(赵一鸣等, 1990)。矽卡岩矿物成分与矿化类型之间存在着密切的联系,这些联系对揭示矽卡岩矿床的形成机理和指导寻找不同矿化类型的矽卡岩矿床有着一定的指示意义(林文蔚等, 1990)。

艾永富(1981)指出矽卡岩矿床中石榴子石的成分可作为判断矿化介质酸度和矿化种属的一个标志;Einaudi 和 Bur(1982)、林文蔚等(1990)、Ray 和

Webster(1997)指出对于钙矽卡岩型矿床,从 Fe、Fe-Cu→W-Zn-Cu→Cu-Zn→W-Bi-Cu-Mo→Sn-Mo-Bi-W→Pb-Zn→W→Sn 矿床,石榴子石中(Sps + Alm + Prp)总含量依次递增,而从 Fe、W-Zn-Cu→Sn→Sn-Mo-Bi-W 矿床,辉石中锰钙辉石含量略有增加;毛景文等(1998)认为铁矿主要与钙矽卡岩和镁矽卡岩有关,而锰质矽卡岩主要与铅锌银矿化有关。

Nakano 等(1994)指出不同矿化金属元素的矿床中石榴子石和辉石矿物中 Mn/Fe 比值不同, Mn/Fe 比值变化可以指示矽卡岩金属矿化的类型。矽卡岩铁、金矿床和部分铜矿床中辉石的 Mn/Fe 比值较低,大多小于 0.1;而矽卡岩铅锌矿床中的辉石的 Mn/Fe 比值大多高于 0.1,矽卡岩钨矿床中 Mn/Fe 比值大多介于 0.1~0.3 之间,比铅锌矿床中的稍低,矽卡岩铜、钼矿床中的 Mn/Fe 比值比矽卡岩铁、金矿床中要稍高一些(赵一鸣等, 1997; Nakano, 1998)。天堂矿床辉石的 Mn/Fe 比值介于 0.03~0.66 之间(平均为 0.30, $n=12$),与天堂矿床矿是一个多金属矿床的地质事实相一致,验证了矽卡岩矿床中矿物成分与矿化种属存在着关系。

6.3 矽卡岩对成矿环境的指示意义

矽卡岩的矿物成分能提供关于矽卡岩和成矿环境的许多重要信息,例如石榴子石和辉石的组成能指示矽卡岩系统的氧化还原状态,并具有重要的找矿意义(Einaudi *et al.*, 1981; Lu *et al.*, 2003; Ahmed and Hariri, 2006)。天堂铅锌矿床的石榴子石为钙铁榴石-钙铝榴石系列,石榴子石和辉石的矿物组分分别为 $\text{Adr}_{4.60-96.47}\text{Grs}_{2.10-94.28}$ (Prp + Sps) $_{0.41-3.88}$ 和 $\text{Di}_{88.51-95.09}\text{Hd}_{3.31-9.76}\text{Jc}_{0.28-3.98}$, 其较大的成分变化特征反映出矽卡岩不是在一个完全封闭的平衡条件下形成的(赵劲松等, 1996; 周振华等, 2011)。作为矽卡岩的典型矿物,其环带成分变化可为揭示与石榴子石生长相关的变质过程提供重要依据(陈能松等, 2003),天堂铜铅锌多金属矿床的石榴子石环带比较发育,反映出石榴子石的生长并不是个连续的过程,而存在明显的生长间断(Hickmott and Spear, 1992; 张泽明等, 2005; Cheng and Lai, 2009)。

梁祥济(1994)通过钙铝-钙铁系列石榴子石形成的物理化学条件实验,得出钙铁榴石一般形成于 450~600°C、pH = 4.0~11.0 的氧化-弱氧化环境中,而钙铝榴石则在 550~700°C、中-酸性溶液的弱氧化-弱还原条件下晶出。天堂矿床的石榴子石同

国内的许多矽卡岩型多金属矿床相似,如湖南柿竹园和西藏甲玛铜多金属矽卡岩型矿床,以钙铝榴石-钙铁榴石系列为主,说明处于一个相对氧化或者弱氧化的环境。而且天堂矿床具有从早到晚以钙铝榴石为主→钙铁榴石为主的演化趋势,反映出成矿溶液由酸性向碱性演化(赵海杰,2010)。从钻孔CK36(图4)可以看出天堂矿床硅灰石矽卡岩位于矽卡岩体底部,向上逐渐过渡为石榴子石矽卡岩,指示随着与二长花岗斑岩体距离的增加温度有不断降低的趋势。

天堂矿床的铅锌矿化与矽卡岩化关系非常密切,而矿化在二长花岗斑岩体与灰岩的内接触带却非常少,这是由于内矽卡岩带的温度和盐度比较高,活跃的酸性介质会使体系处于动态平衡状态,从而不利于金属硫化物的沉淀,因此在矽卡岩内带难以形成有经济价值的铅锌矿体。而在远离接触带的大理岩部位,成矿物质很难被低温、低盐度的大气降水萃取,因而也不是矿石矿物大量堆积的理想场所,只有在外接触带矽卡岩和其附近的大理岩中才是成矿的有利部位(冯守忠,2008),这与天堂矿床的硫化物主要赋存在矽卡岩和矽卡岩化大理岩的事实相吻合,故成矿环境对于矿床的形成占有非常重要的地位。

7 结论

(1)天堂铅锌矿床赋存于泥盆系上统天子岭组灰岩、泥灰岩之中,矿体呈似层状、层状、透镜状、不规则状等产出在矽卡岩和矽卡岩化大理岩中,受断裂构造控制明显,发育石榴子石、透辉石、硅灰石、绿帘石、绿泥石等蚀变矿物,是一个大型的铜铅锌多金属矿床。

(2)天堂铜多金属矿的成矿阶段可划分为早期矽卡岩阶段、矽卡岩退化蚀变阶段、石英硫化物阶段和碳酸盐阶段4个阶段。该矿床的矿化和蚀变矿物具有一定的分带性,从靠近二长花岗斑岩体的部位到远离岩体的方向,矽卡岩组合依次为石榴子石矽卡岩→透辉石石榴子石矽卡岩→符山石石榴子石矽卡岩→硅灰石石榴子石矽卡岩→绿泥石石榴子石矽卡岩,同时成矿元素表现出铜铁→铜锌→铅锌→铅矿的矿化分带规律。

(3)电子探针分析结果表明:天堂矿床石榴子石主要为钙铁榴石-钙铝榴石系列,从早到晚具有从

钙铝榴石为主→钙铁榴石为主的演化趋势,辉石为透辉石系列,帘石以绿帘石为主,含有硅灰石、鳞绿泥石、铁绿泥石和少量的黝帘石,矽卡岩属于较为典型的钙矽卡岩。

(4)天堂矿床形成过程中经历了氧化-还原、酸性-碱性环境的转变,该矿床辉石的Mn/Fe比值介于0.03~0.66之间,平均值为0.30,符合铜多金属矿床中Mn/Fe比值,验证了矽卡岩矿床中矿物成分与矿化种属存在着联系。

致谢 本文完成过程中得到了程彦博博士的指导,野外地质工作期间得到了广东省地质调查院、广东省有色金属地质局和云浮星辰矿业有限公司的大力支持和帮助,中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室的陈振宇老师和陈小丹、王枫在论文实验过程中给予了热情的指导和帮助,资料收集过程中得到了中国地质大学(北京)涂长发、张娟、张立成、王志华、赵辛敏的帮助,审稿专家给论文提出了许多建设性的意见,在此一并致谢!

References

- Ahmed Z and Hariri M M. 2006. Formation and mineral chemistry of a calcic skarn from Al-Madhiq, SW Saudi Arabia[J]. *Chemie der Erde Geochemistry*, 66: 187~201.
- Ai Yongfu. 1981. The study of the relationship between the mineralization and the garnet in the skarn ore deposits[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 01: 83~90(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*(China University of Geosciences, Beijing), 10(3): 315~320(in Chinese with English abstract).
- Cheng Suhua and Lai Xingyun. 2009. P-T taths deribed from garnet growth zoning in Danba Domal Metamorphic Terrain, Sichuan Probince, West China[J]. *Journal of Earth Science*, 20(2): 219~240.
- Einaudi M T and Burt D M. 1982. Introduction-terminology, classification and composition of skarn deposit[J]. *Econ. Geol.*, 77: 745~754.
- Einaudi M T, Meinert L D and Newberry R J. 1981. Skarn deposits [J]. *Economic Geology*, 75th Anniversary Volume, 317~391.
- Feng Shouzhong. 2008. Geological features and metallogenic mechanism of Jilin Zhengcha Pb-Zn deposit[J]. *Contributions to Geology and*

- Mineral Resources Research, 23(1): 16~21(in Chinese with English abstract).
- Foster M D. 1962. Interpretation of the Composition and a Classification of the Chlorites[J]. Prof. Pap. - U. S. Geol. Surv, 414A: 1~33.
- Gaspar M, Knaack C, Meinert L D, *et al.* 2008. REE in skarn systems: a LA-ICP-MS study of garnets from the Crown Jewel gold deposit[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 72(1): 185~205.
- Geology and Mineral Resources Division of the Ministry of Nanling lead-zinc Theme Group. 1985. The Metallogenic Regularity of Nanling Leda-zinc Deposits[M]. Chasha: Hunan Science and Technology Press, 120~179(in Chinese).
- Goldfarb R J, Hart C, Davis G, *et al.* 2007. East Asian gold: Deciphering the anomaly of Phanerozoic gold in Precambrian cratons [J]. Economic Geology, 102(3): 341~345.
- Hickmott D D and Spear F S. 1992. Major and trace element zoning in garnets from calcareous pelites in the NW Shelburne Falls Quadrangle, Massachusetts: Garnet growth histories in retrograded rocks [J]. Journal of Petrology, (33): 965~1 005.
- Ishihara S. 1981. The granitoid series and mineralization[A]. Skinner B. Economic Geology 75th Anniversary Volume[C]. Lancaster: Economic Geology Publishing Company, 458~484.
- Kwak T A P. 1987. W-Sn skarn deposits and related metamorphic skarns and granitoid[J]. Amsterdam: Elsevier.
- Li Daxin, Feng Chengyou, Zhao Yiming, *et al.* 2011. Mineralization and Alteration Types and Skarn Mineralogy of Kaerqueka Copper Polymetallic Deposit in Qinghai Province[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 41(6): 1 818~1 830(in Chinese with English abstract).
- Liang Xiangji. 1994. Garnets of grossular-andradite series: Their characteristics and metasomatic mechanism[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 13(4): 342~352(in Chinese with English abstract).
- Liang Yuehan, Zhang Qifu, Yang Shiyi, *et al.* 1998. Ore-forming Regularities and Ore-searchina Prediction of Yunkai Uplift[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~10(in Chinese).
- Lin Wenwei, Zhao Yiming and Jiang Chongjun. 1990. Characteristics of paragenetic clinopyroxene-garnet pairs in skarn deposit and their geological significance[J]. Mineral Deposit, 9(3): 195~207(in Chinese with English abstract).
- Lu Huanzhang, Liu Yimao, Wang Changlie, *et al.* 2003. Mineralization and fluid inclusion study of the Shizuyuan W-Sn-Bi-Mo-F skarn deposit, Hunan Province, China[J]. Econ. Geol., 98: 955~974.
- Ma Daquan, Zhao Zijie and Lin Huikun. 1985. Petrographical study of the enclaves from the Gangwei-Shilu-type granitoids in Yangchun basin of Guangdong and adiscussion on their genesis[J]. Journal of the Chinese Academy of Yichang Geological Sciences, 10: 59~72 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Franco P and Nigel C. 2011a. Mesozoic metallogeny in East China and corresponding geodynamic settings: An introduction to the special issue[J]. Ore Geology Reviews, 43(1): 1~7.
- Mao Jingwen, Li Hongyan, Guy B, *et al.* 1996. Geology and Metallogeny of the Shizhuyuan skarn-greisen W-Sn-Mo-Bi deposit, Hunan Province[J]. Mineral Deposit, 15(1): 1~14(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Li Hongyan, Song Xuexin, *et al.* 1998. Geology and Geochemistry of the Shizhuyuan W, Sn, Mo, Bi Polymetallic Deposits, Hunan Province[M]. Beijing: Geological Publish House, 1~215(in Chinese).
- Mao Jingwen, Wang Yitian, Lehmann B, *et al.* 2006. Molybdenite Re-Os and albite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Changjiang valley and metallogenic implications[J]. Ore Geology Reviews, 29: 307~324.
- Mao Jingwen, Wang Yitian, Li Houmin, *et al.* 2008b. The relationship of mantle-derived fluids to gold metallogenesis in the Jiaodong Peninsula: Evidence from D-O-C-S isotope systematics[J]. Ore Geology Reviews, 33: 361~381.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Bierlein F, *et al.* 2008a. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 72: 4 607~4 626.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Cheng Yanbo, *et al.* 2009. Mineral Deposit Models of Mesozoic Ore Deposits in South China[J]. Geological Review, 55(3): 347~354(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Duan Chao, *et al.* 2011b. A tectono-genetic model for porphyry-skarn-stratabound Cu-Au-Mo-Fe and magnetite-apatite deposits along the Middle-Lower Yangtze River Valley, Eastern China[J]. Ore Geology Reviews, 43(1): 294~314.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, *et al.* 2007. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nanling region, South China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(10): 2 329~2 338(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, *et al.* 2008. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their metallogenic setting[J]. Geological Journal of China Universities, 14(4): 510~526(in Chinese with English abstract).
- Meinert L D. 1992. Skarn and Skarn Deposits[M]. Geoscience Canada, 19: 145~162.
- Meinert L D. 1993. Igneous petrogenesis and skarn deposits[J]. Geol. Assoc. Canada Spec, 40: 569~583.
- Meinert L D, Dipple G M and Nicolescu S. 2005. World Skarn Deposits [J]. Economic Geology 100th Anniversary Volume, 299~336.
- Meinert L D, Hedenquist J W, Satoh H, *et al.* 2003. Formation of anhydrous and hydrous skarn in Cu-Au ore deposits by magmatic fluid[J]. Econ. Geol., 98: 147~156.

- Misra K C. 2000. Understanding Mineral Deposits[J]. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers , 414~449.
- Nakano T. 1998. Pyroxene geochemistry as an indicator for skarn metallogenesis in Japan[A]. Lentz D R. Mineralized Intrusion~Related Skarn Systems[C]. Mineralogical Association of Canada Short Course , 26 : 147~167.
- Nakano T, Yoshino T, Shimazaki H, *et al.* 1994. Pyroxene composition as an indicator in the classification of skarn deposits[J]. Econ. Geol. , 89(7): 1 567~1 580.
- Peng Shaomei, Fu Lifan and Zhou Guoqiang. 1995. The Tectonic Evolution of Yunkai Block and Shear Causes of Gneissic Granitic Rocks [M]. Wuhan :China University of Geosciences Publishing House , 80~159(in Chinese).
- Ray G E and Webster I C L. 1997. Skarns in British Columbia[J]. British Columbia Geological Survey Branch Bull , 101 : 1~260.
- Shao Shuxun, Zhang Qian and Pan Jiayong. 2000. The geochemical characteristics of granite in Yuexi area and mineralization relationship with gold-silver deposit[J]. Bulletin of Mineralogy , Petrology and Geochemistry , 4(19): 281~283(in Chinese with English abstract).
- Situ Hong, Zheng Changneng and Huang Dexin. 2004. The geological characteristics and prospecting prospect of Tiantang chalcopyrite polymetallic deposit[J]. West-china Exploration Engineering , (5): 76~77(in Chinese with English abstract).
- Somarin A K. 2004. Garnet composition as an indicator of Cu mineralization: Evidence from skarn deposits of NW Iran[J]. Journal of Geochemical Exploration , 81(1~3): 47~57.
- The Institute of Mineral Deposits in Chinese Academy of Geological Sciences. 1977. The Microscope Identification Table of Transparent Minerals[M]. Beijing : Geological Publishing House , 1~1 112(in Chinese).
- Wang Liankui, Tan Mutao, Liu Shixian, *et al.* 2001. The Ore Control Condition and Metallogenic Prediction of Copper Gold Deposits in Wuchuan-Sihui Fault Zone[M]. Beijing : Geologocal Publishing House , 32~74(in Chinese with English abstract).
- Xu G and Lin X. 2000. Geology and geochemistry of the Changlongshan skarn iron deposit, Anhui Province, China[J]. Ore Geology Reviews , 16 : 91~106.
- Xu Lingang, Mao Jingwen, Yang Fuquan, *et al.* 2007. Skarn mineral characteristics of Mengku iron deposit in Xinjing and their geological significance[J]. Mineral Deposits , 26(4): 455~463(in Chinese with English abstract).
- Yao Lei, Xie Guiqing, Zhang Chengshuai, *et al.* 2012. Mineral characteristics of skarns in the Chengchao large-scale Fe deposit of southeastern Hubei Province and their geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica , 28(1): 133~146(in Chinese with English abstract).
- Yuan Zhengxin. 1995. The Gold(silver) Mineralization Control of Regional Structure in Yuexi Area and Adjacent Area[M]. Wuhan : China University of Geosciences Publishing House , 29~38(in Chinese).
- Zhang Shoulin. 2001. Metallogenic environment , geological characteristics and prospecting criteria of skarn copper deposits[J]. Mineral Resources and Geology , 15(85): 315~319(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zeming, Xiao Yilin, Shen Kun, *et al.* 2005. Garnet growth compositional zonation and metamorphic *P-T* path of the ultrahigh-pressure eclogites from the Sulu orogenic belt, eastern Central China[J]. Acta Petrologica Sinica , 21(3): 809~818(in Chinese with English abstract).
- Zhao Bin and Barton M D. 1987. Compositional characteristics of garnets and pyroxenes in contact metasomatic skarn deposits and their relations to mineralization[J]. Acta Mineralogica Sinica , 7(1): 1~8(in Chinese with English abstract).
- Zhao Haijie. 2010. The Mineralization Mechanism and Geochemistry of the Tonglushan skarn Cu-Fe deposit, Southeastern Hubei, China [J]. Beijing : A Dissertation Submitted to Chinese Academy of Geological Sciences for Doctoral Degree , 66~79(in Chinese with English abstract).
- Zhao Haijie, Xie Guiqing, Wei Ketao, *et al.* 2012. Skarn Mineral and Stable Isotopic Characteristics of Tonglushan Cu-Fe Deposit in Hubei Province [J]. Geological Review , 58(2): 379~395(in Chinese with English abstract).
- Zhao Jinsong and Newberry R J. 1996. Novel knowledge on the origin and mineralization of skarns from Shizhuyuan[J]. Acta Mineralogica Sinica , 16(4): 442~449(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yiming and Li Daxin. 2003. Amphiboles in Skarn Deposits of China[J]. Mineral Deposit , 22(4): 345~359(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yiming, Lin Wenwei, Bi Chengsi, *et al.* 1990. Skarn Deposits of China[M]. Beijing : Geological Publishing House , 164~171(in Chinese).
- Zhao Yiming, Lin Wenwei, Bi Chengsi, *et al.* 1997. The distribution and geological characteristics of auriferous skarn deposit, China [J]. Mineral Deposit , 16(3): 193~201(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zijie, Ma Daquan, Lin Huikun, *et al.* 1985. Rubidium-strontium and oxygen isotopic composition of granitoids in Yang-chun area, Guangdong Province and discuss on their origin[J]. Journal of the Chinese Academy of Yichang Geological Sciences , 10 : 89~98(in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhenhua, Liu Hongwei, Chang Guoxiong, *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 Mineralogical , 30(1): 97~112(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 艾永富. 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), 01: 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.
- 地矿部地矿司南岭铅锌矿专题组. 1985. 南岭地区铅锌矿床成矿规律[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 120~179.
- 冯守忠. 2008. 吉林正岔铅锌矿床地质特征及成矿机理[J]. 地质找矿论丛, 23(1): 16~21.
- 李大新, 丰成友, 赵一鸣, 等. 2011. 青海卡而却卡铜多金属矿床蚀变矿化类型及矽卡岩矿物学特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 41(6): 1818~1830.
- 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.
- 梁约翰, 张启富, 杨世义, 等. 1998. 云开隆起区成矿规律与成矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 1~10.
- 林文蔚, 赵一鸣, 蒋崇俊. 1990. 矽卡岩矿床中共生单斜辉石-石榴子石特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 9(3): 195~207.
- 马大铨, 赵子杰, 林惠坤. 1985. 广东阳春盆地岗尾-石碇型花岗岩类中包体的岩石特征及其成因[J]. 中国地质科学院宜昌地质矿产研究所所刊, 10: 59~72.
- 毛景文, 李红艳, Guy B, 等. 1996. 湖南柿竹园矽卡岩-云英岩型 W-Sn-Mo-Bi 矿床地质和成矿作用[J]. 矿床地质, 15(1): 1~14.
- 毛景文, 李红艳, 宋学信, 等. 1998. 湖南柿竹园钨锡钼铋多金属矿床地质与地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1~215.
- 毛景文, 谢桂青, 程彦博, 等. 2009. 华南地区中生代主要金属矿床模型[J]. 地质论评, 55(3): 347~354.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 2007. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景[J]. 岩石学报, 23(10): 2329~2338.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 2008. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境[J]. 高校地质学报, 14(4): 510~526.
- 彭少梅, 符力奋, 周国强. 1995. 云开地块构造演化及片麻状花岗质岩石的剪切深熔成因[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 80~159.
- 邵树勋, 张乾, 潘家永. 2000. 粤西地区花岗岩的地球化学特征及其与金银成矿的关系[J]. 矿物岩石地球化学通报, 4(19): 281~283.
- 司徒宏, 郑昌能, 黄德鑫. 2004. 天堂铜多金属矿地质特征与找矿前景[J]. 西部探矿工程, (5): 76~77.
- 王联魁, 覃慕陶, 刘师先, 等. 2001. 吴川-四会断裂带铜金矿控矿条件和成矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 32~74.
- 徐林刚, 毛景文, 杨富全, 等. 2007. 新疆蒙库铁矿床矽卡岩矿物学特征及其意义[J]. 矿床地质, 26(4): 455~463.
- 姚磊, 谢桂青, 张承帅, 等. 2012. 鄂东南矿集区程潮大型矽卡岩铁矿的矿物学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 28(1): 133~146.
- 袁正新. 1995. 粤西及其邻区的区域构造对金(银)成矿作用的控制[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 29~38.
- 张守林. 2001. 矽卡岩型铜矿成矿地质环境、成矿地质特征及找矿标志[J]. 矿产与地质, 15(85): 315~319.
- 张泽明, 肖益林, 沈昆, 等. 2005. 苏鲁超高压榴辉岩的石榴石生长成分环带及变质作用 P-T 轨迹[J]. 岩石学报, 21(3): 809~818.
- 赵斌, Barton M D. 1987. 接触交代夕卡岩型矿床中石榴子石和辉石成分特点及其与矿化的关系[J]. 矿物学报, 7(1): 1~8.
- 赵海杰. 2010. 湖北铜绿山夕卡岩型铜铁矿床地球化学及成矿机制[J]. 北京: 中国地质科学院博士论文, 66~79.
- 赵海杰, 谢桂青, 魏克涛, 等. 2012. 湖北大冶铜绿山铜铁矿床夕卡岩矿物学及碳氧硫同位素特征[J]. 地质论评, 58(2): 379~395.
- 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, 16(4): 442~449.
- 赵一鸣, 李大新. 2003. 中国夕卡岩矿床中的角闪石[J]. 矿床地质, 22(4): 345~359.
- 赵一鸣, 林文蔚, 毕承思, 等. 1990. 中国矽卡岩矿床[M]. 北京: 地质出版社, 164~171.
- 赵一鸣, 林文蔚, 毕成思, 等. 1997. 中国含金夕卡岩矿床的分布和主要地质特征[J]. 矿床地质, 16(3): 193~201.
- 赵子杰, 马大铨, 林惠坤, 等. 1985. 广东阳春地区两类花岗岩类的铷-锶、氧同位素组成及其成因探讨[J]. 中国地质科学院宜昌地质矿产研究所所刊, 第10号: 89~98.
- 中国地质科学院地质矿产所. 1977. 透明矿物显微镜鉴定表[M]. 北京: 地质出版社, 1~1112.
- 周振华, 刘宏伟, 常帼雄, 等. 2011. 内蒙古黄岗锡铁矿床夕卡岩矿物学特征及其成矿指示意义[J]. 岩石矿物学杂志, 30(1): 97~112.