

# 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

王 建<sup>1</sup>, 谢桂青<sup>2</sup>, 余长发<sup>3</sup>, 朱乔乔<sup>2</sup>, 李 伟<sup>2</sup>, 杨庆雨<sup>4</sup>

(1. 河北省地矿局探矿技术研究院, 河北 燕郊 065200; 2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037; 3. 核工业北京地质研究院遥感信息与图像分析技术国家级重点实验室, 北京 100029; 4. 中国黄金集团 鸡笼山金矿, 湖北 阳新 435232)

**摘要:** 鸡笼山金矿是长江中下游鄂东南地区典型的矽卡岩金矿床, 其矽卡岩矿物学特征研究较少。围岩为三叠纪大冶组灰岩和白云质灰岩, 决定了该矿床发育丰富的矽卡岩矿物组合, 主要包括石榴石、透辉石、硅灰石、绿帘石、金云母等。本文详细研究了不同阶段矽卡岩的矿物学特征, 并对其进行了电子探针分析(EMPA)。结果表明石榴石属于钙铝-钙铁系列, 辉石为透辉石, 以钙铁石榴石-透辉石共生的富金矽卡岩组合是在较高氧逸度和较低酸度条件下形成的, 具有铜金矿的成矿专属性。伴随着流体的演化, 矽卡岩与矿体在时空和成因上都具有密切的联系。结合矿区内发育有斑岩型矿体, 暗示鸡笼山金矿床可能具有统一的斑岩-矽卡岩型成矿系统, 深部具有很大的找矿潜力。

**关键词:** 矽卡岩, 矿物学, 鸡笼山金矿, 石榴石环带

中图分类号: P588.31<sup>+</sup>2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)01-0149-14

## Geological and skarn mineral characteristics of the Jilongshan skarn Au deposit in southeastern Hubei Province

WANG Jian<sup>1</sup>, XIE Gui-qing<sup>2</sup>, YU Zhang-fa<sup>3</sup>, ZHU Qiao-qiao<sup>2</sup>, LI Wei<sup>2</sup> and YANG Qing-yu<sup>4</sup>

(1. Institute of Prospecting Technology, Hebei Mine Bureau, Yanjiao 065200, China; 2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. National Key Laboratory of Remote Sensing Information and Image Analysis Technique, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 4. Jilongshan Au Mine of China National Gold Group, Yangxin 435232, China)

**Abstract:** The Jilongshan Au deposit is a typical skarn deposit in southeastern Hubei Province, but its skarn mineralogy research is insufficient. The Jilongshan skarn Au deposit is exposed within the dolomitic limestone of Triassic Daye Formation and the Yanshanian granodiorite porphyry. The metal minerals mainly include natural gold, chalcopyrite, pyrite, molybdenite, bornite, sphalerite, galena, orpiment, realgar, and magnetite, whereas the skarn minerals are mainly garnet, diopside, epidote, wollastonite and phlogopite. The authors studied in detail the skarn mineralogical characteristics of different stages and conducted the electron microprobe analysis (EMPA). The results show that the garnet belongs to the calcium And-Gro series, the pyroxene is diopside, and the calcium-iron garnet-diopside gold-rich skarn combination was formed under the condition of high oxygen fugacity and relatively low acidity, with copper, gold metallogenic specialization. Along with the fluid evolu-

收稿日期: 2013-04-07; 修订日期: 2013-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(41372090); 中央级公益性科研院所基本科研业务费资助项目(K1203); 国土资源部公益性行业课题(201311136, 200911007-18)

作者简介: 王 建(1985-), 男, 助理地质工程师, 矿床学专业, E-mail: beijingwangjian@163.com; 通讯作者: 谢桂青(1975-), 男, 研究员, 地球化学专业, E-mail: guiqingxie@sohu.com

tion, ore is associated with skarn in space, time and origin. In combination with the development of the porphyry ore body, the authors hold that the Jilongshan gold deposit may have a unified porphyry-skarn mineralization system, and there exists great prospecting potential in the depth.

**Key words:** skarn; mineralogy; Jilongshan Au deposit; oscillatory-zoning in garnets

矽卡岩金矿床具有重要的经济价值(赵一鸣等, 1990; Meinert, 1992; Meinert *et al.*, 2005), 我国是世界上矽卡岩矿床分布最广的国家之一, 其中矽卡岩金矿床占全国金矿总量的 20% (陈衍景等, 2004)。鸡笼山矽卡岩金矿床位于长江中下游 Cu-Fe-Au-Mo 多金属成矿带西段的鄂东南地区的丰山矿田, 大地构造位置处于扬子板块北缘的下扬子凹陷带内, 北与大别造山带相接(毛景文等, 2009), 是该区域内典型的矽卡岩金矿床。目前, 已有众多学者对鸡笼山金矿床的地球化学特征、物质来源、成矿模式等进行了较深入研究, 取得了重要进展(赵一鸣等, 1999; 闭忠敏等, 2008), 但是鸡笼山矽卡岩金矿床的矽卡岩矿物学特征及其演化规律等方面问题研究较为薄弱。矽卡岩和矿化之间在空间上大致重合, 时间上同时或相继形成, 有着密切的成因和地球化学联系, 因此矽卡岩中不同矿物的种属、组合、分布及成因等对于理解矽卡岩型矿床的成因及其形成环境具有重要的意义(赵一鸣等, 1990; Meinert *et al.*, 2005)。因此, 本文选取鸡笼山金矿床为研究对象, 通过对其矽卡岩矿物学特征研究来揭示其矽卡岩的形成过程和成矿机制。

## 1 成矿地质背景

长江中下游地区位于扬子板块以北和大别造山带以南(图 1)。鄂东南地区地处长江中下游成矿带西端, 是长江中下游成矿多金属成矿带重要的组成部分(谢桂青等, 2006; 毛景文等, 2009; Mao *et al.*, 2011; 瞿泓滢等, 2012)。鄂东南地区地层从志留系到第四系均有出露, 各时代地层发育较为完整, 以三叠纪大冶组碳酸盐、蒲圻组碎屑岩和白垩纪-沉积岩分布广泛; 区内主要含矿地层为三叠纪大冶组的灰岩和白云质灰岩。该地区构造十分发育, 构造线总体呈(NW)NW向, 西部撒开, 东部收敛, 褶皱构造主要为近 EW 向, 断裂构造主要分为 NE-NNE 和 NW-NWW 向两组; 其中区内 Cu-Au 矿田主要受 NW-NWW 向阳新-瑞昌深大断裂及 NE-NNE 向郧庐深大断裂联合控制(舒广龙, 2004)。鄂东南地区岩浆活动频繁, 岩体多是燕山期壳幔混源型的中酸性侵入岩, 多呈岩株、岩脉状, 其中燕山中期(135~163 Ma)是区内岩浆活动的鼎盛时期, 约 80% 的岩浆侵入体在此期侵位(翟裕生等, 1992; Xie

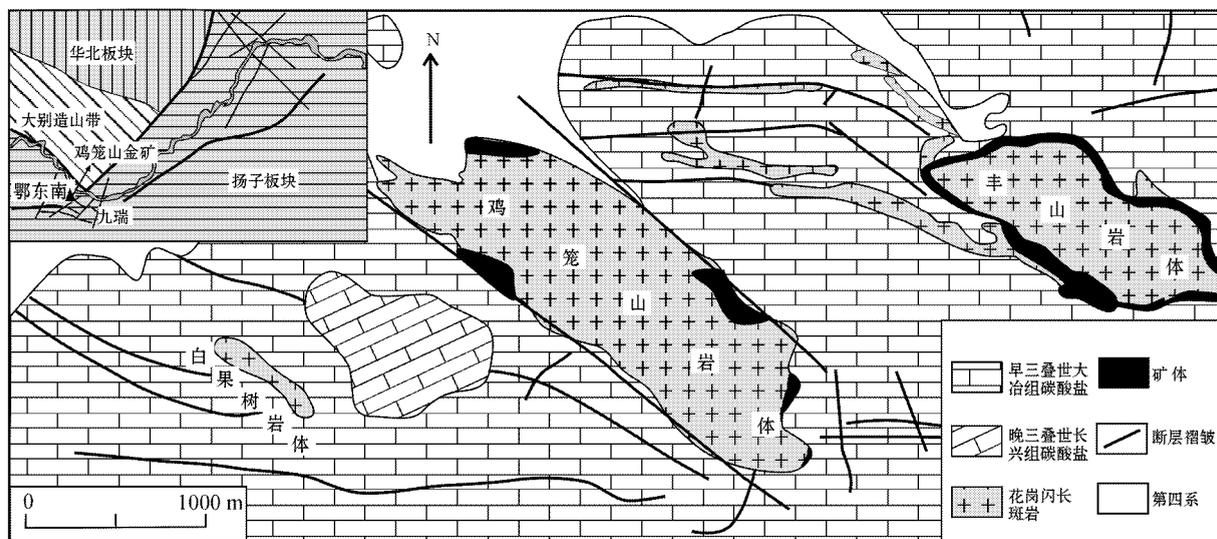


图 1 丰山矿田地质简图(舒广龙, 2004)

Fig. 1 Geological map of the Fengshan ore field (after Shu Guanglong *et al.*, 2004)

*et al.*, 2007; *Li et al.*, 2009; 谢桂青等, 2009; *Xie et al.*, 2011; 徐耀明等, 2012) 相关侵入岩主要为二长辉长岩、石英二长闪长岩、花岗闪长岩和石英二长岩以及相应的浅成相, 其中与 Cu-Au 成矿有关的以闪长质岩石最为重要。该地区矿产资源丰富, 矿床类型主要可以分为三种: 矽卡岩型 Fe 矿床, 如程潮、金山店、铁山 Fe(Cu) 矿, 矽卡岩型 Cu 矿床, 如铜绿山 Cu(Fe) 矿、丰三洞 Cu(Mo) 矿、铜山口 Cu(Mo) 矿, 矽卡岩型 Au 矿床, 如鸡笼山 Au(Cu) 矿、鸡冠嘴 Au(Cu) 矿。其中丰山矿田主要由东部的丰山洞大型斑岩-矽卡岩型 Cu 矿床、西部的鸡笼山大型矽卡岩 Au(Cu) 矿床和北部的李家湾中型矽卡岩 Au(Cu) 矿床等组成, 丰山矿田内成岩成矿作用有从南东向北西方向演化的趋势, 构成一个与燕山期花岗闪长斑岩有关的斑岩型 Cu(Mo) 矿化、矽卡岩型 Cu 矿床、矽卡岩型 (Cu)Au 矿床和矽卡岩型 Au-Cu 矿床组成的 Cu-Au(Mo) 成矿系列(不同类型矿体)(赵一鸣等, 1999)。

## 2 矿床地质特征

鸡笼山金矿床金储量 44.1 吨、平均品位 3.80 g/t; 大小矿体众多, 主要以 I、II 两个 Au-Cu 矿体为主, 占总储量的 80% 以上, 其他矿体多是沿接触带呈北西向分布的小矿体。金铜矿体沿鸡笼山花岗闪长斑岩体的北缘和南缘接触带成带状分布。矿区中出露的地层主要有三叠纪大冶组灰岩和白云质灰岩, 其中大冶组灰岩和白云质灰岩为主要赋矿围岩; 围

岩化学成分以 CaO 为主, MgO 含量相对较少, 从而决定了该矿床是以石榴石和透辉石矿物组合为主的钙矽卡岩型矿床。矿区构造(图 2)复杂, 主要构造为竹林塘倒转向斜、鸡笼山翻转背斜和柯家塘倒转背斜等, 多呈 NW-NWW 向断裂且为切割较深的区域性断裂, 产状大多向南陡倾, 是该区的主要控岩控矿构造。矿区内鸡笼山岩体(图 2)呈岩株和岩脉产出, 属钙碱性花岗岩类岩石系列, 有同期多次侵入花岗闪长斑岩、闪长玢岩组成; 与成矿关系密切的是花岗闪长斑岩, 斑晶一般为角闪石、斜长石和黑云母。矿体主要赋存于岩体边部和围岩的接触带及其附近。矿体在空间位置上与岩体紧密相关, 矿体的形状、产状和膨大富集部位在一定程度上均受岩体形态的制约(王译华, 2008)。

鸡笼山矽卡岩金矿床围岩蚀变强烈, 主要有矽卡岩化、钾化、硅化、碳酸盐化等。矽卡岩及其围岩常遭受强烈的退化蚀变作用, 发生诸如绿帘石化、阳起石化、绿泥石化、硅化、碳酸盐化等, 形成各类热液交代岩, 并伴生铜、金和多金属矿化。矿石的矿物成分较复杂, 金矿物主要以自然金、银金矿、金银矿等形式存在。伴生的金属矿物最常见的为黄铜矿, 可形成工业品位; 次为黄铁矿、辉钼矿、斑铜矿、闪锌矿、方铅矿、雌黄、雄黄、磁铁矿等; 因此富集 Cu、S、As、Ag、Pb、Zn、Co、Se 等元素可成为该矿床的重要地球化学找矿标志(赵一鸣等, 1999); 非金属矿物除矽卡岩矿物及退化蚀变矿物之外, 还有石英、方解石等。矿石矿物结构主要为中-细粒结构、自形-半自形结构、交代残余结构、填隙结构和假像结构等; 矿

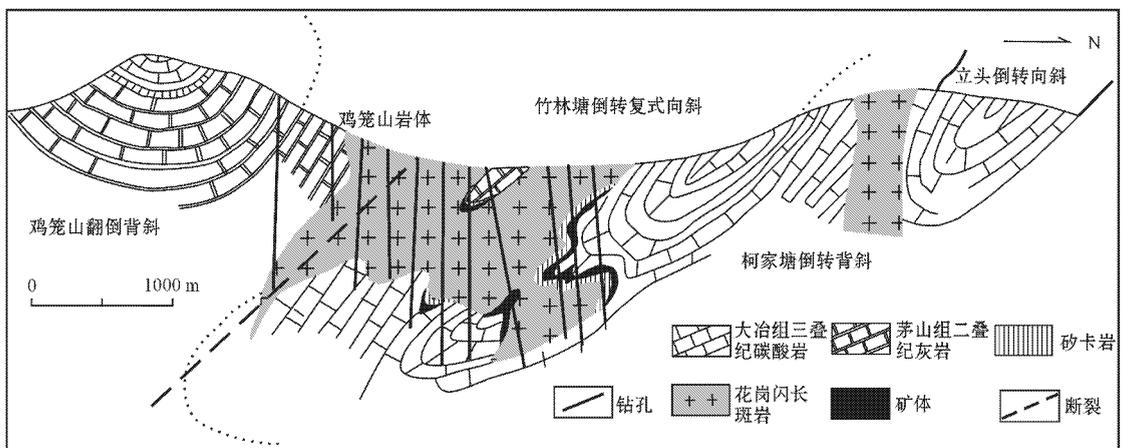


图 2 鸡笼山矽卡岩金矿床控岩控矿构造图(底图据王译华, 2008)

石构造主要有块状构造、浸染状构造、网脉状构造和角砾状构造等。矿石类型据脉石矿物的组成及矿石构造可分矽卡岩型、大理岩型、块状硫化物型、斑岩型和角砾岩型五大类(闭忠敏等,2008)。矿床中的矿石矿物组合主要有黄铁矿-金矿石、黄铁矿-黄铜矿-金矿石、方铅矿-闪锌矿-金矿石或雌黄-雄黄-金矿石等矿物组合。黄铁矿-金矿石(图 3a、3d)主要为自然金,辉钼矿、黄铜矿伴生,呈细脉状产于斑岩岩体中;黄铁矿-黄铜矿-金矿石(图 3b、3g)主要是

铜金共生矿体,主要呈块状、浸染状、脉状产于矽卡岩带内;部分呈角砾状产于角砾岩带的基质中(图 3c);方铅矿-闪锌矿-金矿石(图 3f、3i)和雌黄-雄黄-金矿石(图 3e、3h)主要是多金属硫化物金矿石,呈细脉状产于矽卡岩带和白云质灰岩围岩中。根据脉体相互穿插关系、矿物组合、生成顺序及成矿温度,可将鸡笼山金矿的蚀变矿化阶段划分为:矽卡岩阶段、退化蚀变阶段、(石英)-硫化物阶段和碳酸盐。

各阶段矿物生成顺序见表 1。

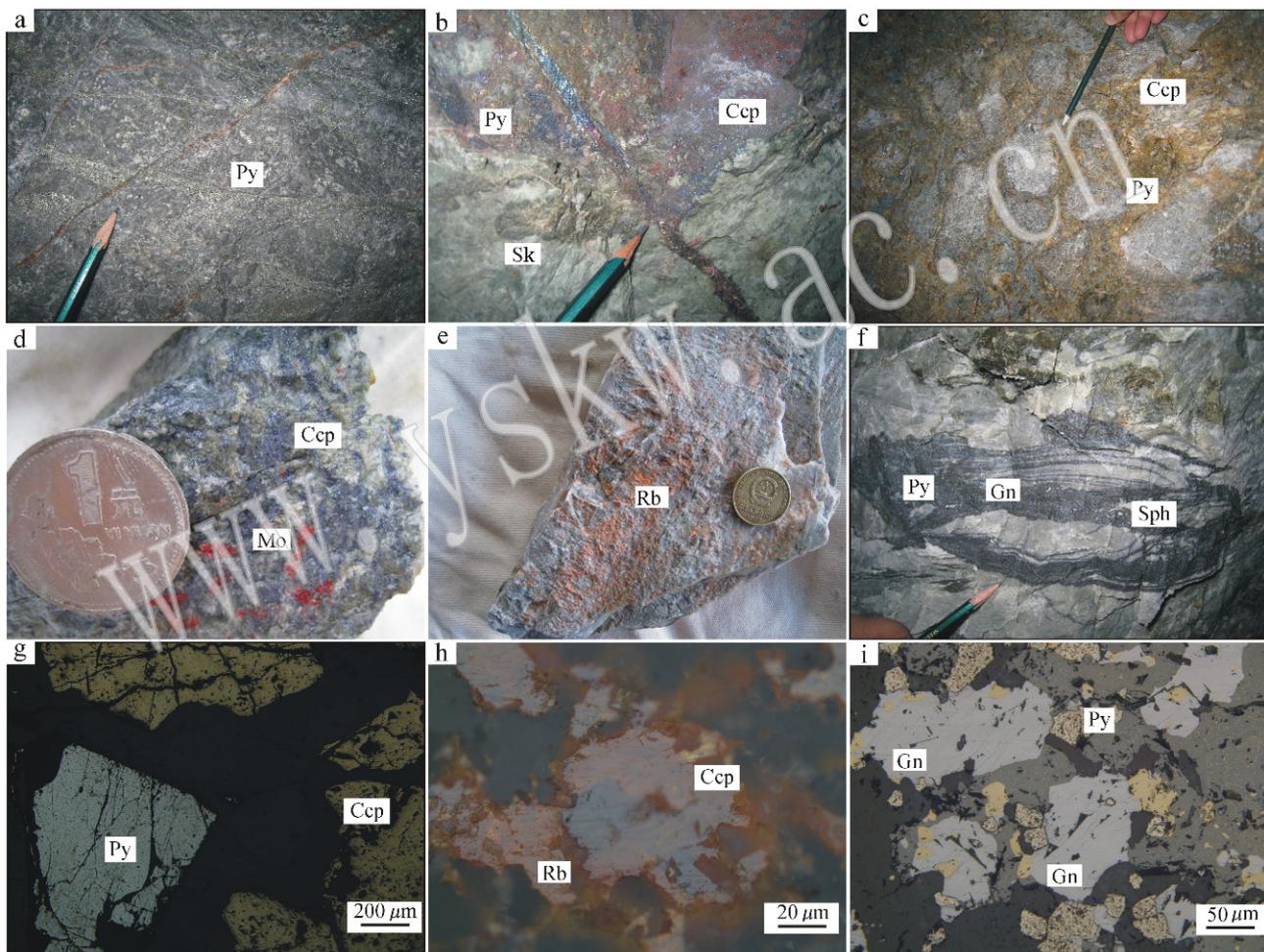


图 3 鸡笼山金矿典型矿石类型及金属矿物

Fig. 3 Typical ore types and metallic minerals of the Jilongshan Au deposit

a—黄铁矿(Py)-金矿石,产于岩体; b—黄铜矿(Ccp)-金矿石,产于矽卡岩; c—黄铜矿(Ccp)-金矿石,产于角砾岩; d—辉钼矿(Mo)-黄铜矿(Ccp)-金矿石,产于岩体; e—雌黄(Rb)-金矿石,产于地表围岩; f—闪锌矿(Sp)-方铅矿(Gn)-金矿石,产于围岩; g—黄铜矿(Ccp)-黄铁矿(Py)共生,反射光; h—黄铜矿(Ccp)-雌黄(Rb)共生,反射光; i—黄铜矿(Ccp)-方铅矿(Gn)共生,反射光

a—pyrite (Py)-gold ore, produced in the rock mass; b—chalcopyrite (Ccp)-gold ore, produced in the skarn; c—chalcopyrite (Ccp)-gold ore, produced in the breccia; d—molybdenite (Mo)-chalcopyrite (Ccp)- gold ore, produced in the rock mass; e—realgar (Rb)-gold ore, produced in the surface country rock; f—sphalerite (Sp)-galena (Gn)-gold ore, produced in the country rock, under reflective light; g—chalcopyrite (Ccp) associated with pyrite (Py), under reflective light; h—chalcopyrite (Ccp) associated with orpiment (Op), under reflective light; i—chalcopyrite (Ccp) associated with galena (Gn), under reflective light

表 1 鸡笼山金矿床矿物生成顺序表

Table 1 Generalized generation sequence diagram of the Jilongshan Au deposit

阶段 矿物	矽卡岩 阶段	退化蚀 变阶段	(石英)-硫化 物阶段	碳酸岩 阶段
硅灰石	■			
透辉石	■			
石榴石	■			
透闪石		■		
阳起石		■		
绿帘石		■		
金云母		■		
磁铁矿		■		
辉钼矿			■	
石英			■	
自然金			■	
黄铁矿			■	■
黄铜矿			■	
斑铜矿			■	
方铅矿			■	
闪锌矿			■	
雌黄				■
雄黄				■
绿泥石			■	
方解石				■

### 3 矽卡岩矿物学特征

鸡笼山金矿床石榴石、透辉石、硅灰石、绿帘石、角闪石和金云母等矽卡岩矿物十分发育,且常常与自然金、黄铜矿等矿石矿物共生,说明矽卡岩在空间上和成因上与成矿有着密切的联系。在矿区内挑选不同空间位置具有代表性的样品,对其中形成于不同阶段的矽卡岩矿物,在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室进行电子探针分析,使用仪器型号为 JXA-8230 型,测试加速电压为 15 kV,电流为 20 nA,束斑 5  $\mu\text{m}$ 。各阶段生成的主要矽卡岩矿物学特征如下:

#### 3.1 矽卡岩阶段

主要生成石榴石、透辉石、硅灰石等矽卡岩矿物(图 4a、4b),这些矿物十分发育且主要分布于岩体与围岩的接触带,矽卡岩阶段矿化不发育。

##### 3.1.1 石榴石

石榴石分布广泛,是最重要的矽卡岩矿物之一。多呈褐色,单偏光下主要呈浅褐色、浅绿色,正高-极

高正突起,糙面明显,切面多呈六边形;正交偏光下有异常干涉色,可达 I 级灰,粒径大多小于 3 mm,多为自形-半自形、中-细粒结构,粒度大小不一,说明石榴石结晶的时间相对较长,环带结构发育;常与透辉石、硅灰石等共生,被金属硫化物沿裂隙充填,常见绿帘石化(图 4g、4k),硅化和碳酸盐化等(图 4f、4h、4k)。

石榴石电子探针分析结果见表 2,组分变化图见图 5。可见,鸡笼山矽卡岩金矿床中石榴石以钙铁榴石为主,其次为钙铝榴石,其他端员组分含量较低,属钙铁榴石-钙铝榴石系列( $\text{Ad}_{33-95}\text{Gr}_{4-66}$ ) (图 6a);与世界上典型的矽卡岩金矿床和铜矿床的石榴石组分具有相似的分布区间(Meinert *et al.*, 2005)。石榴石在内接触带较为发育,从内带到外带,石榴石含量有下降趋势,可能被后期退化蚀变交代,颜色上有从褐色到浅绿色的转变,钙铝榴石逐渐减少,钙铁榴石逐渐增加(图 5),这种变化同鄂东南地区矽卡岩型铜铁矿床相类似(赵海杰, 2010; 姚磊等, 2012)。

##### 3.1.2 辉石

辉石主要以透辉石为主,多呈绿色或暗绿色,高正突起,有弱多色性;正交偏光下可见鲜艳的 II 级黄、绿等干涉色,粒径一般在 0.04~0.25 mm 之间,多呈不规则粒状或短柱状、自形-半自形结构,具有辉石式解理,常见后期退化蚀变现象,多与石榴石、硅灰石等共生,多见于外接触带。

辉石分析结果(表 3)表明:鸡笼山金矿辉石的透辉石端员组分变化范围在  $\text{Di}_{40-96}\text{Hd}_{4-60}$ ,钙铁辉石为  $\text{Di}_{42-96}\text{Hd}_{4-58}$ ,锰钙辉石含量较低,属于典型的透辉石-钙铁辉石固溶体系列( $\text{Di}_{40-96}\text{Hd}_{4-58}$ ) (图 6b);与世界上典型的矽卡岩金矿床的辉石具有极其相似的特征(Meinert *et al.*, 2005)。矽卡岩矿床辉石的成分与围岩关系比较密切,由岩体到围岩向外,辉石的透辉石含量有上升的趋势。

##### 3.1.3 硅灰石

硅灰石是矽卡岩阶段形成的重要无水硅酸盐矿物,粒径一般在 0.2 mm 左右,多呈长柱状、放射状(图 4c),多与石榴石、辉石等矿物共生,局部位置含量较高,可形成以硅灰石矽卡岩。电子探针分析结果(表 4)表明:鸡笼山金矿的硅灰石组份主要有  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$  和少量的  $\text{FeO}$ 、 $\text{MnO}$  等,少量的 Fe、Mn 等元素以类质同像形式代替 Ca。野外观察和镜下研究发现,硅灰石多与透辉石共生,产于矿化作用相对

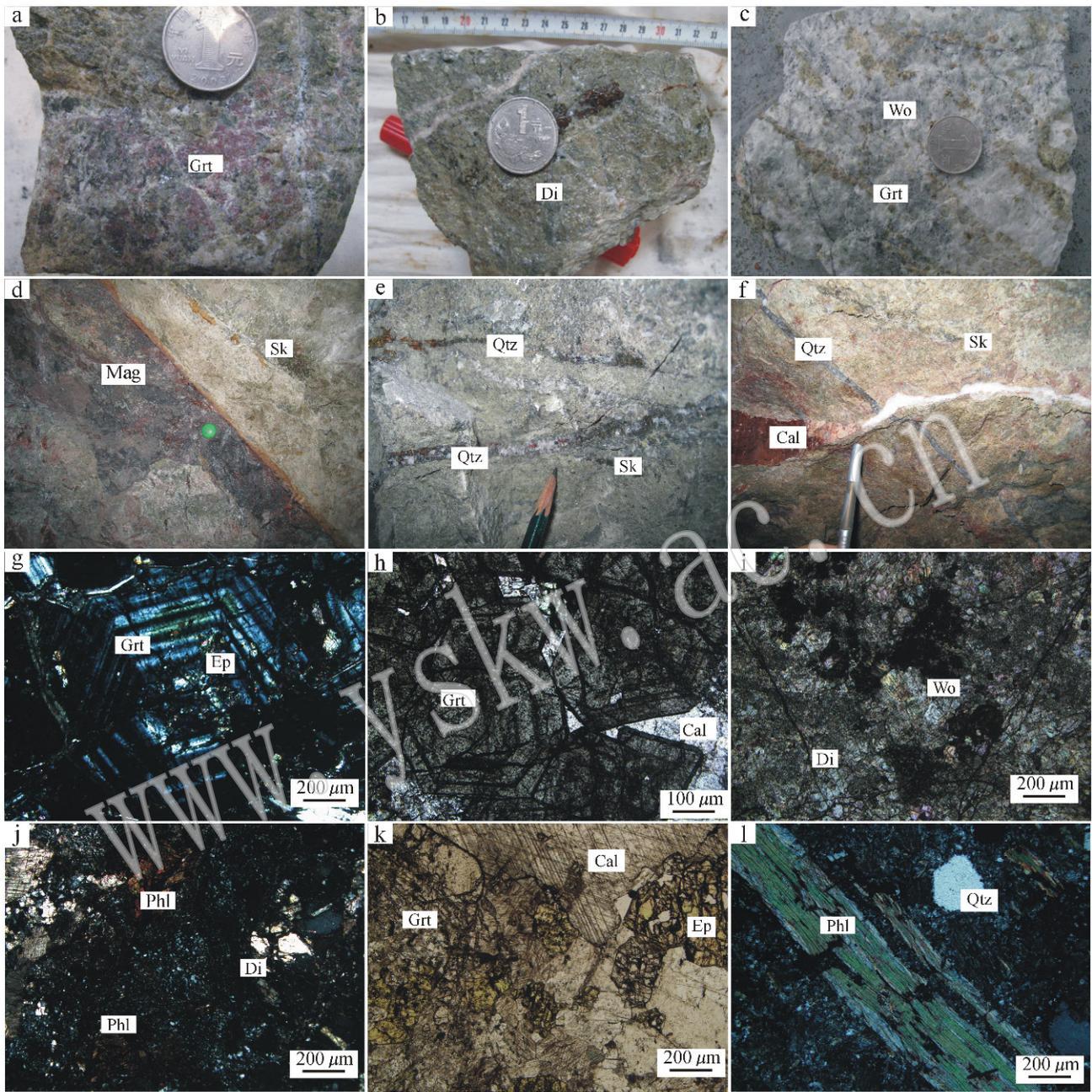


图4 鸡笼山砂卡岩金矿床典型的砂卡岩矿物类型和退化蚀变矿物

Fig. 4 Typical skarn minerals and degradation altered minerals of the Jilongshan Au deposit

a—石榴石(Grt)砂卡岩; b—透辉石(Di)砂卡岩; c—硅灰石(Wo)砂卡岩; d—脉状磁铁矿(Mag)穿插砂卡岩(Sk); e—石英(Qtz)硫化物穿插砂卡岩(Sk); f—石英(Qtz)硫化物脉穿插砂卡岩(Sk),再被后期方解石(Cal)脉切割; g—绿帘石(Ep)交代石榴石(Grt),正交偏光; h—方解石(Cal)脉充填在石榴石(Grt)裂隙间,单偏光; i—透辉石(Di)与硅灰石(Wo)共生,单偏光; j—金云母(Phl)蚀变,正交偏光; k—绿帘石(Ep)交代石榴石(Grt),单偏光; l—黑云母蚀变为绿泥石(Chl),正交偏光

a—garnet (Grt) skarn; b—diopside (Di) skarn; c—wollastonite (Wo) skarn; d—vein magnetite (Mag) cutting through skarn; e—quartz (Qtz) sulfide veins cutting through skarn; f—quartz (Qtz) sulfide veins cutting through skarn, late calcite (Cal) veins cutting; g—epidote (Ep) replacing garnet (Grt), under transmitted light; h—calcite (Cal) filling in garnet (Grt) fissure, under transmitted light; i—diopside (Di) associated with wollastonite (Wo), under transmitted light; j—phlogopite (Phl) alteration, under transmitted light; k—epidote (Ep) replacing garnet (Grt), under transmitted light; l—biotite altered into chlorite (Chl), under transmitted light

表 2 鸡笼山砂卡岩金矿床代表性石榴石电子探针分析结果

 $\omega_B/\%$ 

Table 2 Representative electron microprobe analyses of garnets from the Jilongshan Au deposit

样品号	WJ116	WJ117	WJ198	WJ242	WJ243	WJ244	WJ248	WJ256	WJ329	WJ332
SiO <sub>2</sub>	36.47	36.25	37.3	37.25	37.11	36.49	38.11	37.68	37.59	37.83
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.63	0.69	5.05	1.79	1.04	1.75	14.51	7.26	3	6.94
FeO	26.76	27.93	22.1	26.31	27.17	25.95	10.11	19.22	24.35	20.79
MgO	0.08	0.02	0.06	0.32	0.25	0.07	0.1	0	0.08	0
CaO	33.77	34.16	33.61	33.8	33.66	33.95	35.49	34.65	34.57	34.9
Na <sub>2</sub> O	0.08	0.02	0	0	0.05	0	0.01	0	0	0.02
K <sub>2</sub> O	0	0	0.02	0	0.02	0	0.01	0	0	0
MnO	0.08	0.22	0.16	0.24	0.21	0.18	0.49	0.2	0.12	0.26
TiO <sub>2</sub>	0.08	0	0.1	0	0	0	0.16	0.28	1.03	0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04	0.02	0.02	0.04	0.03	0	0	0.03	0.05	0.05
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0.04	0.13	0.07	0.02	0	0	0.03	0.04	0.01
NiO	0	0	0.03	0	0.02	0	0.01	0.02	0	0
Total	98.99	99.37	98.55	99.82	99.56	98.39	98.99	99.36	100.83	100.81
以 12 个氧原子为基准计算的阳离子数										
Si	3	2.99	3.03	3.03	3.03	3.01	2.98	3.01	3.01	3
Ti	0	0	0.01	0	0	0	0.01	0.02	0.06	0
Al	0.16	0.07	0.48	0.17	0.1	0.17	1.34	0.68	0.28	0.65
Cr	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0
Fe <sup>3+</sup>	1.84	1.92	1.48	1.79	1.86	1.79	0.66	1.29	1.63	1.35
Fe <sup>2+</sup>	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0.02
Mn	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02
Mg	0.01	0	0.01	0.04	0.03	0.01	0.01	0	0.01	0
Ca	2.98	3.02	2.93	2.94	2.95	3	2.98	2.97	2.96	2.96
And	92.08	95.15	75.12	89.46	93.11	88.88	32.86	64.65	81.97	67.59
Gro	7.31	4.11	23.26	8.48	5.34	10.42	65.67	34.8	17.28	30.99
Spe + Pyr	0.60	0.74	1.62	2.06	1.55	0.70	1.47	0.56	0.74	1.42

注: And—钙铁榴石, Gro—钙铝榴石, Py—镁铝榴石, Spe—锰铝榴石, 0 为低于检测限; 分析精度为 0.0 n%; FeO 为 TFe; 分析者: 陈小丹、海东婧。

较弱部位, 而其化学成分中 Fe、Mg、Mn 含量较低, 一方面可能是由理想晶体结构 Ca<sub>3</sub>(Si<sub>3</sub>O<sub>9</sub>) 造成的; 另一方面可能与初始流体演化至后期, 导致形成硅灰石的流体本身 Fe、Mg、Mn 的含量相对较低有关。

### 3.2 退化蚀变阶段

该阶段主要包括角闪石、金云母(图 4j)、绿帘石(图 4g)、绿泥石(图 4l)等矿物; 其中区内绿帘石交代石榴石现象(图 4g、4k)较为多见, 该阶段矿物多充填交代砂卡岩期矿物, 部分退化蚀变岩呈脉状穿切早期砂卡岩(图 4d)。

#### 3.2.1 角闪石

角闪石呈墨绿色, 自形—半自形、中—粗粒结构, 多呈长柱状, 粒度一般在 0.06~1.5 mm 之间, 可见明显的两组解理, 其产出位置多靠近花岗岩岩体, 主要是钙角闪石, 其多在退化蚀变岩中分布广泛。

#### 3.2.2 绿帘石

绿帘石主要形成于退化蚀变岩阶段, 一般产于内砂卡岩带, 但是含量相对较少。绿帘石呈草绿色, 薄片呈黄绿色, 呈团块状充填在石榴石颗粒间(图 4g、4k), 可能是石榴石退化蚀变的结果。

#### 3.2.3 金云母

金云母多呈淡绿、深绿色, 薄片无色至浅褐色, 细鳞片状、集合体呈放射状。粒径较小, 半透明, 玻璃光泽, 镜下具绿色的多色性, 一组极完全解理。绝大多数金云母与磁铁矿共生(图 4d), 时间上与磁铁矿近于同时形成。电子探针分析结果(表 5)表明: 金云母的镁值 Mg/(Mg+Fe+Mn+Ti) 为 0.50 偏低, 在化学成分上, 与中国其他砂卡岩型矿床, 如大冶铁山、铜绿山及福建马坑等的金云母相比(赵一鸣等, 1990; 赵海杰, 2010), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量略低, TFeO 含量较高。

### 3.3 (石英)硫化物阶段

矿区内最主要的成矿阶段, 主要生成石英、自然

表 3 鸡笼山砂卡岩金矿床代表性辉石电子探针分析结果

$w_B/\%$

Table 3 Representative electron microprobe analyses of clinopyroxenes from the Jilongshan Au deposit

样品号	WJ195	WJ196	WJ197	WJ198	WJ247-1	WJ247-2	WJ326-1	WJ326-2	WJ330	WJ331
SiO <sub>2</sub>	52.18	52.96	49.11	53.77	53.87	54.27	55.63	55.29	55.35	52.92
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.49	1.28	0.38	1.18	0.88	0.62	0.18	0.84	0.27	1.02
FeO	11.62	8.64	17.2	6.19	5.13	6.1	1.31	1.94	5.84	11.57
MgO	10.29	12.52	6.68	14.28	14.71	14.1	18.08	17.13	14.63	11.73
CaO	24.05	23.28	22.71	22.85	24.94	25.2	26.07	25.9	25.6	22.97
Na <sub>2</sub> O	0.28	0.79	0.4	0.09	0.21	0.12	0.07	0.01	0.11	0.86
K <sub>2</sub> O	0.02	0	0.01	0.02	0.01	0	0	0	0.01	0
MnO	0.4	0.37	0.48	0.61	0.52	0.5	0.1	0.04	0.27	0.33
TiO <sub>2</sub>	0.02	0.47	0	0.04	0.11	0	0.05	0	0	0.17
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03	0.03	0.03	0.04	0.01	0.03	0.05	0.03	0	0.02
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.07	0.08	2.52	0.02	0.02	0.01	0.03	0.04	0	0.04
NiO	0	0	0.01	0	0.02	0.05	0	0	0.01	0.04
Total	99.45	100.43	99.51	99.09	100.42	101	101.58	101.22	102.08	101.65

以 6 个氧原子为基准计算的阳离子数

Si	2	1.97	1.95	2	1.98	1.99	1.99	1.99	2.01	1.97
Al <sup>IV</sup>	0	0.03	0	0	0.02	0.01	0	0.01	0	0.03
Al <sup>VI</sup>	0.02	0.03	0	0.05	0.02	0.02	0	0.02	0.01	0.02
Ti	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0
Cr	0	0	0.08	0	0	0	0	0	0	0
Fe <sup>3+</sup>	0	0.03	0.06	0	0.01	0	0.02	0	0	0.09
Fe <sup>2+</sup>	0.37	0.23	0.51	0.19	0.15	0.19	0.02	0.06	0.18	0.27
Mn	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0	0	0.01	0.01
Mg	0.59	0.7	0.39	0.79	0.81	0.77	0.96	0.92	0.79	0.65
Ca	0.99	0.93	0.96	0.91	0.98	0.99	1	1	0.99	0.92
Na	0.02	0.06	0.03	0.01	0.02	0.01	0	0	0.01	0.06
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Di	61	72	4	79	82	79	96	94	81	64
Hd	38	27	58	19	16	19	4	6	18	35
Jo	1	1	2	2	2	2	0	0	1	1

注:Di—透辉石, Hd—钙铁辉石, Jo—锰钙辉石, 0 为低于检测限; 分析精度为 0.0 n%; FeO 为 TFe; 分析者: 陈小丹, 海东婧。

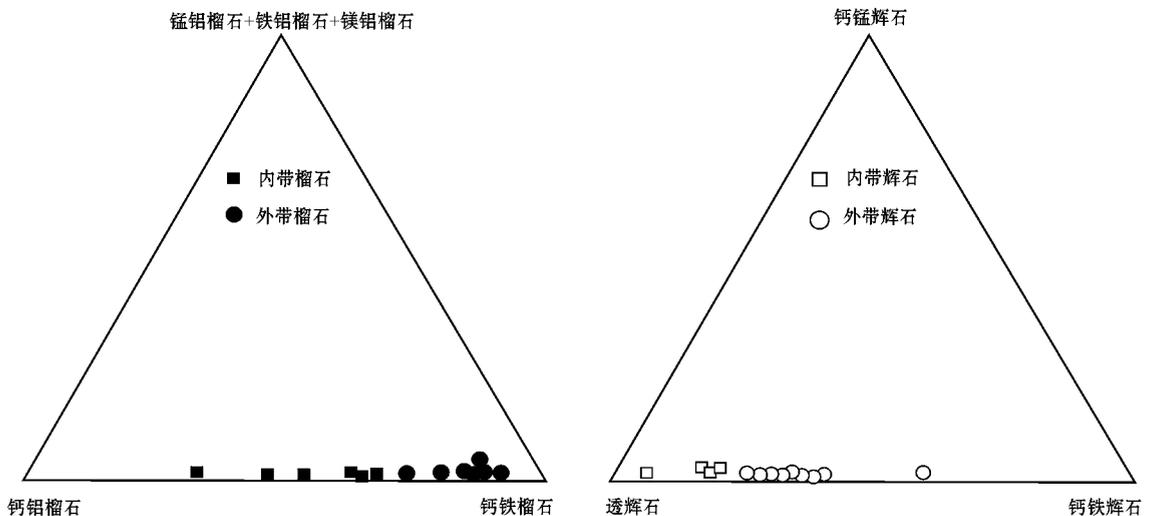


图 5 鸡笼山砂卡岩金矿床内带到外带(从岩体、砂卡岩到围岩)石榴石、辉石的组分变化

Fig. 5 Change of composition of garnets, pyroxenes from endoskarn to exoskarn (from rock mass, skarn to wall rock) in the Jilongshan skarn Au deposit

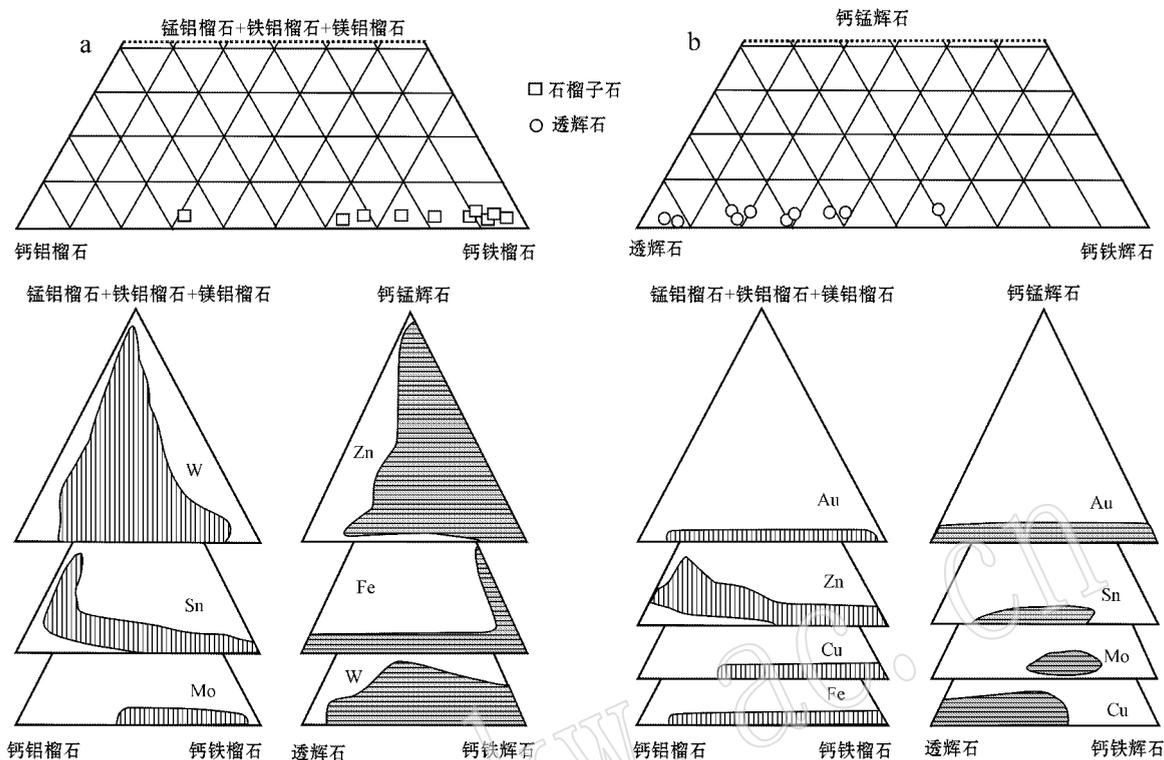


图 6 鸡笼山砂卡岩金矿床石榴石(a)、辉石(b)的成分组成及与世界砂卡岩型矿床的石榴子石、辉石成分对比 (底图据 Meinert 等, 2005)

Fig. 6 Compositional plot of garnets (a), pyroxenes (b) of the Jilongshan Au deposit in comparison with other skarn deposits in the world (after Meinert *et al.*, 2005)

金、黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿、斑铜矿、方铅矿、闪锌矿、雌黄、雄黄等硫化物。在砂卡岩中形成块状、浸染状、脉状(图 4e) Cu-Au 共生矿体。斑岩岩体和围岩中多呈脉状产出多金属 Au 矿体。该阶段大量出现石英硫化物脉,其穿插早期砂卡岩现象多见,然后又被更晚期的方解石脉穿插(图 4f),标志着该矿床成矿作用已经基本结束。

## 4 讨论

### 4.1 砂卡岩成因与成矿的关系

砂卡岩矿物的研究在砂卡岩矿床中占有重要地位(Einaudi *et al.*, 1981, 1982),是砂卡岩矿床定义及分类的基础。砂卡岩矿物组合的研究可对其形成环境提供大量的指示信息(Meinert *et al.*, 2005),可以作为揭示砂卡岩形成过程中物理化学条件(氧逸度、酸碱度等)变化的重要依据。

镜下鉴定和探针分析数据显示:鸡笼山砂卡岩金矿床在早期流体作用下大量形成钙铁榴石、透辉

石(图 4h),该共生组合暗示该时期流体呈低酸度和高氧逸度的特点(梁祥济, 1994; 赵一鸣等, 1997; Oyman, 2010);与石榴石中  $Ca^{2+}$  有类质同像关系的  $Fe^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Mn^{2+}$  含量甚微,按照矿物离子配位理论,半径较小的  $Mn^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  比半径较大的  $Ca^{2+}$  配位时所需压力依次增大,说明该矿床以  $Ca^{2+}$  为主的钙铁-钙铝榴石系列在压力相对较小的情况下形成。随着流体演化,矿化作用相对较弱部位出现硅灰石多与透辉石(图 4i)的矿物共生组合,而其化学成分(表 4)中 Fe、Mg、Mn 含量较低反映该时期流体本身这些元素的含量较低或受其自身晶体结构影响。

砂卡岩型矿床中石榴石常具有振荡环带结构,这种环带的成分变化反映了水岩反应特征并能对热液流体的演化过程提供重要的信息(Jamtveit *et al.*, 1993; Crowe *et al.*, 2001; Smith *et al.*, 2004)。鸡笼山砂卡岩金矿床区内的石榴石环带(图 3g)结构发育,其核部成分均一,而边部环带结构明显,说明形成边部的外界条件与核部有所不同,而且相对晚于

表 4 鸡笼山矽卡岩金矿床代表性硅灰石电子  
探针分析结果  $w_B/\%$

Table 4 Representative electron microprobe analyses  
of sillimanite from the Jilongshan Au deposit

样品号	WJ116	WJ243	WJ244-1	WJ244-2
SiO <sub>2</sub>	51.18	52.91	52.43	52.69
TiO <sub>2</sub>	0	0	0	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0	0	0
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0	0.01	0
FeO	0.07	0.62	0.19	0.27
NiO	0	0	0	0
MgO	0	0.12	0.06	0.09
MnO	0.42	0.57	0.34	0.42
CaO	48.12	47.4	48.42	47.95
Na <sub>2</sub> O	0.05	0	0.03	0
K <sub>2</sub> O	0.03	0	0	0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.04	0.04	0.03
Total	99.94	101.65	101.51	101.45
以 9 个氧原子为基准计算的阳离子数				
Si	1.98	2.01	2	2
Ti	0	0	0	0
Al	0	0	0	0
Cr	0	0	0	0
Fe <sup>2+</sup>	0	0	0	0
Ni	0	0.02	0.01	0.01
Mg	0	0	0	0
Mn	0	0	0	0
Ca	0.02	0.03	0.02	0.02
Na	2	1.93	1.98	1.95
K	0	0	0	0
P	0	0	0	0
W <sub>o</sub>	98.52	97.29	98.57	98.27
En	1.19	1.62	0.96	1.2
Fs	0.1	1.08	0.36	0.53

注: 0 表示低于检测限; 分析精度为 0.0 n%, FeO 为 TFe; 分析者: 陈小丹, 海东婧。

核部而形成, 其成分变化明显, 可能是由石榴石的再生长而实现的。电子探针数据(表 6)显示, 钙铁榴石和钙铝榴石两个端员成分含量呈交替变化(图 7), Fe<sup>3+</sup>、Al<sup>3+</sup>含量的变化是造成环带结构的主要元素, 不同环带的成分的变化与石榴石环带的明暗变化相一致, 也与石榴石中 FeO<sup>T</sup> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量具有相反的变化趋势相对应, 表明石榴石在结晶生长的过程中流体成分及物理化学环境是动态变化的。

随着流体演化, 大量的矽卡岩矿物(石榴石、透辉石等)开始被一系列退化蚀变矿物(绿帘石、角闪石、金云母等)交代(图 4d、4g、4k)。该阶段绿帘石发育广泛, 可见绿帘石交代石榴石(图 4g、4k)的现象。绿帘石中富 Fe<sup>3+</sup> 也暗示了进一步演化的流体具

有较高的氧逸度。同时该阶段后期形成磁铁矿等氧化物沿裂隙穿插(图 4d)交代前期形成的矽卡岩, 表明该阶段流体具有较高的氧逸度。流体演化至后期, 随着物理化学环境的变化, 流体中大量的 SO<sub>2</sub>、HCl 等从液相分离出来进入气相(Candela and Piccoli, 1995), 形成独立的挥发相, 导致以 F、Cl、S 等络合物形式搬运的含 Au 多金属石英硫化物脉穿插早期矽卡岩(图 3b、5e、5f), 发生大规模沉淀形成矿体。

#### 4.2 矽卡岩对成矿环境的指示意义

矽卡岩形成过程中的氧化还原环境和成矿流体的酸碱度对形成不同矿化类型的矽卡岩型矿床具有重要的作用。很多学者认为, 矽卡岩的氧化还原条件能够根据石榴石和辉石的成分来判定: 还原环境常常形成钙铝榴石和钙铁辉石, 矽卡岩具有较高的 Fe<sup>2+</sup>/Fe<sup>3+</sup> 比值, 氧化环境常常形成钙铁榴石和富镁的透辉石, 矽卡岩具有较低的 Fe<sup>2+</sup>/Fe<sup>3+</sup> 比值(Sato, 1980; Einaudi *et al.*, 1981; 梁祥济, 1994; Lu *et al.*, 2003; Oyman, 2010)。

中国不同矽卡岩矿床类型的石榴石、辉石成分有所差别(赵一鸣等, 1990), 如: 矽卡岩型铁、铜、金矿床的辉石主要为透辉石和次透辉石, 锰钙辉石分子含量很低, 共生的石榴石一般为钙铁榴石, 含钼矽卡岩型矿床的辉石主要为透辉石和次透辉石, 石榴石属钙铁榴石和钙铝榴石的过渡种属, 钙铝榴石的分子含量相对较高, 达 32%~83%。矽卡岩铅锌矿床则以含有大量锰质辉石为特征, 石榴石以钙铁榴石为主。

鸡笼山矽卡岩金矿床区内出露大量的钙铁榴石和透辉石, 以及含量较少的钙铁辉石, 石榴石为钙铁榴石, 且常见透辉石和钙铝榴石共生, 表明富金矽卡岩主要是在较高氧逸度和较低酸度条件下形成的, 暗示了矿区内的矽卡岩可能形成于一种氧化环境。鸡笼山矽卡岩金矿床矿物共生组合区以钙铁榴石、透辉石为主的典型特征, 可以推断鸡笼山金矿的矽卡岩矿物具有铜、金矿的成矿专属性; 同时, 该矿床深部 - 440 m 中段符合辉石以透辉石为主, 石榴石属过渡种属, 含钼矽卡岩矿床具有钙铝榴石含量高的特征, 说明该矿床深部有钼矿成矿潜力。

Meinert(1992)指出在氧化环境下有利于形成与斑岩有关的大型矽卡岩型铜金矿, 同时 Qin 等(1998)、De Hoog 等(2004)、李金祥等(2006)、Sillitoe(2010)、李光明等(2011)等的研究显示, 氧化的环境

表 5 鸡笼山砂卡岩金矿床代表性金云母电子探针分析结果

 $\omega_B/\%$ 

Table 5 Representative electron microprobe analyses of phlogopites from the Jilongshan Au deposit

样品号	WJ196	WJ331	CC207-2-2	CC208-0-1	CC210-0-2	CC210-1-2	CC210-2-1
SiO <sub>2</sub>	34.09	35.01	38.53	37.5	35.37	37.64	37.38
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.67	14.08	16.55	16.78	19.22	18.47	18.72
FeO	19.64	17.26	7.73	5.85	6.55	5.23	3.56
MgO	13.51	13.98	21.23	21.42	21.33	22.07	22.93
CaO	0.72	0.11	0.1	0	0.05	0	0
Na <sub>2</sub> O	0.2	0.17	0.11	0.16	0.11	0.19	0.26
K <sub>2</sub> O	5.5	7.52	10.71	10.6	9.34	10.75	10.82
MnO	0.63	0.22	0.1	0.06	0	0.07	0.02
TiO <sub>2</sub>	0	0.01	0.25	0.18	0.17	0.16	0.07
Total	93.19	93.2	95.41	92.62	92.65	94.81	93.77
以 22 个氧原子为基准计算的阳离子数							
Si	3.04	3.07	2.79	2.77	2.62	2.71	2.7
Al <sup>IV</sup>	0.96	0.93	1.21	1.23	1.38	1.29	1.3
Al <sup>VI</sup>	0.58	0.53	0.2	0.24	0.3	0.28	0.29
Ti	0.91	0.92	0.01	0.01	0.01	0.01	0
Fe <sup>3+</sup>	0.91	0.92	0.01	0	0.02	0	0
Fe <sup>2+</sup>	0	0	0.46	0.36	0.38	0.32	0.22
Mn	0.05	0.02	0.01	0	0	0	0
Mg	1.8	1.83	2.29	2.36	2.36	2.37	2.47
Ca	0.07	0.01	0.01	0	0	0	0
Na	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04
K	0.63	0.84	0.99	1	0.88	0.99	1
Total	8.97	9.1	7.99	8	7.98	8	8.02

注:WJ 数据来自本文;CC 数据来自姚磊等(2012);0 表示低于检测限;分析精度为 0.0 n%,FeO 为 TFe;分析者:陈小丹,海东婧。

表 6 鸡笼山砂卡岩金矿床代表性石榴石环带电子探针分析结果

 $\omega_B/\%$ 

Table 6 Representative electron microprobe analyses of oscillatory zoning in garnets from the Jilongshan Au deposit

样品号	WJ329-1	WJ329-2	WJ329-3	WJ329-4	WJ329-5	WJ332-1	WJ332-2	WJ332-3	WJ332-4	WJ332-5
SiO <sub>2</sub>	38.53	37.5	37.13	38.28	37.7	38.28	38.09	36.62	38.1	37.55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.79	6.4	5.79	11.22	6.39	9.28	9.17	4.01	6.94	4.53
FeO	14.31	21.2	21.22	14.94	20.33	17.28	16.34	23.96	19.83	23.36
MgO	0.03	0.04	0	0.03	0.17	0	0	0.05	0.01	0
CaO	35.25	35.02	34.91	34.88	33.56	35.28	35.17	33.96	34.74	34.48
Na <sub>2</sub> O	0	0	0	0	0	0	0.04	0.04	0	0
K <sub>2</sub> O	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0.01	0
MnO	0.26	0.21	0.05	0.33	0.13	0.11	0.13	0.1	0.2	0.02
TiO <sub>2</sub>	0.64	0.17	0.04	0.13	0.41	0	0.89	0	0.06	0.17
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0	0.03	0.03	0	0	0	0.03	0.04	0
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0.01	0.04	0.04	0.37	0	0.01	0.01	0	0
NiO	0.06	0.01	0.02	0.02	0.04	0	0.03	0	0	0
Total	99.89	100.56	99.23	99.89	99.1	100.22	99.86	98.79	99.93	100.11
以 12 个氧原子为基准计算的阳离子数										
Si	3.02	2.98	3	3	3.03	3.01	3.01	2.99	3.03	3.01
Ti	0.04	0.01	0	0.01	0.02	0	0.05	0	0	0.01
Al	1	0.6	0.55	1.04	0.61	0.86	0.85	0.39	0.65	0.43
Cr	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0
Fe <sup>3+</sup>	0.94	1.4	1.43	0.95	1.34	1.13	1.08	1.62	1.32	1.56
Fe <sup>2+</sup>	0	0	0	0.03	0.03	0.01	0	0.02	0	0.01
Mn	0.02	0.01	0	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0
Mg	0	0.01	0	0	0.02	0	0	0.01	0	0
Ca	2.96	2.98	3.02	2.93	2.89	2.97	2.97	2.97	2.96	2.96
And	47.2	70.06	71.08	47.77	68	56.8	54.23	80.69	66.52	78.42
Gro	52.11	29.1	28.67	50.3	28.84	42.76	45.45	18.16	32.99	21.15
Ura	0	0.03	0.13	0.11	1.18	0	0.03	0.04	0	0
Spe+Pyr	0.69	0.83	0.25	1.93	3.15	0.44	0.32	1.15	0.49	0.42

注:And—钙铁石榴石,Gro—钙铝石榴石,Pyr—镁铝石榴石,Spe—锰铝石榴石;0 为低于检测限;分析精度为 0.0 n%;FeO 为 TFe;分析者:陈小丹、海东婧。

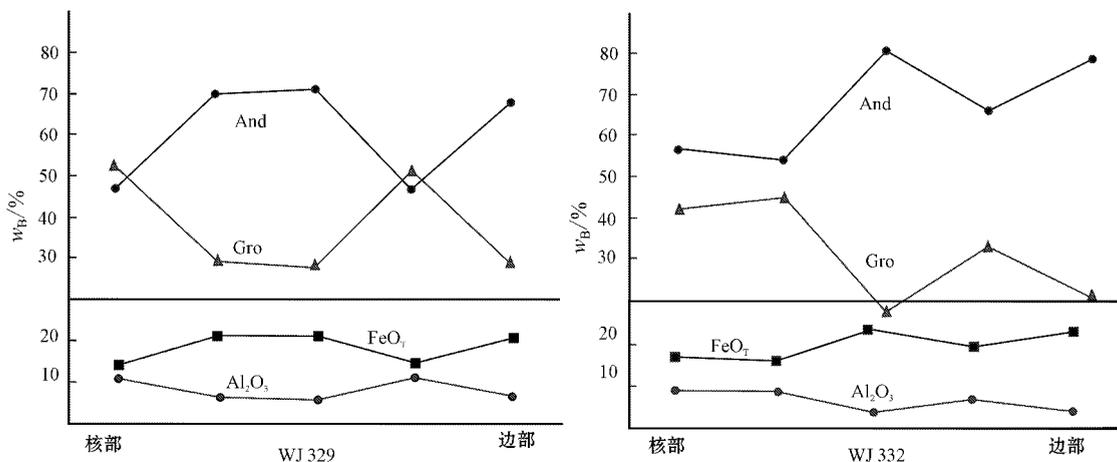


图 7 鸡笼山矽卡岩金矿床石榴石颗粒环带成分的变化

Fig. 7 Composition of the oscillatory-zoning in garnets of the Jilongshan Au deposit

Gro—钙铝榴石; And—钙铁榴石

Gro—grossularite; And—andradite

下同样也有利于大型斑岩铜金矿的形成。结合矿区内在 -90 m 中段到深部的 -490 m 中段都有少量呈脉状产出的斑岩型铜金矿体,暗示鸡笼山矽卡岩金矿床可能具有统一的斑岩型-矽卡岩型成矿系统。

## 5 结论

(1) 鸡笼山矽卡岩金矿床的石榴石属于钙铝-钙铁系列,辉石为透辉石,主要矽卡岩矿物成分与世界上其它矽卡岩矿床基本一致。伴随着流体的演化,矽卡岩与矿体在时空和成因上都具有密切的联系。

(2) 以钙铁榴石-透辉石共生的富金矽卡岩组合是在较高氧逸度和较低酸度条件下形成的,具有成铜、金矿的成矿专属性,其中石榴石环带特征也反映了流体成矿环境的动态变化。结合矿区内发育有斑岩型矿体,暗示它们可能具有统一的斑岩型矽卡岩型成矿系统,深部具有很大的找矿潜力。

致谢 野外地质工作期间得到了中国黄金集团鸡笼山金矿总工杨庆雨、地测部部长熊伟及地质组王昆、谢涛、徐立奎等同志的大力支持和帮助;中国地质科学院矿产资源研究所陈振宇老师、陈小丹老师在论文实验过程中给予了热情的指导和帮助;审稿专家给论文提出了许多建设性的意见,在此一并致以谢忱!

## References

- Bi Zhongmin and Yang Song. 2008. Geological mineral resources ' characteristics , matters ' sources and metallogenic mechanism of the Jilongshan skarn-host Au (Cu) deposit [ J ]. Mineral Resources and Geology , 22 ( 6 ) : 496 ~ 502 ( in Chinese with English abstract ).
- Candela P A and Piccoli P L. 1995. Model ore-metal partitioning from melt into vapor and vapor/brine mixtures [ A ]. Thompson J F H. Magmas , Fluids and Ore Deposits [ C ]. Mineralogical Association of Canada Short Course Handbook , 23 : 101 ~ 127.
- Chen Yanjing , Chen Huayong , ZAW K , et al. 2004. The Geodynamic setting of large-scale metallogenesis in Mainland China , exemplified by skarn type gold deposit [ J ]. Earth Science Frontiers , 11 ( 1 ) : 57 ~ 82 ( 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.
- De Hoog J C M , Hattori K H and Hoblitt R P. 2004. Oxidized sulfur-rich mafic magma at Mount Pinatubo , Philippines [ J ]. Contributions to Mineralogy and Petrology , 146 : 750 ~ 761.
- Einaudi M T and Burt D M. 1982. Introduction-terminology , classification and composition of skarn deposit [ J ]. Economic Geology , 77 : 745 ~ 754.
- Einaudi M T , Meinert L D and Newberry R J. 1981. Skarn deposits [ J ]. Economic Geology , 75th Anniversary Volume , 317 ~ 391.
- Jamtveit B , Wogelius R A and Fraser D G. 1993. Zonation patterns of skarn garnets : records of hydrothermal system evolution [ J ]. Geology ,

21 : 113~116.

- Li Guangming , Qin Kezhang , Chen Lei , *et al.* 2011. The metallogenic model of Eocene skarn Cu-Mo-W( Au ) deposits in the Eastern section of Gangdese , Southern Tibet and its implication for ore-search towards the deep subsurface[ J ]. *Geology and Prospecting* , 7 : 20~31( in Chinese with English abstract ).
- Li J W , Zhao X F , Zhou M F , *et al.* 2009. Late Mesozoic magmatism from Daye region , Eastern China : U-Pb ages , petrogenesis and geodynamic implications[ J ]. *Contrib. Mineral. Petrol.* , 157 : 383~409.
- Li Jinxiang , Qin Kezhang and Li Guangming. 2006. Basic characteristics of gold-rich porphyry copper deposits and their ore sources and evolving processes of high oxidation magma and ore-forming fluid[ J ]. *Acta Petrologica Sinica* , 22( 3 ) : 678~688( 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 ).
- Lu H Z , Liu Y M , Wang C L , *et al.* 2003. Mineralization and fluid inclusion study of Shizhuyuan W-Sn-Bi-Mo-F skarn deposit , Hunan Province , China[ J ]. *Econ. Geol.* , 98 : 955~974.
- Mao Jingwen , Shao Yongjun , Xie Guiqing , *et al.* 2009. Mineral deposit model for porphyry-skarn polymetallic copper deposits in Tongling ore dense district of Middle-Lower Yangtze Valley metallogenic belt[ J ]. *Mineral Deposits* , 28( 2 ) : 109~119( in Chinese with English abstract ).
- Mao J W , Xie G Q , Duan C , *et al.* 2011. 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 : 294~314.
- Meinert L D , Dipple G M and Niculescu S. 2005. World skarn deposits [ A ]. Hedenquist J W , Thompson J F H , Goldfarb R J , *et al.* *Economic Geology 100th Anniversary Volume* [ C ]. Society of Economic Geologists , 299~336.
- Meinert L D. 1992. Skarns and Skarn Deposits[ M ]. *Geosci. Canada* , 19 : 145~162.
- Oyman T. 2010. Geochemistry , mineralogy and genesis of the Ayazmant Fe-Cu skarn deposit in Ayvalik , ( Balikesir ) , Turkey[ J ]. *Ore Geology Reviews* , 37 : 175~200.
- Qin K Z and Shunso Ishihara. 1998. On the possibility of porphyry copper mineralization in Japan[ J ]. *International Geology Review* , 40 ( 6 ) : 539~551.
- Qu Hongying , Wang Haolin , Pei Rongfu , *et al.* 2012. Zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic constraints on petrogenesis of Tieshan and Jinshandian plutons in the southeastern Hubei Province [ J ]. *Acta Petrologica Sinica* , 28( 1 ) : 147~165( in Chinese with English abstract ).
- Sato. 1980. Tungsten skarn deposit of the Fujigatani mine , Southwest Japar[ J ]. *Econ. Geol.* , 75 : 1 066~1 082.
- Shu Guanglong. 2004. Hubei fengshan ore fields geologic background, Porphyry metallogenic series and Metallogenic micro disseminated type gold deposit[ D ]. Hunan : Central South University( in Chinese with English abstract ).
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems[ J ]. *Econ. Geol.* , 105 : 3~41.
- Simth M P , Henderson P , Jeffries T E R , *et al.* 2004. The Rare earth elements and uranium in garnet from the Beinn an Dubhaich aureole , Skye , EH , Scotland , UK : Constrains on progecess in a dynamic hydrothermal system[ J ]. *Journal of Petrology* , 45 : 457~484.
- Wang Zehua. 2008. Geology and prospecting of Jilongshan gold-copper deposit in the Eastern Hubei Provenc[ J ]. *Geology and Prospecting* , 44( 5 ) : 17~22( in Chinese with English abstract ).
- Xie G Q , Mao J W , Li R L , *et al.* 2007. Re-Os molybdenite and Ar-Ar phlogopite dating of Cu-Fe-Au-Mo( W ) deposits in southeastern Hubei , China[ J ]. *Mineralogy and Petrology* , 90( 3~4 ) : 249~270.
- Xie G Q , Mao J W , Zhao H J. 2011. Zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic constraints on petrogenesis of Late Mesozoic intrusions in the southeast Hubei Province , Middle-Lower Yangtze River belt ( MLYRB ) , East Chin[ J ]. *Lithos* , 125 : 693~710.
- Xie Guiqing , Mao Jingwen , Li Ruiling , *et al.* 2006. Metallogenic epoch and geodynamic framework of Cu-Au-Mo( W ) deposits in South-eastern Hubei Province : Constraints from Re-Os molybdenite ages [ J ]. *Mineral Deposits* , 25( 1 ) : 43~50( in Chinese with English abstract ).
- Xie Guiqing , Zhao Haijie , Zhao Caisheng , *et al.* 2009. Re-Os dating of molybdenite from Tonglùshan ore district in southeastern Hubei Province , Middle-Lower Yangtze River belt and its geological significance[ J ]. *Mineral Deposits* , 28( 3 ) : 227~239( in Chinese with English abstract ).
- Xu Yaoming , Jiang Shaoyong , Zhu Zhiyong , *et al.* 2012. Geochronology , geochemistry and mineralization of the quartz diorite-porphyrity and granodiorite porphyry in the Shanshangwan area of the Jiurui ore district Jiangxi Prvince[ J ]. *Acta Petrologica Sinica* , 28( 10 ) : 3 306~3 324( 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 south-eastern Hubei Province and their geological significance[ J ]. *Acta Petrologica Sinica* , 28( 1 ) : 133~146( in Chinese with English abstract ).
- Zhai Yusheng , Yao Shuzhen , Lin Xinduo , *et al.* 1992. Iron-Copper( Gold ) Mineralization Regularity of The Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Region[ M ]. Beijing : Geological Publishing House , 1~120( in Chinese ).
- Zhao Haijie. 2010. Geochemistry and Metallogenic Mechanism of

- Tonglvshan skarn copper-iron deposit in Hubei Province[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 66~85( in Chinese with English abstract ).
- Zhao Yiming, Lin Wenwei, Bi Cheng'en, et al. 1990. China Skarn Deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House, 164~171( in Chinese ).
- Zhao Yiming, Zhang Yinan, Bi Cheng'en, et al. 1999. Tectonic environment and geological geochemical Evaluation Criteria of Au bearing skarn deposits[J]. Mineral Deposits, 18(1):181~193( in Chinese ).
- Zhao Yiming, Zhang Yinan, Lin Wenwei, et al. 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 ).
- ### 附中文参考文献
- 闭忠敏, 杨松. 2008. 鸡笼山矽卡岩(铜)矿床地质矿产特征、物质来源及成矿机制研究[J]. 矿产与地质, 22(6):496~502.
- 陈衍景, 陈华勇, ZAW K, 等. 2004. 中国陆区大规模成矿的地球动力学:以矽卡岩金矿床为例[J]. 地学前缘, 11(1):57~82.
- 李光明, 秦克章, 陈雷, 等. 2011. 冈底斯东段山南地区第三纪矽卡岩-斑岩 Cu-Mo-W(Au)多金属矿床勘查模型深部找矿意义[J]. 地质与勘探, 47:20~31.
- 李金祥, 秦克章, 李光明. 2006. 富金斑岩型同矿床的基本特征、成矿物质来源与成矿高氧化岩浆-流体演化[J]. 岩石学报, 22(3):678~688.
- 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.
- 毛景文, 邵拥军, 谢桂青, 等. 2009. 长江中下游成矿带铜陵矿集区铜多金属矿床模型[J]. 矿床地质, 28(2):109~119.
- 瞿泓滢, 王浩琳, 裴荣富, 等. 2012. 鄂东南地区与铁山和金山店铁矿有关的花岗质岩体 LA-ICP-MS 年和 Hf 同位素组成及其地质意义[J]. 岩石学报, 28(1):147~165.
- 舒广龙. 2004. 湖北丰山矿田成矿地质背景及斑岩成矿系列与微细浸染型金矿[D]. 湖南:中南大学.
- 王泽华. 2008. 鄂东鸡笼山金铜矿床成矿地质特征及找矿前景分析[J]. 地质与勘探, 44(5):17~22.
- 谢桂青, 毛景文, 李瑞玲, 等. 2006. 鄂东南地区 Cu-Au-Mo-(W)矿床的成矿时代及其成矿地球动力学背景探讨:辉钼矿 Re-Os 同位素年龄[J]. 矿床地质, 25(1):43~50.
- 谢桂青, 赵海杰, 赵财胜, 等. 2009. 鄂东南铜绿山矿田矽卡岩型铜铁金矿床的辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 28(3):227~239.
- 徐耀明, 蒋少涌, 朱志勇, 等. 2012. 九瑞矿集区山上湾矿区石英闪长玢岩和花岗闪长斑的年代学、地球化学及成矿意义[J]. 岩石学报, 28(10):3306~3324.
- 姚磊, 谢桂青, 张承帅, 等. 2012. 鄂东南矿集区程湖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.
- 霍裕生, 姚书振, 林新多, 等. 1992. 长江中下游地区铁(金)成矿规律[M]. 北京:地质出版社, 1~120.
- 赵海杰. 2010. 湖北铜绿山矽卡岩型铜铁矿床地球化学及成矿机制[D]. 中国地质科学院, 66~85.
- 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, 张铁男, 毕承思. 1999. 含金矽卡岩矿床产出构造环境和地质地球化学评价标志[J]. 矿床地质, 18(1):181~193.
- 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.