



编号: 0258-7106(2010)06-0999-18

安徽贵池铜山矽卡岩型铜矿床蚀变矿化分带特征及其成因*

张智宇¹ 杜杨松¹ 张 静¹ 庞振山² 李大鹏¹ 贾鹏飞¹

(1 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 地球科学与资源学院, 北京 100083;

2 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037)

摘 要 铜山矽卡岩型铜矿床产于长江中下游铁铜成矿带中的安庆—贵池矿集区。研究区矽卡岩化与矿化发生于碳酸盐岩地层与花岗闪长斑岩间的接触带中, 蚀变及矿化具有水平与垂向分带特征。水平方向上, 靠近岩体的矽卡岩中石榴子石含量较高, 远离岩体的矽卡岩中透辉石含量较高; 靠近大理岩带发育钙铁辉石矽卡岩, 远离大理岩带的灰岩硅化较强。垂向上, 从上到下依次为角岩带、钙质矽卡岩带和镁质矽卡岩带。矿物成分研究表明, 靠近岩体处氧化性较强, 石榴子石的钙铁榴石端员含量高, 铜多富集于含石英脉的岩体、距岩体略远的矽卡岩、角岩或大理岩中, 而锌多富集于硅化灰岩及远离岩体的矽卡岩中。研究表明, 该矿床中蚀变矿化经历了进变期和退变期, 包括接触热变质阶段、进化交代阶段和早退化蚀变阶段、晚退化蚀变阶段。其中, 大规模的黄铜矿化主要发生于早退化蚀变阶段, 且在岩浆演化晚期进一步富集于斑岩石英脉中。

关键词 地质学, 矽卡岩, 蚀变矿化分带, 流体, 交代, 铜山铜矿

中图分类号: P618.41

文献标志码: A

Alteration and mineralization zoning in Tongshan skarn-type copper deposit in Guichi, Anhui Province, and its genesis

ZHANG ZhiYu¹, DU YangSong¹, ZHANG Jing¹, PANG ZhenShan², LI DaPeng¹ and JIA PengFei¹

(1 State Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources, School of the Earth Sciences and Resources, China

University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 Development Research Center, China Geological Survey,

Beijing 100037, China)

Abstract

The Tongshan skarn-type copper deposit is located in the Anqing-Guichi ore concentration area along the lower and middle Yangtze River reaches iron-copper metallogenic belt. In the study area, skarnization and mineralization occur in the contact zone between carbonate and granodiorite porphyry. Alteration and mineralization show significant horizontal and vertical zoning characteristics. In horizontal zoning, the garnet content of skarns near the pluton is high, the diopside content of skarns far from the pluton is high, and the hedenbergite content of skarns near the marble is also high. The limestone far away from the marble experienced strong silicification. In vertical zoning, hornfels, calcareous skarn and magnesian skarn occur in downward succession. Mineralogical studies show that the skarn zone near the pluton has been relatively strongly oxidized and the garnet in it has rel-

* 本研究得到长江中下游地区矽卡岩型矿床成矿规律总结及成矿机制研究项目(20089938)和高等学校学科创新引智计划(B07011)资助

第一作者简介 张智宇,男,1983年生,博士生,矿物学、岩石学、矿床学专业。Email:sapphire2006@163.com

收稿日期 2010-04-16;改回日期 2010-10-30。张绮玲编辑。

atively high And (andradite end-member). Cu is concentrated in such bodies as porphyries with quartz veins, skarns a bit far from the pluton, and hornfels or marbles, while Zn is usually abundant in silicified limestones and skarns far from the pluton. Studies suggest that the alteration and mineralization of the Tongshan ore deposit experienced the prograde period and the retrograde period. The former period could be divided into the contact metamorphic stage and the prograde metasomatic stage, and the latter into the early retrograde stage and the late retrograde stage. Copper mineralization mainly took place at the early retrograde stage, and was further concentrated in quartz veins of the porphyries during the late stage of magmatic evolution.

Key words: geology, skarn, zoning of alteration and mineralization, fluid, replacement, Tongshan copper deposit

矽卡岩矿床是具有重要工业意义的矿床类型,与之相关的矿产有铁、钨、铜、铅、锌、钼、银、金、铀、稀土元素、氟、硼和锡(Meinert et al. 2005)。其中,矽卡岩型铜矿床被认为是世界上最丰富的矽卡岩矿床类型(Calagari et al., 2006),如印度尼西亚的Ertsberg、秘鲁的Antamina,其矽卡岩铜资源量居全球前列。矽卡岩矿床作为地学研究的热点始于20世纪60年代对矽卡岩类型的划分,如反应矽卡岩(Vidale, 1969)、类矽卡岩(Zharikov, 1970)、交代矽卡岩(Hietanen, 1962)。近年来,研究者对矽卡岩矿床的岩石矿物组合、结构构造、元素地球化学、成岩成矿年龄、流体包裹体等进行了大量研究(Singoyi et al., 2000; Karimzadeh et al., 2002; Ciobanu et al., 2003; Zhou et al., 2005; 梅燕雄等, 2005; Grammatikopoulos et al., 2006; Zuo et al., 2008; Dai et al., 2008),认为多数矽卡岩包括一套较特殊的钙、镁、铁、锰、铝硅酸盐矿物组合,记录了从岩浆、高温气成热液到中低温热液交代作用的许多成因信息。矽卡岩型矿床的成因类型(郑建民等, 2007; 程顺波等, 2008; 王星等, 2008; 夏元法, 1999)主要有接触交代型、热液充填交代型、矿浆贯入型、层控型等。另外,对接触交代型矽卡岩的演化过程存在多种划分方法(Hellingwerf, 1984; Calagari et al., 2006),常见的有矽卡岩期-石英硫化物期、气液期-热液期、进化矽卡岩期-退化矽卡岩期等,进化矽卡岩期-退化矽卡岩期是近年国际上使用较多的划分,更能体现矽卡岩成岩成矿不同阶段的叠加性及物理化学条件变化。目前,通过对矽卡岩岩相学的研究来厘定成岩成矿阶段尚显不足,这限制了对矽卡岩型矿床成因机制的认识和成矿预测。

长江中下游地区是中国铜(金)、铁矿产资源的重要产地,其中多位一体的铜矿床是环太平洋成矿带内特有的一类大型、超大型矿床(马振东等,

1997)。安徽铜山是长江中下游矽卡岩型铜铁成矿带中的重要代表之一(李立平等, 1994; Liu et al., 2009),已有学者对其展开多方面的研究,如周余谔等(1996)、周曙光(2003)、俞沧海(2001)对铜山铜矿床元素地球化学进行了较深入的研究,认为成矿物质来源具有多源性;俞沧海等(1999)、周余谔(1997)对铜山岩体演化与成矿的关系进行了研究;王勇(2003)对铜山铜矿床构造控矿进行了论述;Qiu(1991)论述了矿床中多期次碳酸盐化蚀变作用与成矿关系。这些研究显示铜山矽卡岩型铜矿床成矿过程的复合性与复杂性。然而“该区含铜矽卡岩在时间上是如何演化的,铜矿化于何时发生?水平及垂向矽卡岩分带及矿化特征如何,黄铜矿更多地富集于何处?”等问题尚未见有详细报道。本文针对铜山铜矿床中含铜矽卡岩及其相关岩石开展岩相学及矿物学研究,对比地表和深部矽卡岩分带特点,不但有助于探讨该地区含铜矽卡岩的演化过程、形成环境等问题,而且可为矽卡岩矿床成因类型研究及勘察找矿提供必要的依据。

1 地质背景

铜山铜矿床位于安徽贵池境内,其大地构造位置处于扬子板块北缘的下扬子拗陷褶皱带中的铜陵-贵池复向斜西部姥山背斜南翼西段(图1a)(俞沧海, 2001)。矿区出露最老地层为志留系上统茅山组,除第四系外,最新地层为三叠系下统扁担山组(图1)。自北向南地层由老而新,层序较全,但由于岩体侵入及断层构造破坏,也常造成部分地层缺失。主要岩性特征为泥盆系以下(包括泥盆系)为碎屑岩(砂岩、砂页岩),泥盆系以上地层以碳酸盐岩类为主。赋矿层位主要为石炭系黄龙组-船山组灰岩和二叠系栖霞组灰岩(周曙光, 2003)。矿区近东西

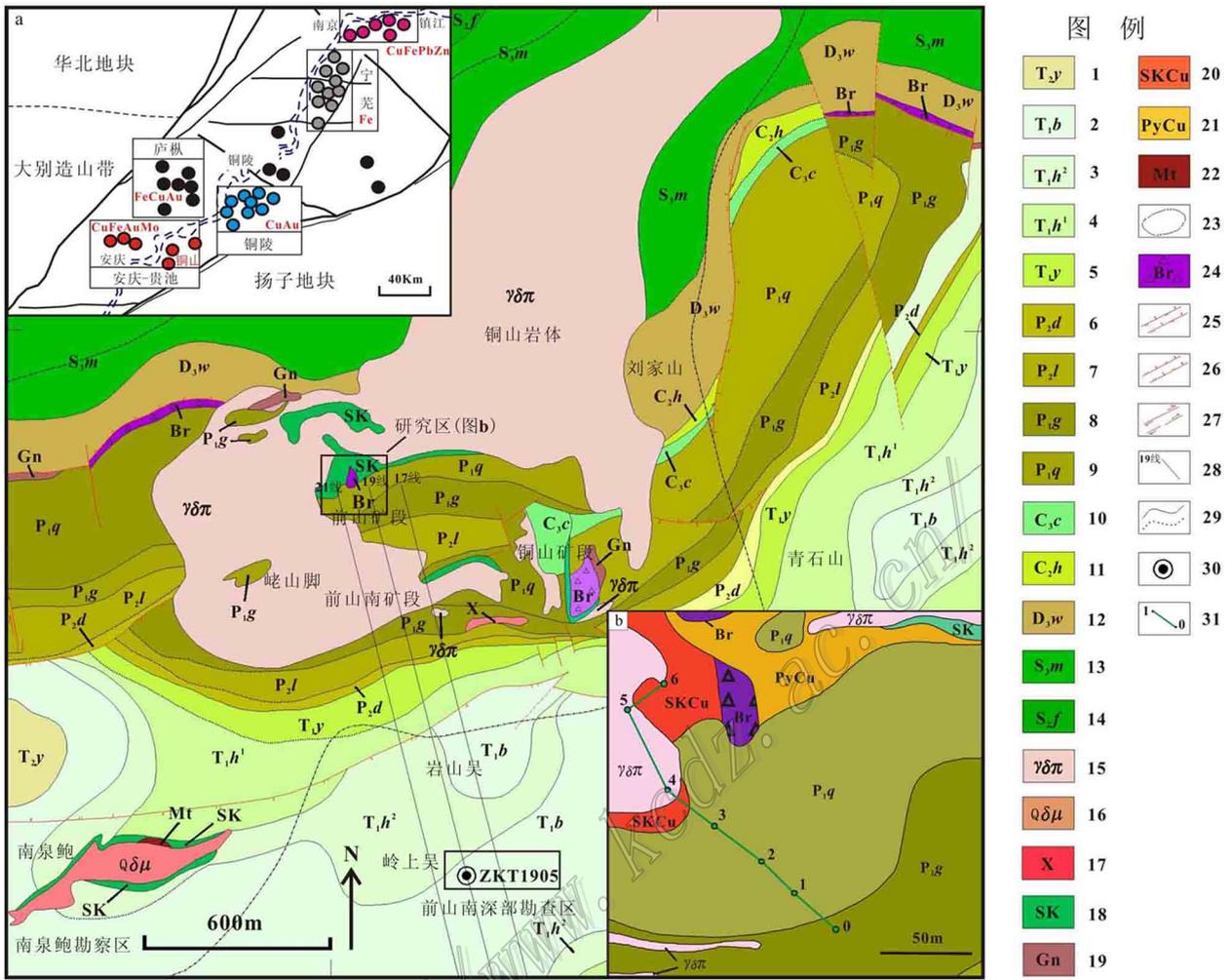


图 1 铜山铜矿区地质简图 (图 a 据毛景文等, 2009)

1—三叠系中统月山组; 2—三叠系下统扁担山组; 3—三叠系下统和龙山组上段; 4—三叠系下统和龙山组下段; 5—三叠系下统殷坑组; 6—二叠系上统大隆组; 7—二叠系上统龙潭组; 8—二叠系下统孤峰组; 9—二叠系下统栖霞组; 10—石炭系上统船山组; 11—石炭系中统黄龙组; 12—泥盆系上统五通组; 13—志留系上统茅山组; 14—志留系中统坟头组; 15—花岗闪长斑岩; 16—石英闪长玢岩; 17—煌斑岩; 18—矽卡岩; 19—铁帽; 20—含铜矽卡岩; 21—含铜黄铁矿; 22—磁铁矿; 23—蚀变区; 24—构造角砾岩; 25—实测(推测)逆断层; 26—实测(推测)正断层; 27—实测(推测)平推断层; 28—勘探线及编号; 29—实测(推测)地质界限; 30—钻孔及编号; 31—实测剖面导线

Fig. 1 Sketch geological map of the Tongshan copper orefield (a-after Mao et al., 2009)

1—Middle Triassic Yueshan Formation; 2—Lower Triassic Biandanshan Formation; 3—Upper part of Lower Triassic Helongshan Formation; 4—Lower part of Lower Triassic Helongshan Formation; 5—Lower Triassic Yinkeng Formation; 6—Upper Permian Dalong Formation; 7—Upper Permian Longtan Formation; 8—Lower Permian Gufeng Formation; 9—Lower Permian Qixia Formation; 10—Upper Carboniferous Chuanshan Formation; 11—Middle Carboniferous Huanglong Formation; 12—Upper Devonian Wutong Formation; 13—Upper Silurian Maoshan Formation; 14—Middle Silurian Fentou Formation; 15—Granodiorite-porphry; 16—Quartz-diorite-porphry; 17—Lamprophyre; 18—Skarn; 19—Gossan; 20—Copper-bearing skarn; 21—Copper-bearing pyrite; 22—Magnetite; 23—Alteration zone; 24—Tectonic breccia; 25—Measured (inferred) reverse fault; 26—Measured (inferred) normal fault; 27—Measured (inferred) strike-slip fault; 28—Exploration line and its serial number; 29—Measured (inferred) geological boundary; 30—Drill hole and its serial number; 31—Traverse measured during field work

向、近南北向及北东向断层极其发育,成矿条件较为有利。

燕山期岩浆活动强烈,形成石英闪长岩、花岗闪长岩及二长花岗岩等中酸性小侵入体(周曙光,

2003),包括铜山、小河王以及南泉鲍等岩体(俞沧海等, 1999)。铜山岩体呈北东向延伸(图 1),地表出露形态不规则,向南东倾斜,呈岩株状。

铜山铜矿床分铜山、前山和前山南 3 个矿段(图

1) 主要矿石类型有含铜斑岩型、含铜矽卡岩型、含铜黄铁矿型和含铜大理岩型,其中,含铜矽卡岩与钙碱性斑状火成侵入体相关(俞沧海等,1999),并沿着侵入岩与灰岩、硅质灰岩、泥质灰岩以及钙质页岩的接触带产出。本文研究区位于前山矿段及前山南深部勘察区(图1)。研究样品分别采自前山矿段露天采场(图1b)及前山南矿段ZKT1905钻孔中(图1)。

2 分析方法

矿物化学成分及电子背散射图像(BSE)由北京大学电子探针室JXA-8100型电子探针仪以及中国地质大学(北京)电子探针室EPMA-1600型电子探针完成,实验条件均为:加速电压15 kV,束流 $1 \times 10^{-8} \text{A}$,束斑 $1 \mu\text{m}$ 。石榴子石及辉石化学式利用氧原子计算法得到,其中, Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 的比值根据电价平衡计算出。全岩成矿元素分析在河北区域地质矿产调查研究所完成,岩石样品采用无污染玛瑙球

磨技术碎样至200目,使用WFX-110B原子吸收分光光度计通过火焰原子吸收法对全岩的Cu、Pb、Zn进行检测。

3 蚀变矿化分带特征

近矿围岩蚀变在空间上往往重叠,但具一定的分带趋势。从中部岩体向外(图1b、图2)近北西向总体上表现为:蚀变花岗闪长斑岩→钙铁辉石矽卡岩(外矽卡岩)→大理岩→硅化大理岩化灰岩→强硅化蚀变岩→硅化灰岩→灰岩,近北东向表现为:蚀变花岗闪长斑岩→透辉石石榴子石矽卡岩→石榴子石透辉石矽卡岩→透辉石石榴子石矽卡岩→石榴子石矽卡岩→蚀变花岗闪长斑岩。从钻孔ZKT1905看,深部近矿围岩蚀变具有一定的垂向分带,从上至下(图3):①云母红柱石角岩→石英-石榴子石-硅灰石角岩→硅化泥质灰岩;②硅化灰岩→强硅化蚀变岩→透辉石矽卡岩→石榴子石矽卡岩;③白云质

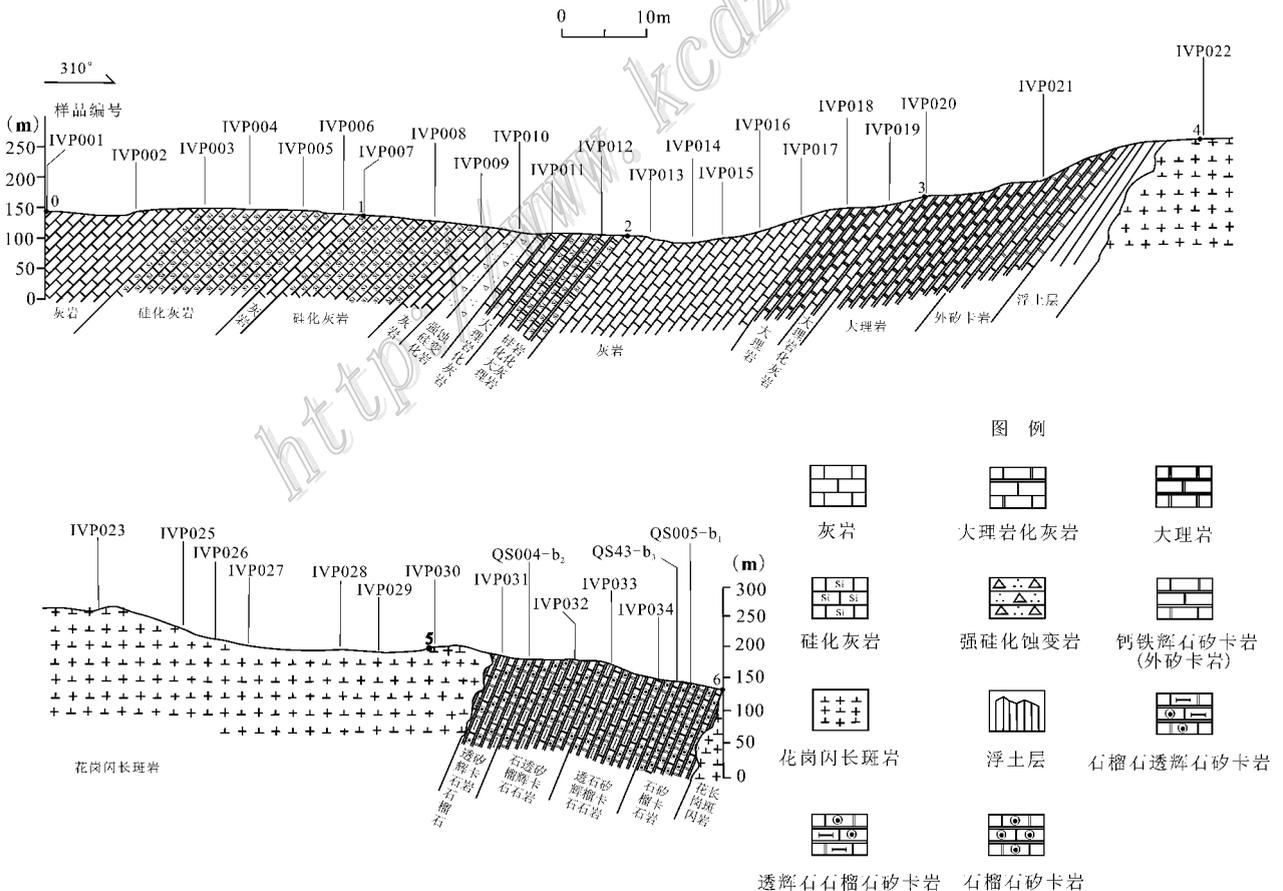


图2 前山矿段矽卡岩分带地质剖面图

Fig. 2 Geological cross section for zonation of the skarns in Qianshan ore block

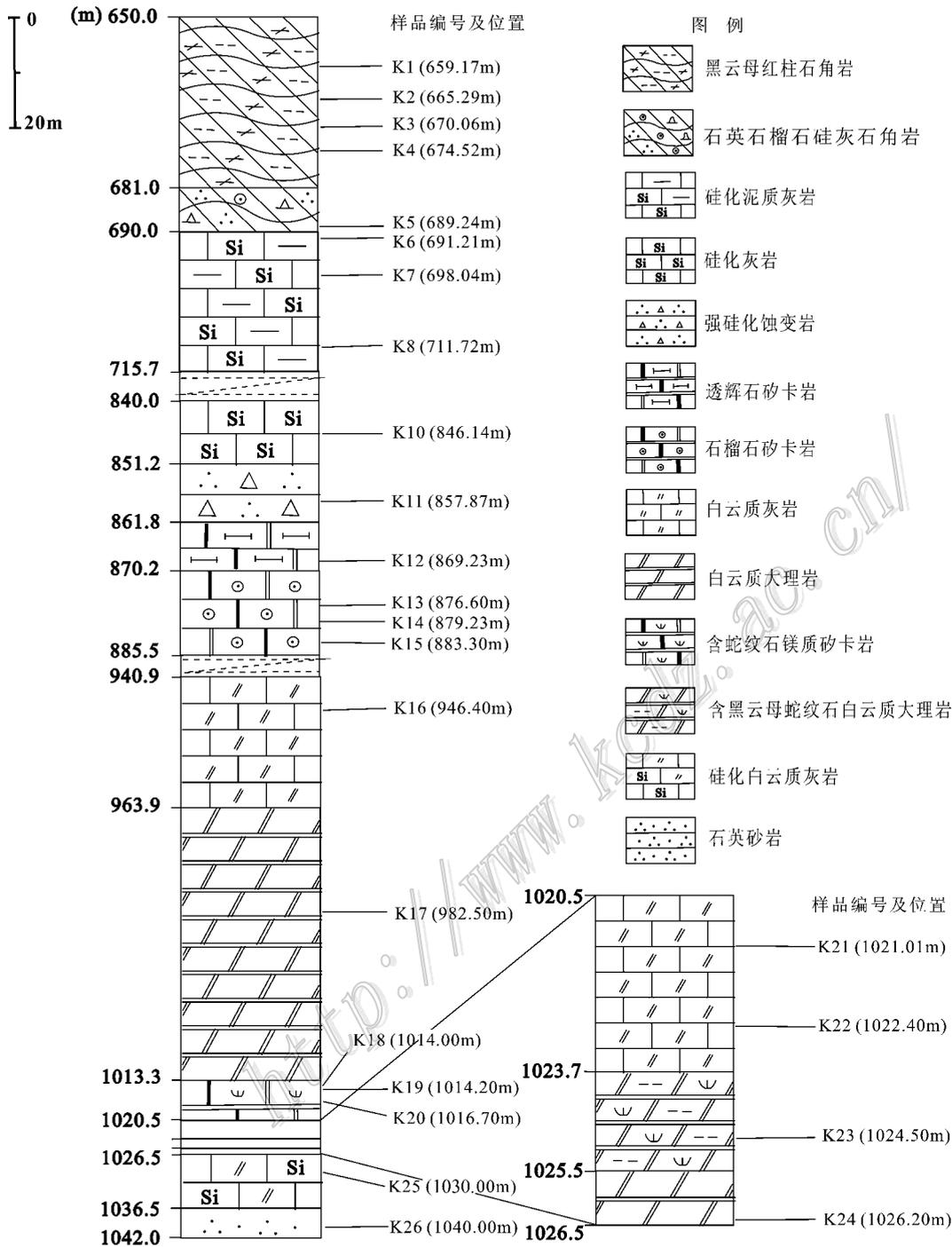


图 3 ZKT1905 钻孔中砂卡岩分带柱状图

Fig. 3 Schematic column for zonation of the skarns in ZKT1905 drill hole

灰岩→白云质大理岩→含蛇纹石镁质砂卡岩→含黑云母蛇纹石白云质大理岩→白云质大理岩→硅化白云质灰岩→石英砂岩。

3.1 岩相学特征

水平剖面砂卡岩产于铜山岩体和二叠系栖霞组

地层间。铜山岩体岩性为花岗闪长斑岩(图 4a),斑状结构,斑晶含量大于 50%,主要由斜长石、石英、黑云母、角闪石等组成,基质主要由斜长石、钾长石、石英及少量暗色矿物微粒组成。斜长石环带和聚片双晶发育,普遍具绢云母化,黑云母具绿泥石化,大多

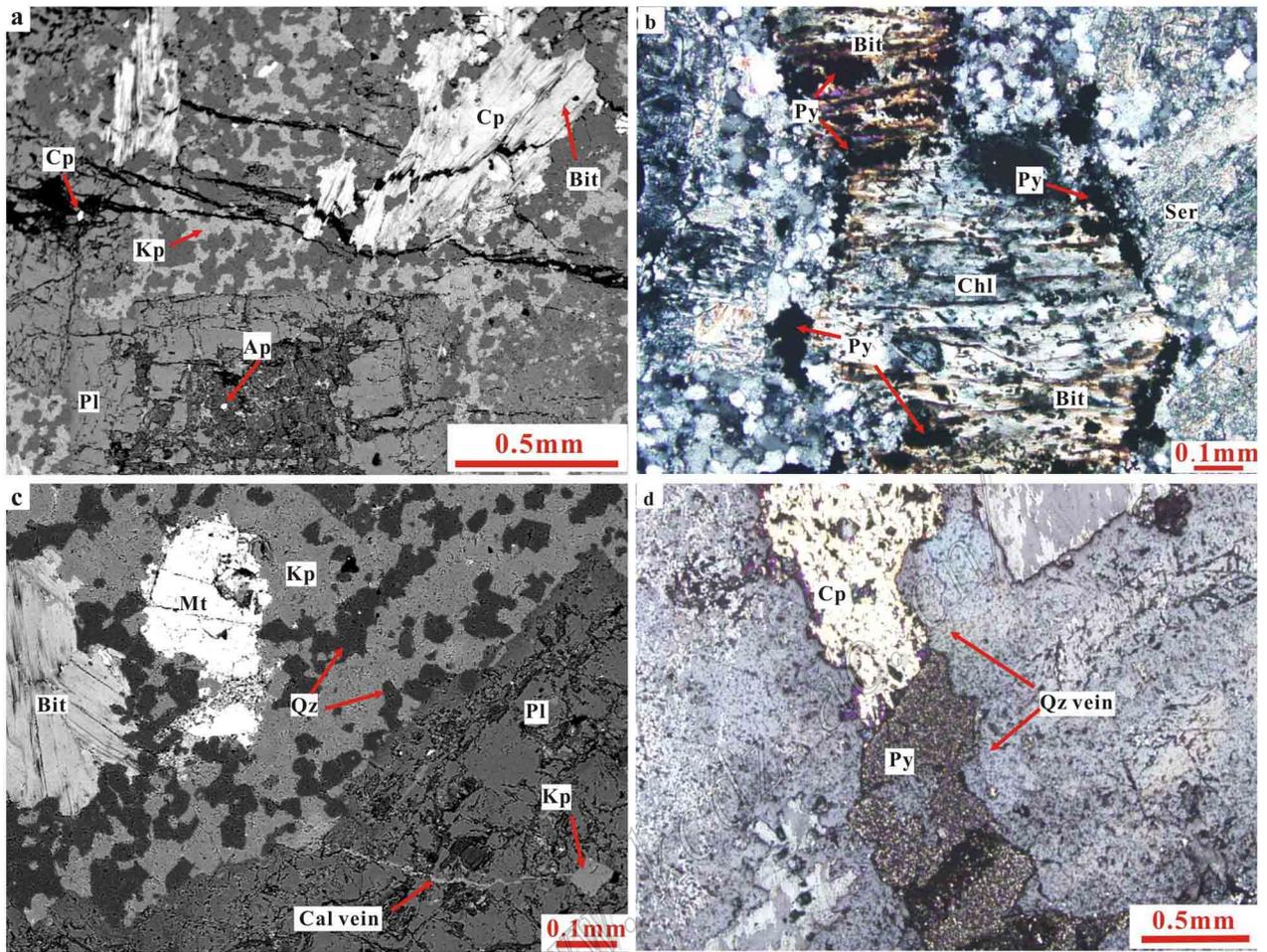


图4 花岗闪长斑岩的显微结构

a. 花岗闪长斑岩的斑状结构,斜长石绢云母化,黑云母绿泥石化、黄铜矿化(BSE照片);b. 黑云母的角闪石假象,具绿泥石化、黄铁矿化(透射光,+);c. 钾长石基质中的磁铁矿,晚期方解石脉沿斜长石裂隙充填(BSE照片);d. 晚期石英脉中的黄铁矿脉和黄铜矿脉(反射光);Kp—钾长石;Pl—斜长石;Bit—黑云母;Ser—绢云母;Chl—绿泥石;Ap—磷灰石;Qz—石英;Cal—方解石;Py—黄铁矿;Cp—黄铜矿;Mt—磁铁矿

Fig. 4 Microstructures of the granodiorite-porphry

a. Porphyritic texture of the granodiorite porphyry, sericitized plagioclase, chloritized biotite replaced by chalcopyrite (BSE image); b. Replacement of amphibole by biotite, chlorite and pyrite (transmitted light, +); c. Magnetite in K-feldspar matrix, late calcite vein filling in fractures of the plagioclase (BSE image); d. Pyrite and chalcopyrite vein in late quartz veins (reflected light). Kp—K-feldspar; Pl—Plagioclase; Bit—Biotite; Ser—Sericite; Chl—Chlorite; Ap—Apatite; Qz—Quartz; Cal—Calcite; Py—Pyrite; Cp—Chalcopyrite; Mt—Magnetite

数角闪石已蚀变为黑云母(以假象存在,图4b)。伴随斜长石、黑云母等矿物的蚀变,出现黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿(图4a、4b、4c)。另见晚期石英脉或方解石脉沿裂隙充填(图4d),并有黄铁矿脉及黄铜矿脉伴生。以上现象反映了含铜斑岩型矿石至少经历了2期矿化:Ⅰ伴随斜长石、角闪石、黑云母斑晶或基质蚀变而产生硫化物;Ⅱ晚期低温热液沿裂隙充填伴随硫化物产生。大量的原生磁铁矿指示了岩浆具较强的氧化性。

靠近岩体的矽卡岩为富石榴子石矽卡岩,有致密块状与粒状2种。致密块状石榴子石常和透辉石共生,组成透辉石石榴子石矽卡岩或石榴子石透辉石矽卡岩,前者较后者更靠近岩体。微观上,石榴子石紧密连生,呈不规则多边形,边界较平直,局部透辉石交代石榴子石(图5a),反映了透辉石较石榴子石形成略晚。距岩体稍远的透辉石石榴子石矽卡岩中(IVP034),石榴子石被绿泥石交代呈孤岛状(图5b),方解石交代石榴子石和绿泥石。粒状石榴子石

不与辉石共生,而独立组成石榴子石砂卡岩,在空间上也紧靠岩体,石榴子石为自形粒状(2~3.5 mm),裂隙发育,部分距岩体稍远的粒状石榴子石砂卡岩(QS43-b₃)具绿帘石化(图 5c),晚期方解石沿石榴子石裂隙选择性交代,伴生黄铜矿。石榴子石透辉石砂卡岩距岩体较远(IV P032),细粒变晶结构。局部见透辉石变斑晶及透辉石脉(图 5d),反映了在细粒透辉石产生后,富 Mg、Si 的热液又通过渗滤交代作用进一步生成透辉石,分布于岩石的张性裂隙中。透闪石、绿帘石交代透辉石以假象存在,磁铁矿交代透闪石(图 5e),方解石呈细脉状交代磁铁矿或沿裂隙充填,或呈团块状交代透辉石,并伴随有较多黄铜矿、斑铜矿(图 5f),偶见闪锌矿交代黄铜矿,指示闪锌矿晚于黄铜矿产生。以上特征反映了铜矿化较多出现于距岩体较远的富透辉石砂卡岩中,且与后期方解石的产生密切相关。

距岩体更远的砂卡岩(IV P021)为北西向的钙铁辉石砂卡岩,靠近大理岩带,主要由细粒钙铁辉石变晶组成,有团块状玉髓交代钙铁辉石,另有钙铁辉石脉沿张性裂隙渗滤充填(图 5g),隐晶质玉髓脉沿裂隙交代钙铁辉石,黄铜矿伴随玉髓产生。说明钙铁辉石至少经历了 2 期,铜矿化与晚期低温热液相关。钙铁辉石砂卡岩向外为大理岩(图 5h),粗粒结构(0.3~0.6 mm),具黄铜矿化、磁铁矿化。大理岩带向外,大理岩化减弱,硅化增强,在硅化大理岩化灰岩中(图 5i),可见多期石英-方解石脉、褐铁矿脉,并有磁铁矿伴生,偶见筛状黄铁矿、黄铜矿。更远处有一断裂带(图 2),灰岩中的微晶方解石几乎完全被石英交代,形成强硅化蚀变岩(图 5j),并有大量黄铁矿伴生。断裂带向外,硅化减弱,可见硅化灰岩中形成具有网脉角砾状(图 5k)的石英-方解石,石英呈细粒(0.002 mm),边缘有黄铁矿。最外带灰岩(图 5l)为泥晶结构,聚片双晶发育,偶见团块状硅化及方解石脉充填,方解石微晶和石英中均有不规则状闪锌矿和黄铁矿,反映了地层还原性较强,有含 Zn、Fe 的硫化物。以上特征说明随着远离岩体,灰岩的大理岩化减弱,磁铁矿、黄铜矿含量减少;断裂带附近硅化增强,闪锌矿、黄铁矿较多出现于距大理岩带较远的硅化灰岩中。

深部钻孔上部地层岩性为富 K 的泥质灰岩,经变质后形成的云母红柱石角岩(图 6a)为变余泥质结构,变斑晶由红柱石组成,基质由钾长石、石英、黑云母、碳质等组成。钾长石与红柱石共生,指示了高

温环境,岩体侵位较浅。随着深度增加(K4, -674.52 m),白云母含量增加,红柱石菱形粒度变小,一些呈放射状集合体(图 6b),黑云母的绿泥石化增强,并出现高岭土脉。黄铁矿、磁铁矿呈浸染状分布于基质中。深度继续增加时(K5, -689.24 m),出现石英-钙铝榴石-硅灰石角岩(图 6c),网脉结构,硅灰石呈放射状,晚期方解石交代钙铝榴石,并伴生浸染状黄铁矿。硅化泥质灰岩(图 6d)主要由石英和泥质组成,张性裂隙发育,偶见黑云母脉,具绿泥石化,伴生黄铁矿脉。反映了随着地层深度增加,原岩中白云母含量增加,而石英减少;与岩体距离增大,温度降低,接触热变质强度减弱,硅化、高岭土化及绿泥石化等蚀变作用增强。

钻孔中部为钙质砂卡岩建造,硅化灰岩→强硅化蚀变岩→透辉石砂卡岩→石榴子石砂卡岩,见(含磷灰石)这一分带特征及副矿物磷灰石均能指示深度增加时,温度增加,距岩体较近,与地表钙质砂卡岩类似,但缺少粒状自形石榴子石砂卡岩。

钻孔下部为镁质砂卡岩建造。中间部位接触交代作用较强,上、下两侧,地层岩石的白云岩化及硅化较强(图 3)。镁质砂卡岩(图 6e)为纤维交代结构,主要由橄榄石、蛇纹石、白云石、黑云母等组成。蛇纹石呈纤维叶片状交代橄榄石和磁铁矿呈孤岛状或网格状,或以橄榄石假象存在。在含黑云母蛇纹石白云质大理岩中(图 6f),黄铁矿交代蛇纹石或磁铁矿,同时被黄铜矿交代。白云质大理岩中(图 6g),沿粗大的白云石边界有黄铁矿脉,并被晚期白云石脉切穿。在-1 030 m 之下,白云质灰岩中(图 6h)偶见硅化,并伴随有浸染状黄铁矿。石英砂岩中(图 6i)石英边界弯曲呈紧密镶嵌结构,偶见黄铁矿。由此可知,深度为 1 013~1 020 m 和 1 203~1 205 m 时,围岩与侵入体较近,镁质砂卡岩发育,而在此深度外围,距侵入体较远,温度较低,只发育白云岩或硅化白云质灰岩。黄铁矿等硫化物与热液中白云石或石英有关。

3.2 矿物学特征

在空间上,交代蚀变岩套有不同的矿物组合,各矿物组合中典型矿物的化学成分在水平方向和垂向上均有一定规律性。

石榴子石化学成分列于表 1。地表浅部北东向从中部岩体向外,石榴子石的 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 和 $w(\text{TiO}_2)$ 及 CaO/FeO 比值分别由 1.08%、0.05%、0.98 增加,到 IVP033 处达到峰值,随后均分别降低至 0.99%、

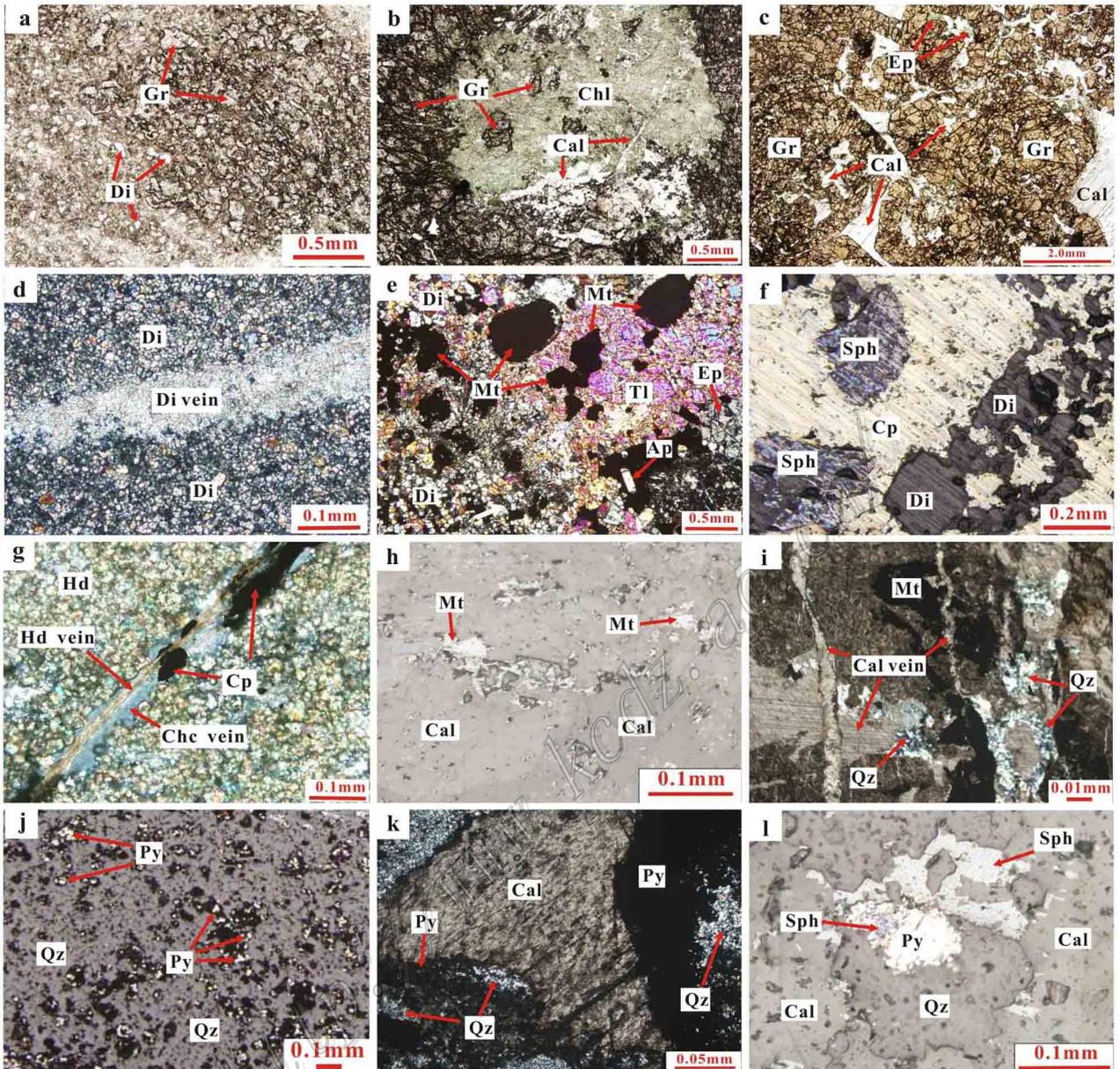


图5 浅部水平砂卡岩带中岩石显微结构

a. 透辉石交代致密块状石榴子石呈孤岛状(透射光, -); b. 致密块状石榴子石被绿泥石、方解石交代(透射光, -); c. 自形粒状石榴子石被绿帘石交代, 晚期方解石沿石榴子石裂隙选择性交代(透射光, -); d. 致密块状透辉石石榴子石砂卡岩中的透辉石脉(透射光, +); e. 透闪石、绿帘石交代透辉石, 磁铁矿交代透闪石(透射光, +); f. 方解石交代透辉石, 伴有黄铜矿化, 闪锌矿交代黄铜矿(反射光); g—致密块状钙铁辉石砂卡岩中的辉石脉, 晚期玉髓沿脉充填, 伴生黄铜矿(透射光, +); h—粗粒大理岩中磁铁矿(反射光); i—硅化大理岩化灰岩中石英-方解石脉, 有磁铁矿化(透射光, +); j. 强硅化蚀变岩中的石英与黄铁矿(反射光); k. 硅化灰岩中细粒石英交代方解石呈角砾状, 伴生黄铁矿(透射光, +); l. 灰岩微晶方解石中的不规则闪锌矿和黄铁矿, 团块状石英交代方解石, 伴生闪锌矿、黄铁矿(反射光); Di—透辉石; Gr—石榴子石; Ep—绿帘石; Tl—透闪石; Hd—钙铁辉石; Chc—玉髓; Sph—闪锌矿

Fig. 5 Microstructures of the rocks in horizontal shallow skarn zone

a. Replacement of garnet by diopside, showing island structure (transmitted light, -); b. Replacement of garnet by chlorite and calcite (transmitted light, -); c. Replacement of euhedral garnet by epidote, late calcite filling in fracture of the garnet (transmitted light, -); d. Diopside vein in diopside-garnet skarn (transmitted light, +); e. Replacement of diopside by tremolite and epidote; tremolite also replaced by magnetite (transmitted light, +); f. Diopside replaced by calcite and chalcopyrite; chalcopyrite replaced by sphalerite (reflected light); g. Pyroxene vein inhedenbergite skarn; late chalcocony vein and chalcopyrite filled along the fracture (transmitted light, +); h. Magnetite in coarse-grained marble (reflected light); i. Quartz - calcite vein in silicified and marbled limestone; much magnetite in the rock (transmitted light, +); j. Quartz and pyrite in strongly silicified altered rock (reflected light); k. Replacement of calcite by fine grained quartz and pyrite in silicified limestone, showing breccia texture (transmitted light, +); l. Irregular sphalerite and pyrite in calcite microcrystalline; quartz associated with sphalerite; pyrite replacing calcite (reflected light) Di—Diopside; Gr—Garnet; Ep—Epidote; Tl—Tremolite;

Hd—Hedenbergite; Chc—Chalcocony; Sph—Sphalerite

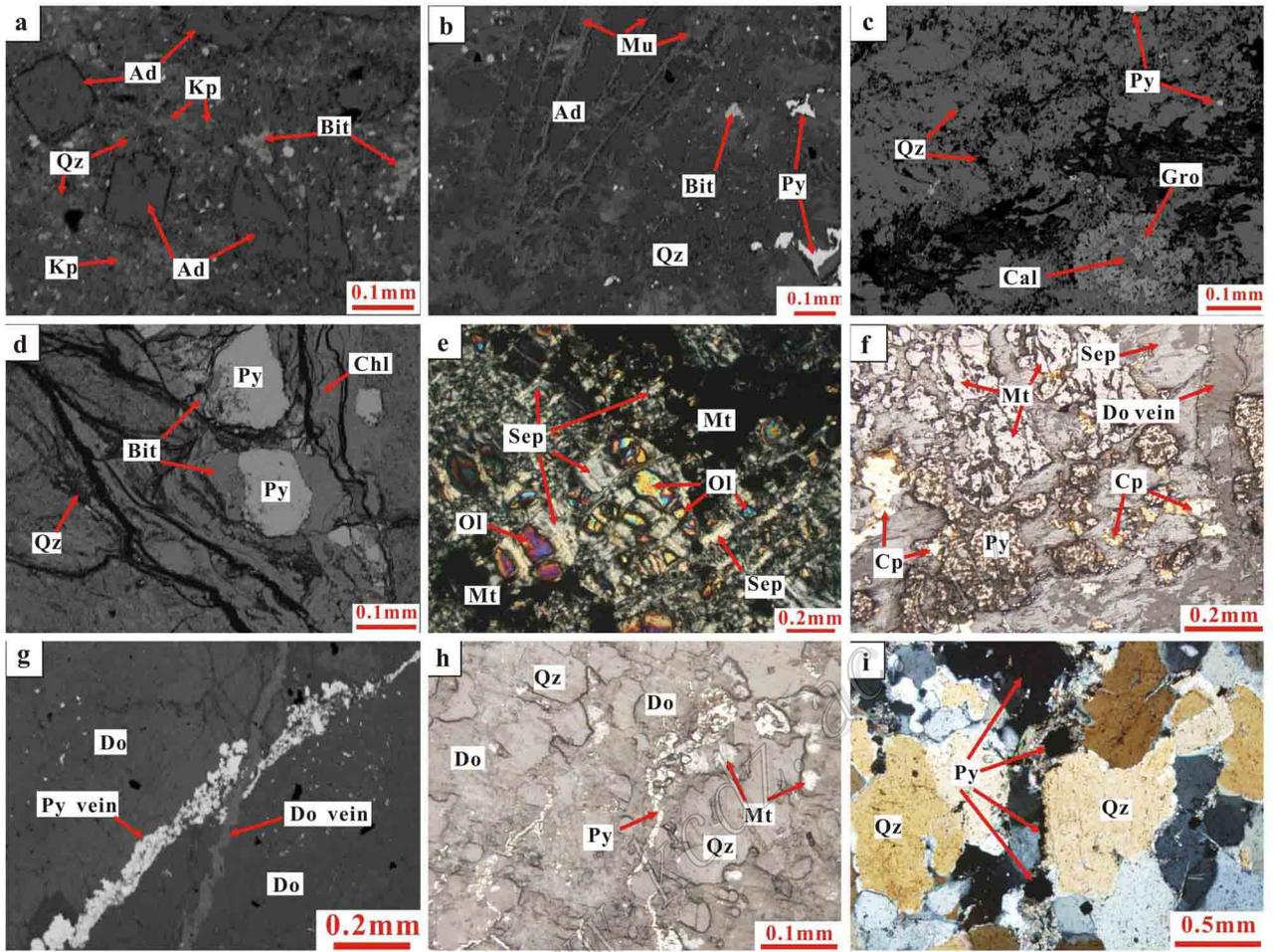


图 6 深部垂向矽卡岩带中岩石显微结构

a. 黑云母-红柱石角岩的变余泥质结构,红柱石为自形柱状(BSE 照片); b. 黑云母-红柱石角岩中放射状集合体的红柱石(BSE 照片); c. 石英-钙铝榴石-硅灰石角岩中方解石交代钙铝榴石(BSE 照片); d. 硅化泥质灰岩中黑云母脉具绿泥石化、黄铁矿化(BSE 照片); e. 镁质矽卡岩中纤维状蛇纹石交代橄榄石和磁铁矿呈港湾状(透射光, +); f. 黄铁矿交代蛇纹石和磁铁矿,并被黄铜矿交代(反射光); g. 白云质大理岩中黄铁矿脉和白云石脉(BSE 照片); h. 白云质灰岩中的硅化和黄铁矿化(反射光); i. 石英砂岩中的黄铁矿(透射光, +); Ad—红柱石; Mu—白云母; Gro—钙铝榴石; Ol—橄榄石; Sep—蛇纹石; Do—白云石

Fig. 6 Microstructures of the rocks in vertical skarn zone of deep drill hole

a. Palimpsest silty texture of biotite-andalusite hornfels; andalusite is euhedral (BSE image); b. Sheaf aggregate of andalusite in biotite-andalusite hornfels (BSE image); c. Calcite replacing grossular in quartz-grossular-wollastonite hornfels (BSE image); d. Biotite veins in silicified silty limestone altered into chlorite and associated with pyrite (BSE image); e. Nematoblastic serpentine replacing olivine and magnetite in magnesian skarn, showing embayed texture (transmitted light, +); f. Pyrite replacing serpentine and magnetite and replaced by chalcopyrite (reflected light); g. Pyrite vein and dolomite vein in dolomitic marble (BSE image); h. Silicification and pyrite mineralization in dolomitic limestone (reflected light); i. Pyrite in quartz sandstone (transmitted light, +)

Ad—Andalusite; Mu—Muscovite; Gro—Grossular; Ol—Olivine; Sep—Serpentine; Do—Dolomite

0%、0.94; $w(\text{MnO})$ 变化虽有波动,但在 IVP033 处也达最大值;而 $w(\text{FeO})$ 先由 30.45% 降低至 24.02%,随后递增至 32.28% (图 7a),由此可知, IVP033 为石榴子石成分变化拐点。浅部矽卡岩带中石榴子石均为钙铁榴石(图 8a),And (钙铁榴石端员)含量的变化趋势与 $w(\text{FeO})$ 变化趋势一致。深部钻孔内随深度的增加,岩石中石榴子石 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$

从 22.23% 降低至 6.01%, $w(\text{FeO})$ 从 1.07% 增加至 22.56% (图 7b),分子中 Al 和 Fe 的变化范围较大, K5、K13、K14 为钙铝榴石,但 Gro (钙铝榴石端员)含量依次降低, And 含量依次增加;深度至 883 m 时,为钙铁榴石(图 8a)。与地表相比,深部石榴子石中 Al 含量较高, Fe 含量较低。

辉石化学成分列于表 2。除 IVP021 为钙铁辉

表 1 矽卡岩中代表性石榴子石的化学成分

Table 1 Representative chemical compositions of garnets in skarns

	地表浅部						钻孔深部			
	IVP031	IVP032	IVP033	IVP034	QS43-b3	QS005-b1	K5	K13	K14	K15
	$\omega(\text{B})\%$									
SiO ₂	36.79	35.61	37.36	35.48	37.65	35.02	40.47	39.78	38.90	37.35
TiO ₂	0.05	0.06	0.82	0.03	0.02	0.00	0.26	1.16	0.61	0.30
Al ₂ O ₃	1.08	1.44	4.41	1.50	1.24	0.99	22.23	15.39	14.69	6.01
Cr ₂ O ₃	0.00	0.03	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	30.45	26.14	24.02	26.45	30.84	32.28	1.07	9.63	11.72	22.56
MnO	0.61	0.58	0.67	0.58	0.45	0.64	0.54	0.61	0.25	0.45
MgO	0.00	0.04	0.38	0.06	0.05	0.13	0.00	0.19	0.11	0.19
CaO	29.84	32.55	31.25	32.54	31.20	30.32	34.88	32.32	33.37	31.97
Na ₂ O	1.03	0.02	0.13	0.04	0.12	0.14	0.05	0.04	0.38	0.00
K ₂ O	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
NiO	0.00	0.05	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
总和	99.85	96.52	99.04	96.77	101.57	99.55	99.50	99.12	100.03	98.83
	阳离子系数									
Si	3.000	3.010	3.049	2.995	3.044	2.897	3.059	3.108	3.009	3.034
Ti	0.005	0.005	0.049	0.000	0.000	0.000	0.014	0.070	0.037	0.020
Al	0.108	0.142	0.042	0.152	0.117	0.097	1.982	1.418	1.340	0.576
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ³⁺	2.029	1.838	1.412	1.838	1.822	2.134	0.000	0.229	0.624	1.326
Fe ²⁺	0.049	0.010	0.225	0.030	0.261	0.099	0.068	0.400	0.134	0.206
Mn	0.044	0.041	0.044	0.041	0.029	0.045	0.036	0.042	0.019	0.029
Mg	0.000	0.005	0.044	0.005	0.005	0.016	0.000	0.023	0.014	0.024
Ca	2.608	2.944	2.730	2.944	2.699	2.687	2.827	2.704	2.767	2.780
Na	0.167	0.000	0.020	0.010	0.019	0.022	0.009	0.009	0.056	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
总和	8.010	7.995	7.615	8.015	7.996	8.000	7.995	8.003	8.000	7.995
Alm	1.81	0.00	0.00	0.00	4.97	2.97	2.32	0.00	4.57	0.74
Pyr	0.00	0.17	1.60	0.17	0.17	0.56	0.00	0.93	0.48	0.84
Spe	1.63	1.38	1.60	1.37	1.01	1.59	1.23	1.70	0.65	1.02
Pyrralspite	3.44	1.55	3.20	1.54	6.15	5.12	3.55	2.63	5.70	2.60
And	96.56	92.80	76.96	92.33	93.85	94.88	0.00	13.92	31.90	69.69
Gro	0.00	5.65	19.84	6.13	0.00	0.00	96.45	83.45	62.41	27.72

注: Pyrralspite(铝榴石)为 Alm、Pyr 和 Spe 三种矿物含量总和。其中, Alm 为铁铝榴石(Almandine), Pyr 为镁铝榴石(Pyrope), Spe 为锰铝榴石(Spessartine); And 为钙铁榴石(Andradite), Gro 为钙铝榴石(Grossular)。

石外,其余均为 Di(透辉石端员)含量较高的透辉石(图 8b)。地表浅部矽卡岩带中透辉石的 $\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 由 0.41% 递增,到 IVP032 时达到峰值 0.82%, 随后降低至 0.17%, 与石榴子石中 $\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 的变化规律基本一致。

3.3 成矿元素与硫化物成分特征

矽卡岩及其相关岩石的全岩成矿元素分析结果列于表 3。地表浅部, $\omega(\text{Cu})$ 在灰岩及硅化灰岩中为 0.003%~0.007%; 在大理岩化灰岩或大理岩中含量稍高为 0.082%~0.985%; 在蚀变花岗闪长斑岩中较高,尤其是含石英脉的斑岩,可高达 0.98%; 在矽卡岩中, $\omega(\text{Cu})$ 也高,可达 0.745%。北东向矽

卡岩带中, IVP033 为 Cu 含量变化拐点,与石榴子石的 FeO 变化规律一致。Zn 较多地富集于灰岩、硅化灰岩或矽卡岩中,而在大理岩或斑岩中较贫。钻孔深部, Cu 主要富集于放射状红柱石角岩(K4)以及含蛇纹石镁质矽卡岩中, $\omega(\text{Cu})$ 最高可达 0.557%。

金属硫化物随着产出状态的不同,成分上呈现出变化(表 4)。闪锌矿中 Zn 普遍低于理想成分质量值(67.10%),但 S 高于理想成分质量值(32.90%)。矽卡岩中闪锌矿的 $\omega(\text{Zn})$ 平均为 60.40%,高于地层灰岩中闪锌矿的 Zn 含量(平均 51.33%),且前者 Fe 含量高于后者。黄铁矿中 S 低于理想成分理论值(53.45%)。除强硅化蚀变岩外的碳酸盐岩石中,黄

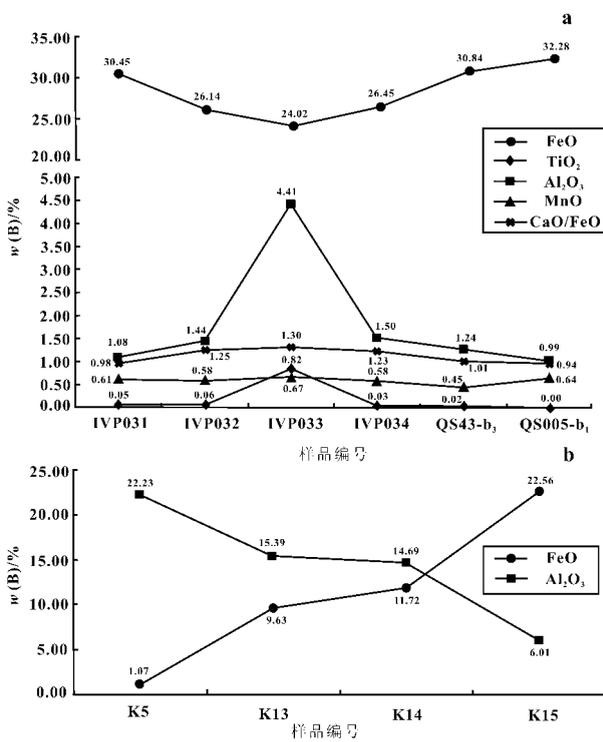


图 7 水平砂卡岩带中石榴子石化学成分变化图 (a) 和垂直砂卡岩带中石榴子石化学成分变化图 (b)

Fig. 7 Diagram for chemical compositions of the garnets from horizontal skarn zone (a) and diagram for the chemical compositions of the garnets from vertical skarn zone (b)

铁矿的 Fe 含量普遍低于斑岩或砂卡岩中黄铁矿中的 Fe。黄铜矿中 Cu 和 S 分别低于理想成分值 (Cu 34.56% ; S 34.92%), 而 Fe 高于理想成分值 (30.52%)。斑岩晚期石英脉中的黄铜矿比伴随斑晶或基质矿物蚀变而产生的黄铜矿更富 Cu , 与成矿元素分析结果一致。以上反映了岩体和砂卡岩中硫化物的金属元素含量普遍高于地层中相应金属元素的含量 , 指示了成矿物质更多地来源于岩浆流体 , 且 Cu 在岩浆演化晚期形成的流体中更富集。

4 讨论

含铜砂卡岩的形成是一动态过程 , 岩石中化学反应和矿物组合常取决于侵入岩的特征、交代性流体的成分及总温压状态 (Titley , 1973 ; Guilbert et al. , 1974)。早期变质作用和交代作用发生于相对高温条件 , 随后温度下降 , 岩浆流体演化 , 物相分离 , 发生退化蚀变作用 (Meinert et al. , 2003)。岩石矿物组合及显微结构显示砂卡岩中矿物交代现象明

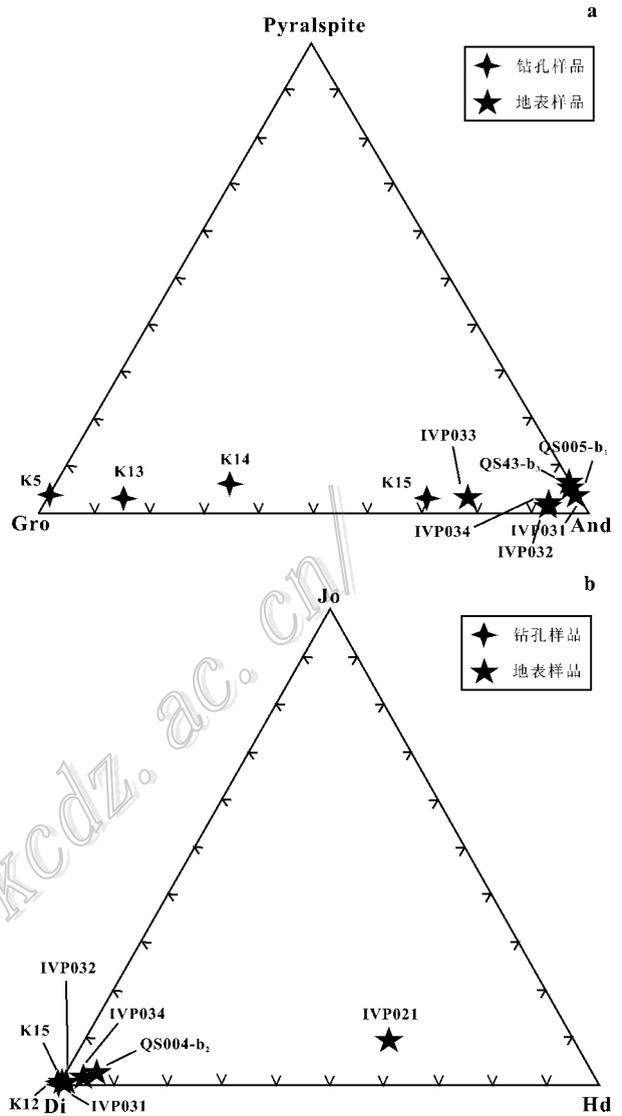


图 8 石榴子石 (a) 和辉石 (b) 的三端员组分投点图

其中 , Pyrralspite—铝榴石 , 为铁铝榴石 (Almandine) 镁铝榴石 (Pyrralpyrope) 和锰铝榴石 (Spessartine) 之和 ; Gro—钙铝榴石 (Grossular) ; And—钙铁榴石 (Andradite) ; Jo—钙锰辉石 (Johannsenite) ; Di—透辉石 (Diopside) ; Hd—钙铁辉石 (Hedenbergite)

Fig. 8 Ternary plots of garnets (a) and pyroxenes (b)

显 , 存在若干交代蚀变相 , 指示铜山砂卡岩的演化经历了由高温向低温的变化。时间上 , 由进变期过渡到退变期。进变期具体包括接触热变质阶段和进化交代阶段 ; 退变期包括早退化蚀变阶段和晚退化蚀变阶段。另外 , 空间上 , 铜山砂卡岩具有显著分带特征 , 主要表现在砂卡岩带中与侵入体距离不同的岩石中典型矿物组合以及单矿物主元素含量的变化上。这些空间分带特征能反映流体演化、围岩成分、温度变化以及氧化还原环境、形成深度 (Meinert et al. , 2005) , 并能帮助选定找矿靶区。水平及垂直分

表 2 矽卡岩中代表性辉石的化学成分

Table 2 Representative chemical compositions of pyroxene in skarns

	地表浅部					钻孔深部	
	IVP021	IVP031	QS004-b2	IVP032	IVP034	K12	K15
	$w(B)\%$						
SiO ₂	51.00	56.68	55.69	54.40	53.88	55.34	56.17
TiO ₂	0.09	0.08	0.00	0.05	0.00	0.19	0.00
Al ₂ O ₃	0.31	0.41	0.43	0.82	0.17	0.49	0.53
FeO	16.99	0.00	2.45	0.64	2.61	0.75	0.15
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00
MnO	2.76	0.02	0.43	0.06	0.75	0.00	0.10
NiO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO	7.07	19.04	17.43	17.11	15.76	18.58	18.61
CaO	21.83	24.10	23.64	26.45	26.18	23.96	24.33
Na ₂ O	0.13	0.00	0.03	0.07	0.06	0.00	0.14
K ₂ O	0.00	0.08	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
总和	100.18	100.41	100.10	99.61	99.46	99.31	100.03
	阳离子系数						
T Si	1.997	2.032	2.025	1.979	1.984	2.011	2.023
T Al	0.003	0.000	0.000	0.021	0.007	0.000	0.000
T Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.000	0.000
Al M1	0.011	0.017	0.018	0.014	0.000	0.021	0.022
Ti M1	0.003	0.002	0.000	0.001	0.000	0.005	0.000
Fe ³⁺ M1	0.000	0.000	0.000	0.010	0.019	0.000	0.000
Fe ²⁺ M1	0.556	0.000	0.037	0.010	0.053	0.000	0.000
Cr M1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Mg M1	0.413	0.981	0.945	0.928	0.865	0.974	0.978
Ni M1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg M2	0.000	0.037	0.000	0.000	0.000	0.033	0.021
Fe ²⁺ M2	0.000	0.000	0.038	0.000	0.000	0.023	0.005
Mn M2	0.092	0.001	0.013	0.002	0.023	0.000	0.003
Ca M2	0.916	0.926	0.921	1.031	1.033	0.933	0.939
Na M2	0.010	0.000	0.002	0.005	0.004	0.000	0.010
K M2	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
总和	4.000	3.996	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
Di	33.90	99.59	94.73	96.20	90.51	100.00	98.69
Hd	55.60	0.00	3.75	1.00	5.29	0.00	0.00
Jo	9.20	0.08	1.32	0.20	2.30	0.00	0.30
Tsch	0.30	0.00	0.00	2.10	1.50	0.00	0.00
Jd+ Ae	1.00	0.33	0.20	0.50	0.40	0.00	1.01

注 Di 为透辉石 (Diopside); Hd 为钙铁辉石 (Hedenbergite); Jo 为钙锰辉石 (Johannsenite); Tsch 为契尔马克分子; Jd 为硬玉 (Jadeite); Ae 为霓石 (Aegirine)。

带成因模式如图 9 所示。

4.1 接触热变质阶段

接触热变质阶段伴随于初始花岗闪长质岩浆的侵位。在浅部靠近岩体处,岩浆中的热流使均一的微晶钙质灰岩地层重结晶形成大理岩(图 5h),远离岩体的地层由于温度略低,只发生局部大理岩化(图 5i);在深部,岩浆热流使富 K 泥质灰岩热变质产生云母-红柱石角岩(图 6a、6b)以及由细粒的富 Al

贫 Fe 的石榴子石、石英、硅灰石组成的角岩(图 6c),并使深部均一的富 Mg 碳酸盐重结晶为白云质大理岩(图 6g)。深度增加时,红柱石由柱状变为放射状集合体,反映了随着远离岩体,温度略低,热变质程度减弱。变质矿物红柱石的产生伴随脱水反应,可能会有地层中金属元素的活化并转移至含水流体中。角岩中石榴子石、硅灰石等硅酸盐的产生可伴随着脱碳反应,导致体积收缩而形成微裂隙;另

表 3 代表性岩石中成矿元素的含量

Table 3 Representative content of ore-forming elements in rocks

样号	岩性	z(B)%		
		Cu	Pb	Zn
浅部研究区				
IVP003	团块状硅化灰岩	0.003	0.01	0.003
IVP007	角砾网脉状硅化灰岩	0.003	0.003	0.028
IVP010	强硅化蚀变岩	0.003	0.009	0.01
IVP011	大理岩化灰岩	0.082	0.004	0.003
IVP012	硅化大理岩化灰岩	0.003	0.007	0.013
IVP017	灰岩	0.007	0.01	0.003
IVP018	大理岩	0.985	0.007	0.007
IVP019	大理岩化灰岩	0.597	0.009	0.067
IVP020	大理岩	0.026	0.01	0.008
IVP023	蚀变花岗闪长斑岩(不含石英脉)	0.082	0.004	0.007
IVP025	蚀变花岗闪长斑岩(不含石英脉)	0.029	0.004	0.004
IVP027	蚀变花岗闪长斑岩(含石英脉)	0.558	0.004	0.007
IVP028	蚀变花岗闪长斑岩(含石英脉)	0.235	0.004	0.005
IVP030	蚀变花岗闪长斑岩(含石英脉)	0.98	0.004	0.009
IVP031	透辉石石榴子石矽卡岩	0.745	0.004	0.022
IVP032	石榴子石透辉石矽卡岩	0.236	0.005	0.008
IVP033	透辉石石榴子石矽卡岩	0.013	0.006	0.018
IVP034	透辉石石榴子石矽卡岩	0.135	0.006	0.01
钻孔深部				
K2	云母红柱石角岩(柱状红柱石)	0.003	0.004	0.023
K3	云母红柱石角岩(放射状红柱石)	0.037	0.005	0.007
K5	石英-石榴子石-硅灰石角岩	0.004	0.007	0.012
K7	硅化泥质灰岩	0.006	0.006	0.027
K10	硅化灰岩	0.001	0.006	0.004
K11	强硅化蚀变岩	0.002	0.003	0.004
K12	透辉石矽卡岩	0.002	0.003	0.003
K13	石榴子石矽卡岩	0.001	0.005	0.007
K15	石榴子石矽卡岩	0.001	0.01	0.007
K16	白云质灰岩	0.001	0.01	0.005
K17	白云质大理岩	0.001	0.011	0.005
K18	含蛇纹石镁质矽卡岩	0.015	0.006	0.046
K19	含蛇纹石镁质矽卡岩	0.048	0.005	0.134
K20	含蛇纹石镁质矽卡岩	0.557	0.006	0.109
K21	白云质灰岩	0.004	0.009	0.029
K22	白云质灰岩	0.003	0.006	0.03
K23	白云质大理岩	0.483	0.006	0.083
K25	硅化白云质灰岩	0.011	0.005	0.011
K26	石英砂岩	0.004	0.004	0.016

外,上侵岩浆产生向上压力及其演化产生高温流体相也会造成水压致裂(Meinert et al., 2005)。后期含矿流体可通过渗滤作用沿着裂隙充填于大理岩和角岩中。

4.2 进化交代阶段

进化交代阶段可能开始于岩浆固结与结晶时

期。铜山矿区矽卡岩型矿石成矿物质主要来源于岩浆(周曙光, 2003), 岩浆结晶伴随富挥发性组分的出溶, 金属元素和氯从熔体中分离(Candela et al., 1995; Shinohara et al., 1995; Hedequist et al., 1998)形成含矿热液, 随着岩浆进一步结晶, 含矿热液也将在未完全固结的斑岩岩株中演化、增加, 并与

表4 岩石中代表性硫化物的化学成分

Table 4 Representative chemical compositions of sulfides in rocks

样号	岩性	寄主矿物	硫化物	wt(B)/%											
				S	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Pb	总和	
IVP002	灰岩	方解石微晶	闪锌矿	33.95	0.45	13.63	0.30	0.12		50.88	0.75				100.08
IVP012	硅化大理岩化灰岩	晚期石英	闪锌矿	33.69	0.99	12.09		0.33		51.77	0.32	0.08	0.90		100.17
QS004-b2	透辉石砂卡岩	黄铜矿	闪锌矿	32.50	0.15	3.17	0.10	0.35	1.34	62.46	0.36	0.23			100.66
k15	石榴子石砂卡岩	晚期方解石	闪锌矿	33.50	0.04	6.62	0.08	0.21	0.46	58.34	0.04	0.32			99.61
IVP002	灰岩	方解石微晶	黄铁矿	53.13		46.17		0.66				0.22			100.18
IVP003	硅化灰岩	晚期石英	黄铁矿	52.02		45.96	0.11	0.16			1.56				99.81
IVP010	强硅化蚀变岩	晚期石英	黄铁矿	53.26		47.70					0.02				100.98
IVP012	硅化大理岩化灰岩	晚期方解石	黄铁矿	48.82		45.82		0.24			6.10	0.33			101.31
IVP012	硅化大理岩化灰岩	晚期石英	黄铁矿	47.06		44.01	0.33	0.08			7.56	0.45			99.49
IVP017	灰岩	方解石微晶	黄铁矿	52.19	0.01	46.66	0.12	0.30				0.07			99.35
IVP025	蚀变花岗闪长斑岩	石英基质	黄铁矿	52.89		45.62	0.86			0.08	0.18				99.63
IVP023	蚀变花岗闪长斑岩	斜长石斑晶	黄铁矿	53.28	0.18	46.49		0.75			0.18	0.11			100.99
IVP027	蚀变花岗闪长斑岩	晚期石英脉	黄铁矿	51.96		46.96	0.23								99.15
QS43-b3	石榴子石砂卡岩	晚期方解石	黄铁矿	52.00		46.34	0.67	0.47			0.20				99.68
k15	石榴子石砂卡岩	晚期石英	黄铁矿	51.31		46.85	0.31	0.64				0.33			99.44
IVP025	蚀变花岗闪长斑岩	斜长石斑晶	黄铜矿	34.25	0.09	32.74	0.17			33.85					101.10
IVP023	蚀变花岗闪长斑岩	石英基质	黄铜矿	34.34	0.16	31.79		0.07		33.82		0.01	0.02		100.21
IVP025	蚀变花岗闪长斑岩	晚期石英脉	黄铜矿	34.00		32.20	0.33			34.32		0.19			101.04
QS004-b2	透辉石砂卡岩	晚期方解石	黄铜矿	34.73	0.01	31.57	0.06			34.92					101.29
QS43-b3	石榴子石砂卡岩	晚期方解石	黄铜矿	34.05		31.57	0.11	0.04		34.22		0.20			100.19

围岩发生交代反应。富 Fe (钙铁榴石、钙铁辉石) 或富 Mg (透辉石、富镁橄榄石) 的无水硅酸盐变晶说明了大量溶解组分 (Fe、Mg) 被交代性热液带进了砂卡岩体系中。如深部含黑云母蛇纹石白云质大理岩 (图 6f) 可能是富 Fe、Mg 的热液进化交代热变质阶段形成的白云质大理岩后又经历退化蚀变形成的。砂卡岩中透辉石交代钙铁榴石 (图 5a) 反映了透辉石较石榴子石形成略晚。大部分石榴子石、辉石在形成时可通过脱碳反应 (刘悟辉等, 2006) 或流体压力而产生张性裂隙, 岩浆演化产生的流体可携带 Fe、Si、Mg 等离子进一步渗透于细粒辉石砂卡岩裂隙中, 产生透辉石脉或钙铁辉石脉 (图 5d、5g)。

大多数砂卡岩型铜矿床形成于强氧化性的侵入体与强还原性的地层接触带间 (Einaudi et al., 1981), 砂卡岩体系中, Ca、Al、Ti、Mn 常较多地富集于还原性较强的环境中, 而 Fe 较多地富集于氧化性较强的环境中 (Ochiai et al., 1993; Nicolescu et al., 1998)。在地表研究区靠近岩体处 (图 9a), 氧化性较强, 容易形成富 Fe³⁺ 的钙铁榴石砂卡岩, 由于流体中 MgO 组分的活动性强于 Fe, 故流体可以携带更多的 Mg 到距岩体稍远的地层中发生接触交代反应, 形成富透辉石的砂卡岩。在剖面中部 (样品 IVP033), 远离两侧岩体, 氧化性降低, 故出现石榴子

石成分变化拐点, Ca/Fe 比值、Al、Ti、Mn 含量均达到最高, 而 Fe 含量最低, 透辉石的 Al 在远离两侧岩体处 (IVP032) 也达到最高。由于外砂卡岩带更靠近地层, 还原性较强, 容易形成富 Fe²⁺ 的钙铁辉石砂卡岩 (IVP021, 外砂卡岩)。钻孔中部 (图 9b), 由下至上, 与岩体距离增大, 氧化性减弱, 由石榴子石砂卡岩变为透辉石砂卡岩, 且石榴子石中的 Fe 含量递减, Al 递增。透辉石砂卡岩带之上温度降低, 进化交代作用减弱。钻孔下部出现石炭系地层, 由于富 Mg, 在靠近岩体处能通过进化交代作用产生富镁橄榄石砂卡岩, 而远离岩体处温度相对较低, 只能形成白云质大理岩或硅化白云质灰岩。

4.3 早退化蚀变阶段

在与斑岩铜矿相关的含铜砂卡岩中, 强烈的早期退化蚀变作用常常叠加在前阶段产生的无水硅酸盐上, 并对其交代 (James, 1976; Meinert, 1992)。具体表现为随着岩浆结晶, 温度降低, 岩浆演化分离出的富 Fe、Si、Mg 的流体交代早期无水硅酸盐高温物相, 产生大量含水硅酸盐, 如绿帘石 (图 5c、5e)、透闪闪石 (图 5e)、蛇纹石 (图 6e、6f) 等) 和氧化物 (如磁铁矿和石英) 此外, 流体可使地层中碳酸盐岩发生硅化 (图 5l、图 6d、6h), 尤其在断裂带, 受大气降水影响, 温度较低, 硅化充分。流体还可使花岗闪

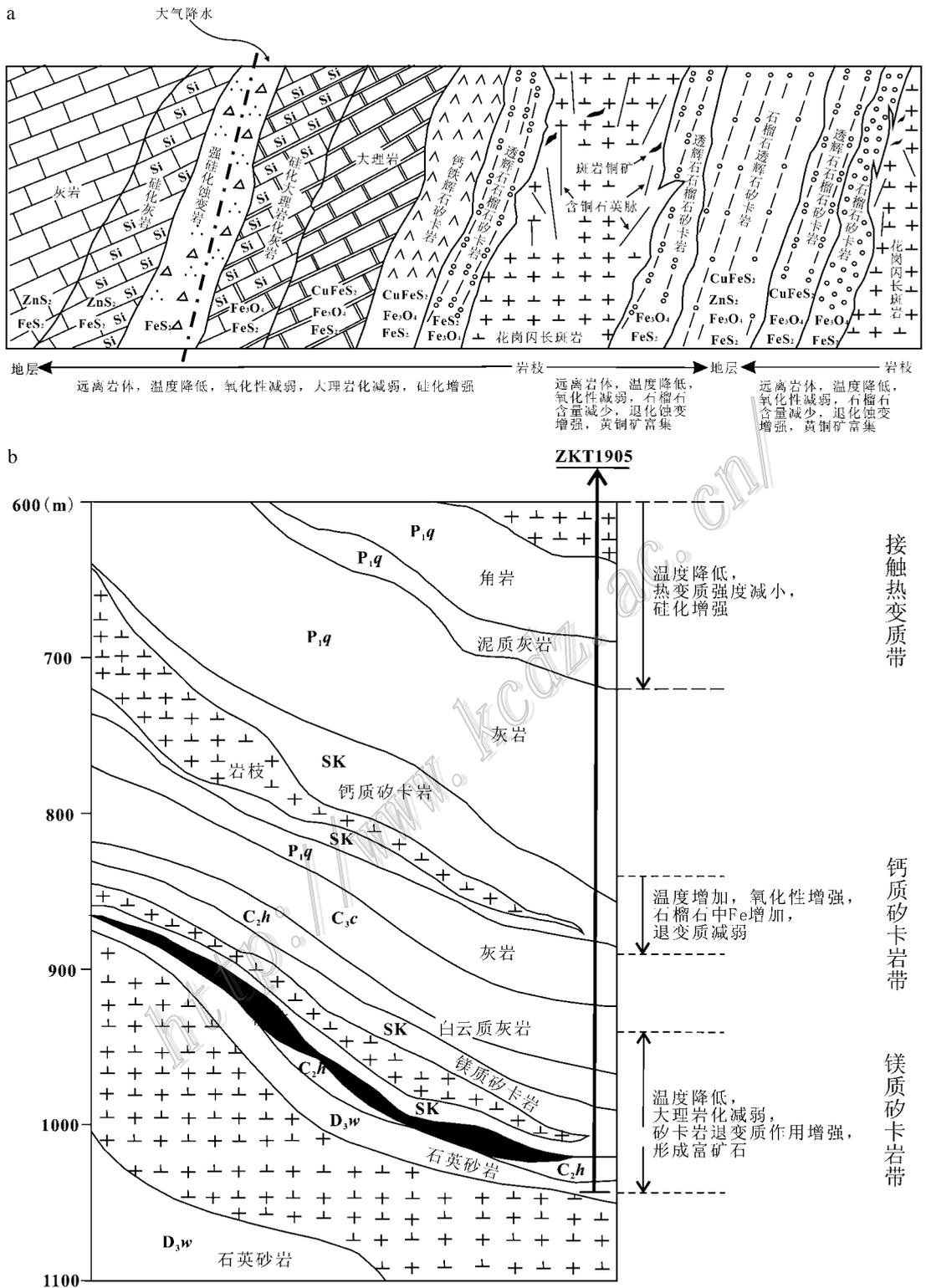


图 9 水平方向(a)及垂向(b)分带成因模式图

Fig. 9 Diagram for the genetic modal of horizontal zoning (a) and vertical zoning (b)

长斑岩发生绢云母化、黑云母化、硅化(图 4b), 以上流体交代过程的同时可有黄铁矿形成。当温度继续降低时, 流体中的 Cu、Zn、H₂S、CO₂ 等组分进入体系

中, 产生硫化物、碳酸盐, 它们既可交代斑岩中的矿物(图 4a), 形成含铜斑岩, 也可选择性交代早期矽卡岩矿物(图 5f、5g、图 6f), 形成含铜矽卡岩。黄铜

矿、斑铜矿多伴随于岩体或矽卡岩中矿物蚀变产生,而在碳酸盐建造(除大理岩化岩石外)中较少出现,这与成矿元素分析结果相一致。矽卡岩中闪锌矿交代黄铜矿(图5f)反映了闪锌矿产生的温度较后者低,时间上略晚。值得注意的是,铜山矿区地层属铜、铅、锌高丰度地球化学背景区(俞沧海,2001),主要赋矿层位为二叠系栖霞组和石炭系船山组、黄龙组,为印支期前正常的浅海-滨海沉积(周曙光,2003),故泥晶灰岩方解石微晶中的闪锌矿、黄铁矿(图5i)及深部石英砂岩中的黄铁矿(图6i)可能是浅海相喷流成因(唐俊华,2000),与岩浆流体无关。

水平剖面(图9a)距岩体较远的矽卡岩带温度相对较低,故在空间上,在距岩体较远的透辉石石榴子石矽卡岩(QS004-b2、IVP034)中,辉石和石榴子石明显被透闪石(图5e)和绿泥石交代(图5b),且有大量黄铜矿、闪锌矿沉淀(图5f);而在近岩体部位的矽卡岩中(QS005-b1),含水硅酸盐含量较少,铜含量降低。说明随着远离岩体,温度降低,有利于矽卡岩典型矿物的退化蚀变以及晚期金属硫化物的沉淀。在碳酸盐岩建造中,随着靠近大理岩,由于温度增加,氧化性增强,故原生磁铁矿、褐铁矿含量增加,而闪锌矿等硫化物减少,远离大理岩带的地层,由于温度较低,仅能受岩浆演化晚期流体影响而产生团块状硅化、碳酸盐化蚀变(图5i),强硅化蚀变岩带中金属硫化物较多(图5j),指示了断裂构造为硅化、矿化创造了有利的空间条件,灰岩可完全硅化蚀变为含黄铁矿交代石英岩(IVP010)。

钻孔上部,在含放射状红柱石角岩中 Cu 含量最大,说明 Cu 较多地富集于距岩体及地层均稍远的部位(图9b、图3,674.52m)。钻孔中部,地层为钙质灰岩,远离岩体部位温度较低,硅化显著。钻孔下部距岩体略远处,温度稍低,含橄榄石镁质矽卡岩可退化蚀变为蛇纹石镁质矽卡岩,且磁铁矿、黄铜矿交代显著(图6e);距岩体更远的部位温度较低,仅产生白云岩(图6g)、硅化白云质灰岩(图6h)等,黄铜矿含量降低。

4.4 晚退化蚀变阶段

晚期退化蚀变阶段表现为斑岩和矽卡岩中持续的水压致裂作用和低温热液活动过程(Calagari,2004)。流体产生的多期水压致裂作用使富石英-黄铁矿-黄铜矿相的热液渗滤于花岗闪长斑岩的裂隙中形成含矿热液脉(图4d),且成矿元素与硫化物成分分别指示含热液脉的斑岩矿石中 Cu 品位更高,热

液脉中的黄铜矿更富集 Cu 。另外,斑岩中的云母及矽卡岩中前期形成的硅酸盐矿物被低温矿物(如绿泥石、方解石、赤铁矿、白云石、粘土等)交代(图4b、4c、图5b、5c、图6f),大量富方解石或白云石质流体沿矽卡岩裂隙充填。方解石、赤铁矿的大量出现指示矽卡岩系统晚期酸性和氧化性均增强。

由此可见,铜矿化主要发生于早退化蚀变阶段的后期,形成含铜矽卡岩及含铜斑岩,并在晚退化蚀变阶段进一步富集,形成斑岩中的含铜热液脉。

5 结论

(1)铜山铜矿床产于氧化性较强的岩体与还原性较强的碳酸盐地层之间。水平方向,距岩体较近的灰岩可发生大理岩化,矽卡岩带多为富钙铁榴石的矽卡岩,距岩体较远的灰岩多发生硅化,矽卡岩带多为富透辉石或钙铁辉石的矽卡岩。退化蚀变及铜矿化多富集于距岩体较远的富辉石矽卡岩带及大理岩带。垂向上,上部为接触热变质带,中部及下部为矽卡岩带,分别为钙质矽卡岩带和镁质矽卡岩带。铜矿化主要富集于距岩体较远的云母红柱石角岩带和深部含蛇纹石镁质矽卡岩带。

(2)铜山含铜矽卡岩经历了进变期和退变期。进变期包括接触热变质阶段和进化交代阶段;退变期包括早退化蚀变阶段和晚退化蚀变阶段。铜矿化主要产生于早退化蚀变阶段的后期,且在晚退化蚀变阶段进一步富集于斑岩低温热液脉中。

志谢 在野外考察和样品采集中,李品杰、徐刚给予了很大协助与支持;本文实验分析工作得到了舒桂明、王长秋、尹京武、郝金华、陈华等的帮助;两位匿名审稿人认真细致地审阅了本文,并提出宝贵修改意见,在此一并深表感谢!

References

- Calagari A A. 2004. Fluid inclusion studies in quartz veinlets in the porphyry copper deposit at Sungun, East-Azarbaidjan, Iran[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 23: 179-189.
- 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: 423-438.
- Candela P A and Piccoli P L. 1995. Model ore-metal partitioning from melt into vapor and vapor/brine mixtures[A]. In: Thompson J F

- H ed. *Magmas, fluids and ore deposits* [C]. Mineralogical Association of Canada Short Course Handbook , 23 : 101-127.
- Cheng S B , Pang Y C and Cao L. 2008. The genesis of Mengya 'a skarn-type lead-zinc deposit , Tibet [J]. *Geology and Mineral Resources of South China* , 3 : 50-56 (in Chinese with English abstract).
- Ciobanu C L and Cook N J. 2003. Skarn textures and a case study : The Ocna de Fier-Dognecea orefield , Banat , Romania [J]. *Ore Geology Reviews* , 24 : 315-370.
- Dai J Z , Mao J W , Zhao C S , Xie G Q and Wang Y T. 2008. New U-Pb and Re-Os age data and the geodynamic setting of the Xiaojiayingzi Mo (Fe) deposit , western Liaoning Province , Northeastern China [J]. *Ore Geology Reviews* , 35 : 235-244.
- Einaudi M T , Meinert L D and Newberry R J. 1981. Skarn deposits [J]. *Economic geology 75th anniversary volume* , 317-391.
- Grammatikopoulos T A and Clark A H. 2006. A comparative study of wollastonite skarn genesis in the Central Metasedimentary Belt , southeastern Ontario , Canada [J]. *Ore Geology Reviews* , 29 : 146-161.
- Guilbert J M and Lowell J D. 1974. Variations in zoning patterns in porphyry copper deposits [J]. *Canadian Institute of Mining and Metallurgy Bulletin* , 67 : 99-109.
- Hedequist J W , Arribas Jr A and Renolds T J. 1998. Evolution of an intrusion - centered hydrothermal system. Far southeast - Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits , Philippines [J]. *Econ. Geol.* , 93 : 373-404.
- Hellingwerf R H. 1984. Paragenetic zoning and genesis of Cu-Zn-Fe-Pb-As sulfide skarn ores in a Proterozoic Rift Basin , Gruvasen , Western Bergslagen , Sweden [J]. *Econ. Geol.* , 79 : 696-715.
- Hietanen A. 1962. Metasomatic metamorphism in western Clearwater County , Idaho. U. S. [J]. *Geological Survey Professional Paper 344-A* , A1-A166.
- James A H. 1976. Zoned alteration in limestone at porphyry copper deposits , Ely , Nevada [J]. *Econ. Geol.* , 71 : 488-512.
- Karimzadeh S A and Moayyed M. 2002. Granite-and gabbrodiorite-associated skarn deposits of NW Iran [J]. *Ore Geology Review* , 20 : 127-138.
- Li L P and Shao J L. 1994. Geochemical characteristics of Tongshan copper ore deposit , Guichi , Anhui [J]. *Geology and Prospecting* , 3 : 9 -13 (in Chinese with English abstract).
- Liu L M , Zhao Y L and Zhao X L. 2009. Computational modeling on coupled MTH processes for forming skarn Cu deposits and its significance for deep ore exploration : Examples from Tongling-Anqing district , China [J]. *Journal of Geochemical Exploration* , 101 : 63.
- Liu W H , Xu W X , Dai T G and Li H. 2006. Isotope geochemistry of the Yejiwei deposit in the Shizhuyuan W-Sn ore field in Hunan province [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 22 (10) : 2517-2524 (in Chinese with English Abstract).
- Ma Z D and Shan G X. 1997. Geological-geochemical studies of the formation mechanism of " integral whole of multiplaces " large and super-large copper deposites in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Mineral Deposits* , 16 (3) : 225-234 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W , Shao Y J , Xie G Q , Zhang J D and Chen Y C. 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).
- Mei Y X , Mao J W , Li J W and Du A D. 2005. Re-Os dating of molybdenite from stratiform skarn orebodies in the Datuanshan copper deposit , Tongling , Anhui Province , and its geological significance [J]. *Acta Geoscientica Sinica* , 26 (4) : 327-331 (in Chinese with English abstract).
- Meinert L D. 1992. Skarns and skarn deposits [J]. *Geoscience Canada* , 19 : 145-162.
- Meinert L D , Hedenquist J W , Satoh H and Matsuhisa Y. 2003. Formation of anhydrous and hydrous skarn in Cu-Au ore deposits by magmatic fluids [J]. *Econ. Geol.* , 98 : 147-156.
- Meinert L D , Dipple G M and Nicolescu S. 2005. World skarn deposits [J]. *Econ. Geol.* , 100 : 299-336.
- Nicolescu S , Cornell D H , Sodervall U and Odelius H. 1998. Secondary ion mass spectrometry analysis of rare earth elements in garnet and other skarn related silicates [J]. *European Journal of Mineralogy* , 10 : 251-259.
- Ochiai K , Tagiri M and Tanaka H. 1993. Behavior of the rare earth elements during the skarn formation at the Kamaishi mine , Japan [J]. *Resource Geology* , 43 : 291-300.
- Qiu R L. 1991. Multistage carbonatization and mineral geochemistry of a skarn-type copper deposit at Tongshan , Guichi [J]. *Chinese Journal of Geochemistry* , 10 (1) : 58-67.
- Shinohara H and Kazahaya K. 1995. Degassing processes related to magmchamber crystallization [A]. In : Thompson J F H , ed. *Magmas , fluids and ore deposits* [C]. Mineralogical Association of Canada Short Course Handbook , 23 : 47-70.
- Singoyi B and Zaw K. 2000. A petrological and fluid inclusion study of magnetite-scheelite skarn mineralization at Kara , Northwestern Tasmania : Implications for ore genesis [J]. *Chemical Geology* , 173 : 239-253.
- Tang J H. 2000. Genesis and basic characteristics of layered copper ore deposit in middle-lower reaches of Yangtze river [J]. *Mineral Resources and Geology* , 14 (76) : 76-80 (in Chinese with English abstract).
- Titely S R. 1973. Pyrometasomatism-an alteration type [J]. *Econ. Geol.* , 68 : 1326-1328.
- Vidale R. 1969. Metasomatism in a chemical gradient and the formation of calc-silicate bands [J]. *American Journal of Science* , 267 : 857-874.
- Wang X , Xiao R G , Yang L P and Wang B. 2008. Genesis of garnet

- skarn of the Xiekeng Cu-Au deposit in Qinghai province[J]. *Geoscience*, 22(5): 733-742 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y. 2003. Ore-controlling character of F1 fracture zone of Tongshan copper deposit[J]. *Mineral Resources and Geology*, 17(4): 530-532 (in Chinese with English abstract).
- Xia Y F. 1999. Geological characteristics and ore-forming condition of stratabound skarn-type ore deposits in Tongling district[J]. *Mineral Resources and Geology*, 13(6): 338-342 (in Chinese with English abstract).
- Yu C H and Yuan X M. 1999. The petrochemical and geochemical characteristics of the Tongshan intrusive, Guichi[J]. *Geology of Anhui*, 9(3): 194-197 (in Chinese with English abstract).
- Yu C H. 2001. Study on the genesis of Tongshan copper ore deposit in Guichi[J]. *Geology and Prospecting*, 37(2): 12-16 (in Chinese with English abstract).
- Zharikov V A. 1970. Skarn[J]. *International Geology Review*, 12: 541-559.
- Zheng J M, Xie G Q, Chen M H, Wang S M, Ban C Y and Du J L. 2007. Pluton emplacement mechanism constraint on skarn deposit: A case study of skarn Fe deposits in Handan-Xingtai area[J]. *Mineral Deposits*, 26(4): 481-486 (in Chinese with English abstract).
- Zhou S G. 2003. Matter source of the Tongshan deposit and its mineralization[J]. *Mineral Resources and Geology*, 17(5): 610-612 (in Chinese with English abstract).
- Zhou T F, Yuan F, Yue S C, Liu X D, Zhang X and Fan Y. 2005. Geochemistry and evolution of ore-forming fluids of the Yueshan Cu-Au skarn-and vein-type deposits, Anhui Province, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 31: 279-303.
- Zhou Y E, Zhang Y Y and Shu Q S. 1996. The geochemistry and genesis of the Tongshan copper ore deposit, Anhui[J]. *Geology of Anhui*, 6(2): 54-68 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Y E. 1997. The characteristics of REEs in some geological bodies of the Tongshan copper ore deposit and their implications[J]. *Geology of Anhui*, 7(2): 51-58 (in Chinese with English abstract).
- Zuo R G, Cheng Q M, Agterberg F P and Xia Q L. 2008. Evaluation of the uncertainty in estimation of metal resources of skarn tin in Southern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 35: 415-422.
- 附中文参考文献
- 程顺波, 庞迎春, 曹亮. 2008. 西藏蒙亚啊砂卡岩铅锌矿床的成因探讨[J]. *华南地质与矿产*, 3: 50-56.
- 李立平, 邵洁涟. 1994. 贵池铜山铜矿微量元素地球化学特征研究[J]. *地质与勘探*, 3: 9-13.
- 刘悟辉, 徐文炘, 戴塔根, 李衡. 2006. 湖南柿竹园钨锡多金属矿田野鸡尾矿床同位素地球化学研究[J]. *岩石学报*, 22(10): 2517-2524.
- 马振东, 单光祥. 1997. 长江中下游地区多位一体大型、超大型铜矿形成机制的地质、地球化学研究[J]. *矿床地质*, 16(3): 225-234.
- 毛景文, 邵拥军, 谢桂青, 张建东, 陈毓川. 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.
- 梅燕雄, 毛景文, 李进文, 杜安道. 2005. 安徽铜陵大团山铜矿床层状砂卡岩矿体中铼钼矿 Re-Os 年龄测定及其地质意义[J]. *地球学报*, 26(4): 327-331.
- 唐俊华. 2000. 长江中下游地区层状铜矿床基本特征和成因[J]. *矿产与地质*, 14(76): 76-80.
- 王星, 肖荣阁, 杨立朋, 王斌. 2008. 青海谢坑铜金矿床石榴子石砂卡岩成因研究[J]. *现代地质*, 22(5): 733-742.
- 王勇. 2003. 铜山铜矿 F1 断裂带构造控矿特征分析[J]. *矿产与地质*, 17(4): 530-532.
- 夏元法. 1999. 铜陵地区层控砂卡岩型矿床地质特征和成矿条件[J]. *矿产与地质*, 13(6): 338-342.
- 俞沧海, 袁小明. 1999. 贵池铜山岩体岩石化学与地球化学特征[J]. *安徽地质*, 9(3): 194-197.
- 俞沧海. 2001. 贵池铜山铜矿床成因探讨[J]. *地质与勘探*, 37(2): 12-16.
- 郑建民, 谢桂青, 陈懋弘, 王三民, 班长勇, 杜金利. 2007. 岩体侵位机制对砂卡岩型矿床的制约——以邯邢地区砂卡岩铁矿为例[J]. *矿床地质*, 26(4): 481-486.
- 周曙光. 2003. 安徽铜山矿床成矿物质来源及成矿作用探讨[J]. *矿产与地质*, 17(5): 610-612.
- 周余谔, 张宜勇, 苏其树. 1996. 安徽铜山铜矿床地球化学特征及其成因[J]. *安徽地质*, 6(2): 54-68.
- 周余谔. 1997. 安徽铜山铜矿床有关地质体中稀土元素特征及其地质意义[J]. *安徽地质*, 7(2): 51-58.