

江西武山铜矿床形成过程:来自岩相学和矿物学的证据^{*}

东 前^{1,2}, 李子颖¹, 杜杨松², 范洪海¹, 张 闯¹, 纪宏伟¹, 王剑波¹

(1 核工业北京地质研究院, 北京 100029; 2 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要 江西武山铜矿床是长江中下游地区具有代表性的叠加复合矿床之一。文章选取武山铜矿床典型剖面为研究对象, 在野外地质调研和室内岩相学研究的基础上, 识别出层状硫化物型、层状矽卡岩型和接触交代矽卡岩型三类矿体, 及相对应的3种类型矿石。3类矿石在矿物组合、结构构造和矿物学特征等方面有明显差异, 分别显示出原生沉积、叠加改造和岩浆热液成因特征。选择代表性脉石矿物和矿石矿物进行矿物化学研究, 认为石榴子石是岩浆期后热液渗透交代作用的产物, 层状矽卡岩中石榴子石相对富Fe, 而接触交代矽卡岩中石榴子石相对富Al; 矿区内存在2类黄铁矿, 即胶状黄铁矿和粒状黄铁矿, 分别对应原生沉积成因和岩浆热液交代成因; 磁铁矿是与矽卡岩有关的岩浆期后热液交代作用的产物, 层状矽卡岩中磁铁矿相对富MgO和MnO, 贫Al₂O₃, 受地层影响明显, 而接触交代矽卡岩中磁铁矿相对富Al₂O₃, 贫MgO和MnO, 受岩浆岩影响明显。武山铜矿床的形成经历了原生沉积作用、岩浆热液交代作用及叠加改造作用等复杂成矿过程。

关键词 地质学; 岩相学; 矿物学; 原生沉积作用; 热液交代作用; 叠加改造作用; 江西武山铜矿床

中图分类号:P618.51

文献标志码:A

Formation process of Wushan copper deposit in Jiangxi Province: Evidence from petrography and mineralogy

DONG Qian^{1,2}, LI ZiYing¹, DU YangSong², FAN HongHai¹, ZHANG Chuang¹, JI HongWei¹ and WANG JianBo¹

(1 Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 2 School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract

The Wushan deposit is a typical overprinting compound copper deposit along the Middle and Lower Yangtze River metallogenic belt. A detailed geological and mineralogical study of this deposit was carried out, with the emphasis placed on the ore-forming process. Geological investigation and petrographic observation indicate the occurrence of stratabound sulfide, stratabound skarn, and contact metasomatic skarn orebodies and the existence of three corresponding types of ores. The three types of ores are obviously different in mineral assemblage, texture and structure, and mineral typomorphy, and display signatures of syn-sedimentary, syn-sedimentary with magmatic hydrothermal, and magmatic hydrothermal activities, respectively. The mineralogical chemistry characteristics indicate that the skarn is a product of infiltration metasomatism. The colloidal pyrite is characterized by primary sedimentary signatures, and the grained pyrite, chalcopyrite, and magnetite by magmatic hydrothermal metasomatic signatures. The magnetite in stratabound skarn has high content of MgO and MnO, and low content

* 本文得到中国地质调查局项目(编号:12120113069900)和国家自然科学基金项目(编号:40672045)联合资助

第一作者简介 东 前,男,1987年生,博士,矿物学、岩石学、矿床学专业。Email:dongqian136@126.com

收稿日期 2018-01-20; 改回日期 2018-06-15。张绮玲编辑。

of Al_2O_3 , whereas the magnetite in contact metasomatic skarn has high content of Al_2O_3 and low content of MgO and MnO . In summary, the Wushan copper deposit might have experienced two mineralization periods and three types of mineralization, i.e., syn-sedimentary mineralization, magmatic hydrothermal mineralization and syn-sedimentary with magmatic hydrothermal mineralization.

Key words: geology, petrography, mineralogy, syn-sedimentary mineralization, magmatic hydrothermal mineralization, overprinting mineralization, Wushan copper deposit in Jiangxi Province

江西武山铜矿床位于长江中下游铜铁硫金多金属成矿带西部的九江-瑞昌(九瑞)铜多金属矿集区内,是九瑞地区典型的叠加复合矿床之一。前人对该矿床进行了较为详细的研究,在矿床地质特征和矿床成因(孟良义等,1982;王忠玲,1987;黄恩邦等,1990;王文斌等,1994;董平等,1995;孟良义,1997;贾伟,1999;徐唐光,2007;赵劲松等,2007;孔凡斌等,2012)、成岩(矿)时代及成岩(矿)作用(丁昕等,2005;李进文等,2007;蒋少涌等,2008,2011;东前等,2011;Yang et al., 2011)、控矿构造(蒋少涌等,2010;李颖等,2010)、成矿流体(孟良义等,1983;赵劲松等,2003;东前等,2015)等方面取得了丰硕的研究成果。然而,对于武山铜矿床的成因仍存在争议。目前有2种代表性观点:一种是同生沉积-叠加改造形成矿观点(徐克勤等,1978;顾连兴,1984;顾连兴等,1986;常印佛等,1991;董平等,1995;王文斌等,1988,1994;Zhai et al., 1996;蒋少涌等,2008,2010,2013;翟裕生等,2009;孔凡斌等,2012),认为矿床属于海西期同生沉积所形成的块状硫化物矿床,受到了燕山期花岗质岩浆及其热液的叠加改造;另一种是岩浆热液成矿观点(黄恩邦等,1990;崔彬等,1995;Pan et al., 1999;毛景文等,2004),认为矿床属于与燕山期花岗质岩浆及其热液活动有关的矽卡岩型,而海西期沉积作用仅形成硫化物矿坯,参与到岩浆热液成矿系统中。这2种观点的分歧主要在于对海西期同生沉积成矿作用和燕山期岩浆热液成矿作用在矿床形成过程中的贡献是什么。鉴于此,本文开展了详尽的岩相学观察和矿物学研究工作,从矿床中代表性矿物的组构及成分特征角度探讨矿物成因,以期对武山铜矿床的成因机理研究提供一些新的证据。

1 矿床地质背景

武山铜矿床位于长江中下游成矿带九瑞矿集区中部(图1)。矿区内地层志留系到三叠系以海相碳酸盐岩和碎屑岩为主的地层,缺失下石炭统(图2a)。

一系列NE向和NW向的断层交汇部位为岩浆的侵位及成矿热液活动提供了空间,特别是NEE向层间滑脱带是矿区最主要的控岩(矿)构造,为成矿流体的迁移和卸载提供了通道和空间。区内仅见燕山期侵入岩(图1b),地表出露面积约 0.6 km^2 ,多为深源浅成小型侵入体,其中出露于矿区南部的武山岩体与成矿关系密切。该岩体在平面上呈近椭圆形(图2a),在剖面上呈喇叭状(图2b),岩石类型为花岗闪长斑岩,侵位年龄介于140~148 Ma之间(顾连兴,1987;包家宝等,2002;丁昕等,2005;Li X H et al., 2010; Yang et al., 2011)。

1.1 矿体特征

武山铜矿床的矿体产出主要受层间断裂和接触带构造控制,按其空间产出位置分为南、北矿带。矿体类型主要有层状硫化物型、层状矽卡岩型和接触交代矽卡岩型3类矿体(图2a,b)。前两者主要分布于上泥盆统五通组和上石炭统黄龙组之间的层间滑脱带构造内,其中远离岩体一侧发育层状硫化物型矿体,靠近岩体一侧发育层状矽卡岩型矿体。2类矿体总体与地层产状一致,局部矿体有穿层、切割围岩现象,但整体受层间挤压断裂带的控制,矿体倾向SE165°,倾角56°~64°,矿体水平延伸近2700 m,垂向延伸93~1042 m不等,平均厚度16.8 m(图2a)。接触交代矽卡岩型矿体主要分布于花岗闪长斑岩与围岩接触带构造内,产状随接触带产状变化而变化,矿体水平围绕岩体周围分布,长度近2000 m,垂向延伸达2150 m,平均厚度14.5 m(图2b)。

1.2 蚀变分带特征

武山矿区主矿体由一系列的层状硫化物型矿体、层状矽卡岩型矿体和接触交代矽卡岩型矿体(图2)组成。

层状硫化物型矿体的蚀变分带特征:如49线-210 mW10穿脉中层状硫化物型矿体的蚀变分带所示,从五通组砂岩经黄龙组白云质灰岩到栖霞组灰岩,矿石类型依次变化为绢英岩化层状网脉状含铜黄铁矿矿石→厚层状含铜黄铁矿矿石→硅化纹层状含铜黄铁矿矿石→硅化碳酸盐化角砾状含铜黄

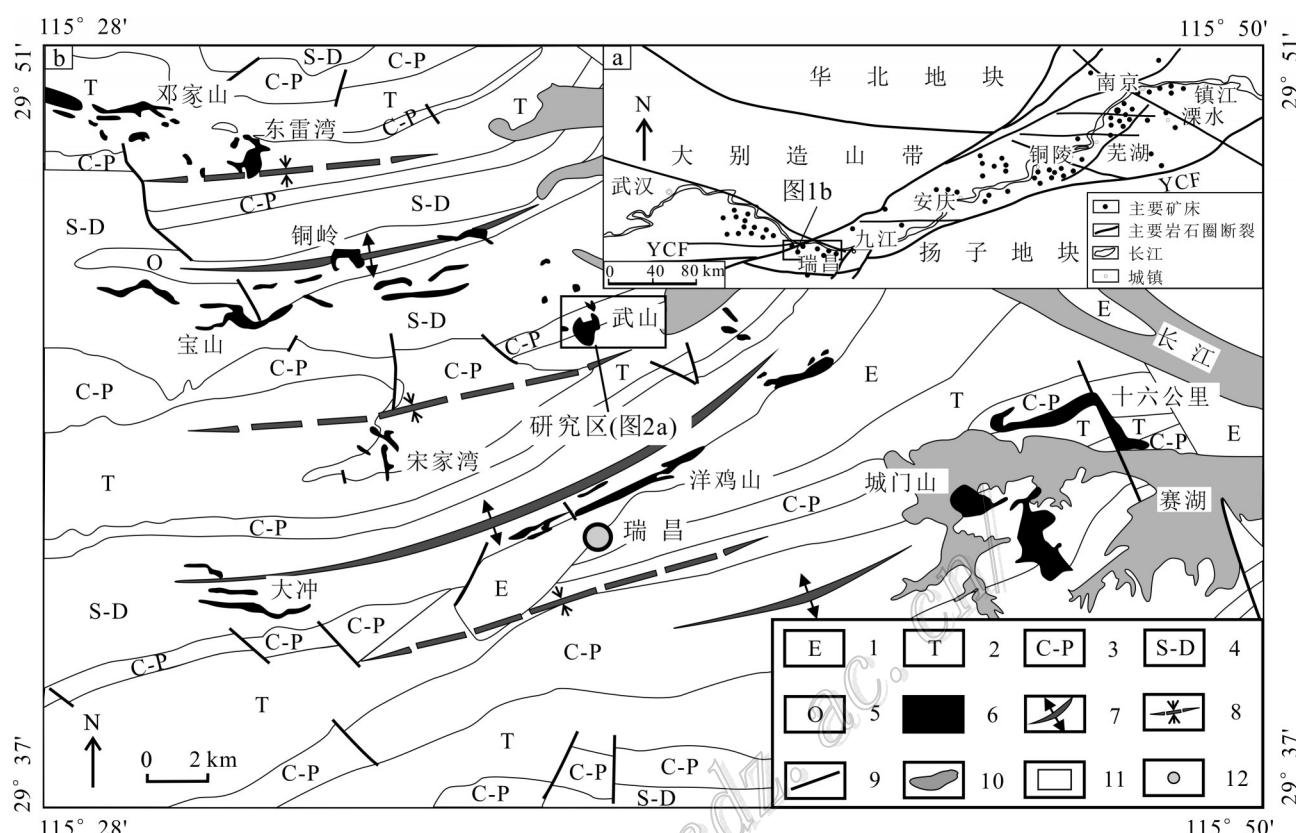


图1 九江-瑞昌矿集区构造(a)与地质(b)略图(据Yang et al., 2011修编)

1—古近系粉砂岩、泥岩;2—三叠系灰岩;3—二叠系—石炭系灰岩;4—泥盆系—志留系砂岩;5—奥陶系灰岩;6—燕山期花岗岩;
7—背斜;8—向斜;9—断裂;10—河流;11—研究区;12—地名

Fig. 1 Sketch tectonic (a) and geological (b) map of the Jiujiang—Ruichangore concentration area (modified after Yang et al., 2011)

1—Paleogene sandstone and mudstone; 2—Triassic limestone; 3—Permian and Carboniferous limestone; 4—Devonian and Silurian sandstone;
5—Ordovician limestone; 6—Granitoid intrusion; 7—Anticline; 8—Syncline; 9—Fault; 10—Lake and river; 11—Study area; 12—Place name

铁矿矿石→碳酸盐化纹层状含铜黄铁矿矿石(图3)。在本矿区晚泥盆世五通组和晚石炭世黄龙组之间存在一个岩性差异面,这套沉积间断面为成矿提供了有利的导矿和储矿空间。

层状矽卡岩型矿体的蚀变分带特征:以20线-310 m S4穿脉中的水平钻孔中的层状矽卡岩型矿体的蚀变分带为例,其矿化蚀变具有明显的水平分带特征,从矿体到大理岩依次为:石榴子石化块状含铜磁铁矿矿石→蛇纹石化透闪石化纹层状含铜磁铁矿矿石→硅化纹层状含铜磁铁矿黄铁矿矿石→硅化磁铁矿化大理岩(图4)。其中,从矿体到大理岩,成矿流体的温度逐渐降低,不同类型岩石之间呈渐变过渡关系。本区矿化分带具有明显的按不同矿物-化学组成的递变式矿物分带,是含矿热液性质改变和运移通道的反映。

接触交代矽卡岩型矿体的蚀变分带特征:以75

线-310 m S4穿脉中接触交代矽卡岩型矿体的蚀变分带为例,该类型矿体具有明显的水平分带特征,从矿体顶板至底板依次为:大冶组薄层灰岩→透辉石化大理岩→含铜透辉石矽卡岩→含铜石榴子石矽卡岩→石榴子石化花岗闪长斑岩→花岗闪长斑岩(图5)。本区矿化分带总体上显示出Si、Al、Fe等元素由岩体向大理岩方向运移,而Ca向岩体方向运移的双交代特征,具有明显的按不同矿物-化学组成的递变式矿物分带,是含矿热液性质改变和运移通道的反映。

2 样品采集与分析方法

2.1 样品采集

用于岩相学观察和矿物学分析的样品分别采自井下-210 m 中段及水平钻孔(样品号W10、wsh003、

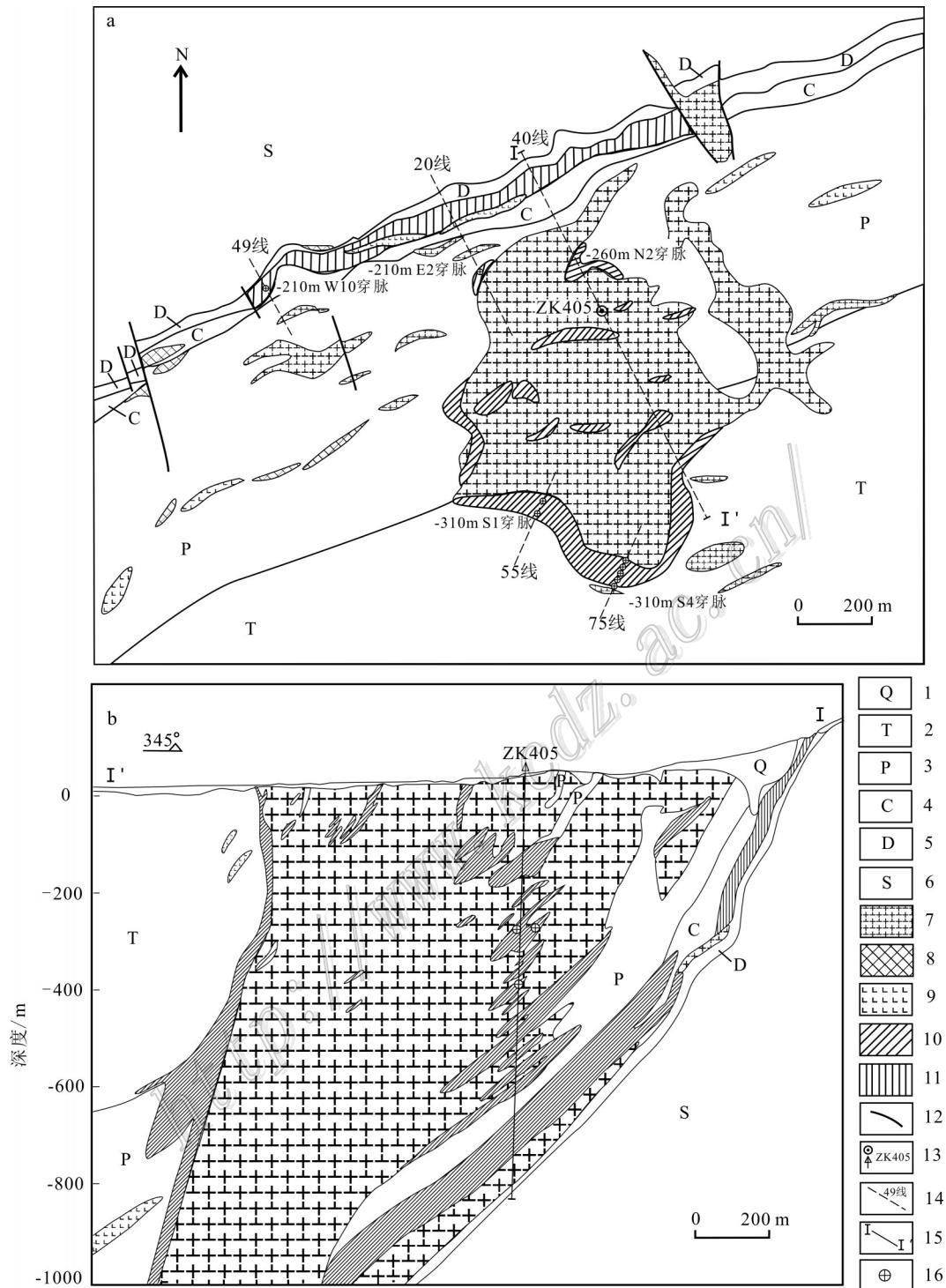


图2 江西武山铜矿矿区平面地质图(a)和40勘探线剖面图(b)(据Yang et al., 2011修编)

1—第四系沉积物;2—三叠系灰岩;3—二叠系灰岩;4—石炭系灰岩;5—泥盆系砂岩;6—志留系砂岩;7—花岗闪长斑岩;8—石英闪长玢岩;9—煌斑岩;10—矽卡岩及矿体;11—层状矿体;12—断裂;13—钻孔及编号;14—勘探线及编号;15—剖面线及编号;16—采样点

Fig. 2 Geological map (a) and geolocical section along No. 40 exploration line (b) of the Wushan copper deposit
(modified after Yang et al., 2011)

1—Quaternary Sediment; 2—Triassic limestone; 3—Permian limestone; 4—Carboniferous limestone; 5—Devonian sandstone; 6—Silurian sandstone; 7—Granodiorite porphyry; 8—Quartz diorite—porphyry; 9—Lamprorphyre; 10—Skarn orebody; 11—Stratiform orebody; 12—Fault; 13—Drill hole and its serial number; 14—Exploration line and its serial umber; 15—Section line and number; 16—Sampling site

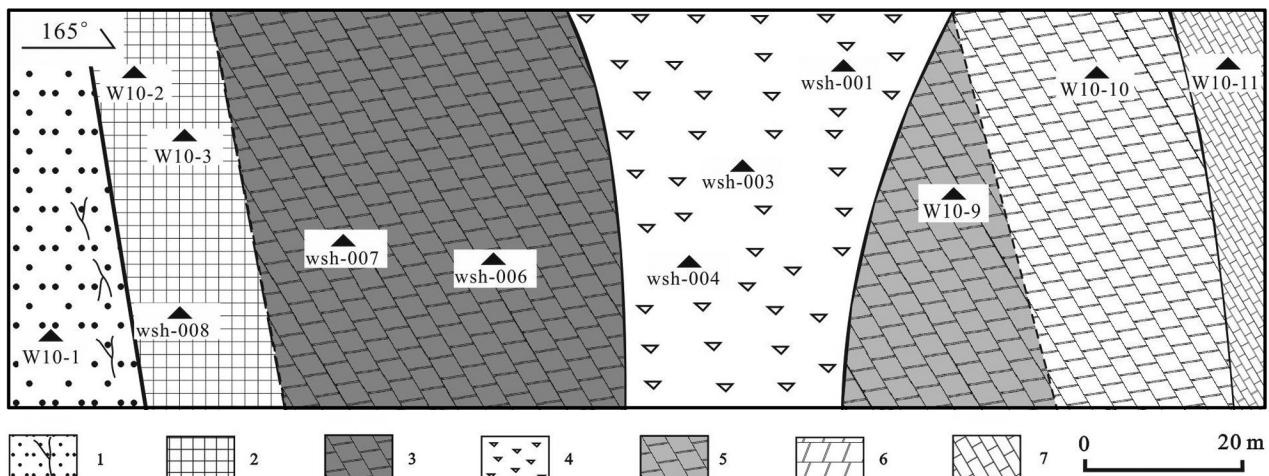


图3 武山铜矿层状硫化物型矿体的蚀变分带及采样位置图

1—绢英岩化网脉状矿化石英砂岩;2—厚层状含铜黄铁矿矿石;3—硅化纹层状含铜黄铁矿矿石;4—硅化碳酸盐化角砾状含铜黄铁矿矿石;5—碳酸盐化纹层状含铜黄铁矿矿石;6—白云质灰岩;7—碳质灰岩

Fig.3 Schematic map of alteration zoning and sampling location of stratabound sulfide orebodies in Wushan copper deposit
1—Stockwork mineralized quartz sandstone with phyllitic alteration; 2—Thick-bedded copper-carried pyrite ore; 3—Laminated copper-carried pyrite ore with silication; 4—Brecciated copper-carried pyrite ore with silication and carbonatization; 5—Laminated copper-carried pyrite ore with carbonatization; 6—Dolomitic limestone; 7—Carbonaceous limestone

wsh015、wsh020、wsh023、wsh027、wsh029、wsh030)、-260 m 中段(样品号 NS260-06、NS260-15、NS260-18、NS260-21、NS260-N2)、-310m 中段及水平钻孔(样品号 wsh048、wsh057、wsh064、wsh065、wsh073)(图3、图4、图5),共磨制了100余件光薄片。通过岩相学观察,选择了代表性的样品进行电子探针分析。

2.2 分析方法

所选代表性样品的显微结构构造观察在中国地质大学(北京)利用OLYMPUS BX51偏光显微镜上完成,利用显微数码照相机DP72完成图像采集

工作。所选代表性矿物的主量元素含量分析在核工业北京地质研究院分析测试中心完成,使用JXA-8100电子探针分析仪,工作条件为加速电压20 kV,束流10 nA,束斑大小为10 μm,标样采用天然矿物或合成金属国家标准,检出限为0.002%。

3 代表性矿物的岩相学特征

结合典型蚀变分带剖面,系统总结了武山铜矿3类矿体分别对应的矿石成因类型、矿物组合和结构构造特征。

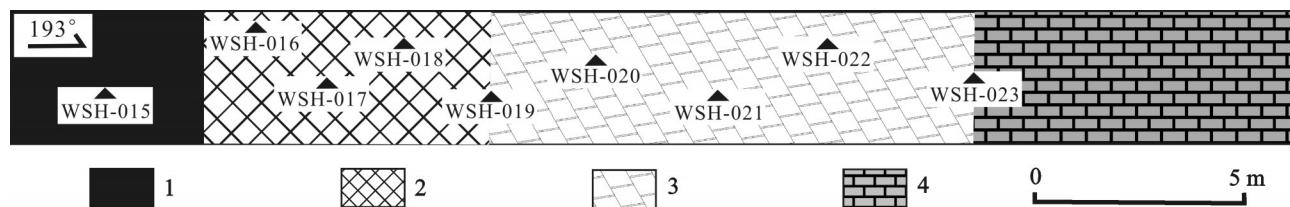


图4 武山铜矿层状矽卡岩型矿体的蚀变分带及采样位置图

1—石榴子石化块状含铜磁铁矿矿石;2—蛇纹石化透闪石化纹层状含铜磁铁矿矿石;3—硅化纹层状含铜磁铁矿黄铁矿矿石;4—硅化磁铁矿化大理岩

Fig.4 Schematic map of alteration zoning and sampling location of stratabound skarn orebodies in the Wushan copper deposit
1—Massive copper-carried magnetite ore with garnet alteration; 2—Laminated copper-carried magnetite ore with serpentinization and tremolite alteration; 3—Laminated copper-carried magnetite and pyrite ore with silication; 4—Marble with silication and magnetite alteration

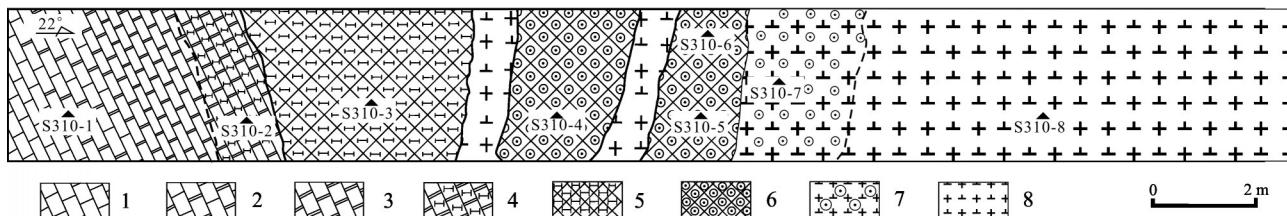


图5 武山铜矿接触交代矽卡岩型矿体的蚀变分带及采样位置图

1—大冶组灰岩;2—大冶组大理岩化灰岩;3—大冶组大理岩;4—透辉石化大理岩;5—含铜透辉石矽卡岩;6—含铜石榴石矽卡岩;
7—石榴石化花岗闪长斑岩;8—花岗闪长斑岩

Fig. 5 Schematic map of alteration zoning and sampling location metasomatic skarn orebodies in the Wushan copper deposit

1—Limestone in Daye Formation; 2—Limestone in Daye Formation with marbleization; 3—Marble in Daye Formation; 4—Marble with diopside alteration; 5—Copper-bearing diopside skarn; 6—Copper-bearing garnet skarn; 7—Granodiorite porphyry with garnet alteration; 8—Granodiorite porphyry

3.1 矿石的成因类型

根据矿石矿物组成、结构构造及其与含矿主岩的关系等,层状硫化物型矿石可分为4类:

(1) 层状网脉状含铜黄铁矿矿石(图6a):矿体赋存于早志留世纱帽组和晚泥盆世五通组砂岩中,相伴产出石英-绢云母蚀变带,形成层状网脉状矿带,与围岩没有明显的界线,通过铜品位测试才能划分出来,但矿石产出部位通常伴有强烈的硅化(罗钊生,1991)。虽然与花岗闪长斑岩有关的辉钼矿-石英细脉有时会叠加其上,但网脉状矿带并没有在碎屑岩与花岗闪长斑岩的接触带出现。矿石矿物主要由黄铁矿(约1.2%)、黄铜矿(约1.0%)、石英(约80%)、绢云母(约10%)及少量方铅矿和闪锌矿组成。

(2) 纹层状含铜黄铁矿矿石(图6b):矿体呈似层状、厚板状发育在下盘砂岩之上,层位不稳定,时有缺失现象。矿石的矿物组合较为简单,主要矿石矿物为黄铁矿(约25%)、胶黄铁矿(约4%),其次为黄铜矿(约2%),以及少量闪锌矿和方铅矿,脉石矿物主要为石英、方解石和白云石。

(3) 厚层状含铜黄铁矿矿石(图6c):为武山矿区北矿带主要的矿石类型,矿体呈厚板状透镜体产出,分布于纹层状含铜黄铁矿矿体之上,沿NEE方向延伸2700 m,面积0.54 km²。矿石矿物包括黄铁矿(约52%)、黄铜矿(约8%),其次为胶黄铁矿,及少量方铅矿和闪锌矿,脉石矿物为石英、白云石、方解石。

(4) 角砾状含铜黄铁矿矿石(图6d):矿体发育于黄龙组碳酸盐岩破碎带内。角砾成分主要为硫化物矿石和碳酸盐岩角砾,胶结物主要为碳酸盐岩,及

少量硫化物。矿石矿物主要有黄铁矿(30%)、黄铜矿(5%),及少量方铅矿和闪锌矿,脉石矿物主要为方解石、白云石、石英。

靠近岩体一侧的北矿带矿石为层状矽卡岩型矿石,受到岩浆热液的影响,更多的表现出热液特征,但也保留有少量沉积特征信息。矿石类型主要分为3类:

(1) 纹层状含铜磁铁矿黄铁矿矿石(图6e):矿体呈层状、厚板状,层位不稳定,时有缺失现象。主要矿石矿物为黄铁矿(约20%)、黄铜矿(约4%)、磁铁矿(约4%),其次为斑铜矿,脉石矿物主要为方解石、白云石、石英,其次为透闪石和蛇纹石等。

(2) 块状含铜磁铁矿矽卡岩矿石(图6f):属于层状矽卡岩型矿石。主要矿石矿物有磁铁矿(约25%)、黄铁矿(约3%)、黄铜矿(约2%),其次为斑铜矿,脉石矿物主要为石榴子石、透闪石等矽卡岩矿物,及少量方解石和石英。

(3) 纹层状含铜磁铁矿矽卡岩矿石(图6g):此为北矿带靠近岩体一侧特有的层状矽卡岩矿石类型,矿石矿物主要有磁铁矿(约25%)、斑铜矿(约3%)、黄铜矿(约2%),其次为黄铁矿,脉石矿物主要为透闪石和蛇纹石等镁质矽卡岩矿物,其次为石榴子石和绿帘石,及少量方解石和石英。

南矿带一侧的矿体,主要为接触交代矽卡岩矿体,受岩浆热液影响明显,仅发育含铜矽卡岩矿石。

含铜矽卡岩矿石:为武山矿床南矿带主要矿石类型,矿体单独呈透镜体、囊状体产出,整体围绕岩株发育为岩筒状矿体。矿石矿物主要有黄铜矿(约

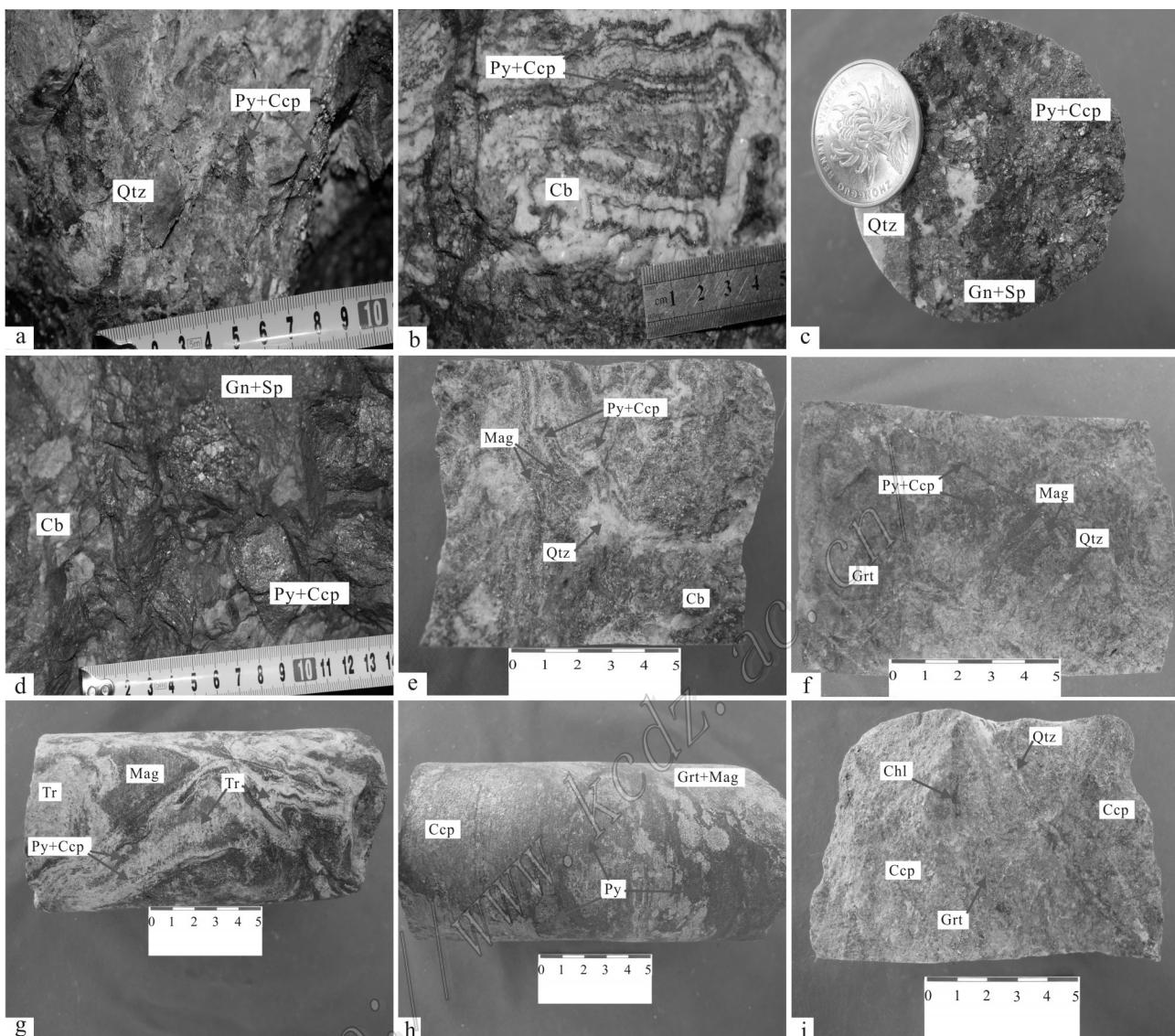


图6 江西武山铜矿床典型矿石照片

a. 纹层网脉状含铜黄铁矿矿石; b. 纹层状含铜黄铁矿矿石; c. 厚层状含铜黄铁矿矿石; d. 角砾状矿石; e. 纹层状含铜磁铁矿黄铁矿矿石; f. 块状含铜磁铁矿矽卡岩矿石; g. 纹层状含铜磁铁矿矽卡岩矿石; h. 含铜矽卡岩矿石, 黄铜矿等硫化物呈块状、团块状分布在石榴子石矽卡岩中; i. 含铜矽卡岩矿石, 黄铜矿呈细脉状、星点状分布在石榴子石矽卡岩中
Qtz—石英; Py—黄铁矿; Ccp—黄铜矿; Cb—碳酸盐岩; Gn—方铅矿; Sp—闪锌矿; Mag—磁铁矿; Grt—石榴子石; Tr—透闪石; Chl—绿泥石

Fig. 6 Typical ores in the Wushan copper deposit

a. Laminated and stockwork copper-carried pyrite ore; b. Laminated copper-carried pyrite ore; c. Thick-bedded copper-carried pyrite ore; d. Brecciated copper-carried pyrite ore; e. Laminated copper-carried magnetite and pyrite ore; f. Massive copper-carried magnetite ore; g. Laminated copper-carried magnetite ore; h. Massive copper-carried garnet skarn; i. Disseminated copper-carried garnet skarn

Qtz—Quartz; Py—Pyrite; Ccp—Chalcopyrite; Cb—Carbonate; Gn—Galena; Sp—Sphalerite; Mag—Magnetite; Grt—Garnet; Tr—Tremolite; Chl—Chlorite

15%)、黄铁矿(约15%),其次为磁铁矿(图6h),以及少量辉钼矿,脉石矿物主要为钙质矽卡岩矿物组合,如石榴子石、透辉石,其次为石英(图6i),以及少量硅灰石、绿泥石(图6i)。与层状矽卡岩型矿石不同

的是,该类矿石显示出典型的热液交代特征。

3.2 矿石的矿物组合

层状硫化物型矿石中的矿石矿物以黄铁矿、胶黄铁矿、黄铜矿为主,以及少量方铅矿和闪锌矿(图

7a), 脉石矿物以石英、白云石和方解石为主(图7), 少量绢云母(图7b)。矿物组合明显具有分带特征, 从中心到两侧, 主要的金属矿物组成依次为黄铜矿-黄铁矿→黄铁矿-胶黄铁矿-黄铜矿→方铅矿-闪锌矿-黄铁矿-黄铜矿→黄铁矿。

层状矽卡岩型矿石中的脉石矿物主要由矽卡岩矿物、石英、方解石和白云石组成, 根据矽卡岩矿物成分差别可分为镁质矽卡岩和钙质矽卡岩矿物组合, 其中镁质矽卡岩矿物主要由蛇纹石和透闪石(图8a)组成, 钙质矽卡岩矿物主要由石榴子石和绿帘石等矿物组成(图8b)。矿石矿物主要由磁铁矿、黄铁

矿、黄铜矿、斑铜矿及少量辉铜矿组成(图9c)。接触交代矽卡岩型矿石中的脉石矿物主要由钙质矽卡岩矿物及少量石英和方解石组成, 其中钙质矽卡岩主要由石榴子石、透辉石、硅灰石(图9a)组成, 另含少量透闪石(图9b)、阳起石(图9c)和绿帘石(图9d)等矿物。矽卡岩矿物间交代现象明显, 常见硅灰石交代早期形成的透辉石等矿物(图9a), 透辉石边部蚀变为透闪石(图9b), 绿帘石交代早期形成的石榴子石和透辉石(图9d)等。矿石矿物主要由黄铁矿、黄铜矿(图9f)组成, 另含少量磁铁矿(图9g)、辉钼矿等矿物。

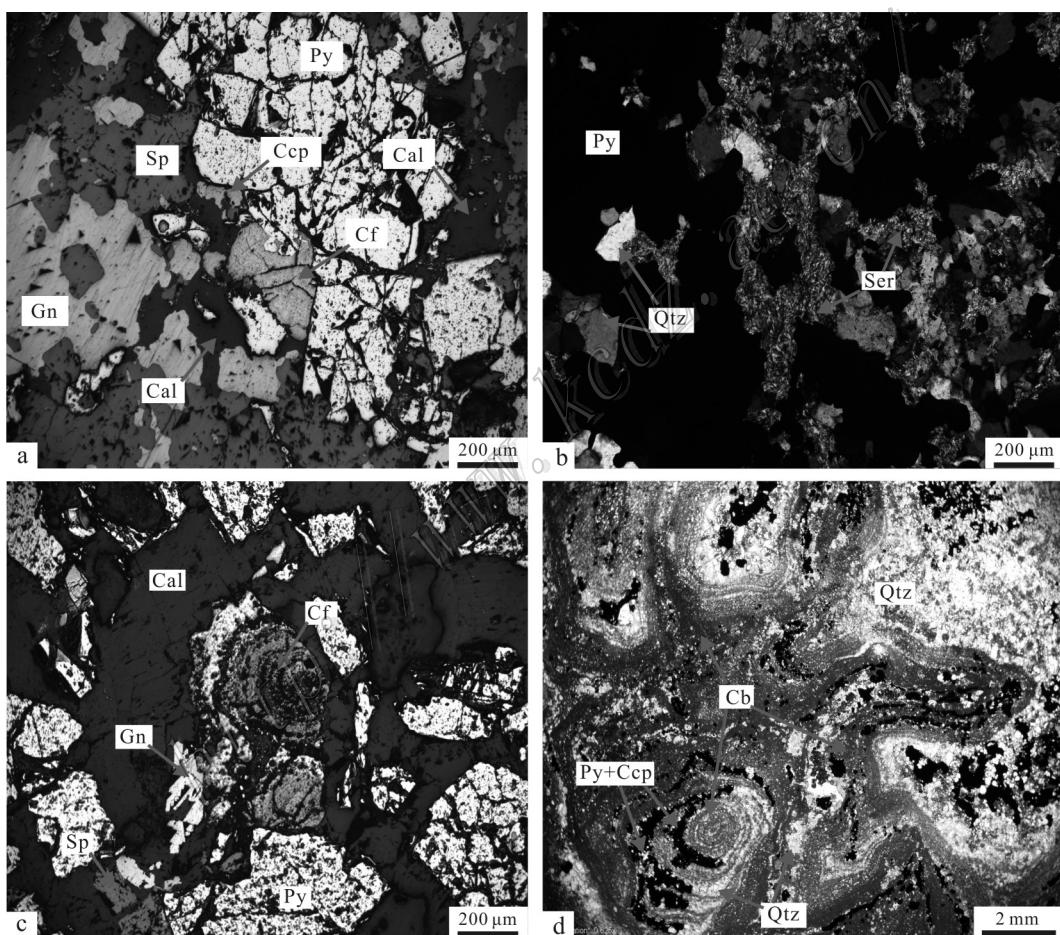


图7 江西武山铜矿层状硫化物型矿石的矿物组合(a,b)及矿石结构(c,d)显微照片

a. 由黄铁矿+胶黄铁矿+黄铜矿+闪锌矿+方铅矿+方解石组成, 见黄铁矿交代胶黄铁矿, 后期方解石穿切各种矿石矿物(反射光); b. 由石英+绢云母+黄铁矿组成, 见石英、绢云母交代黄铁矿呈残余结构(正交偏光); c. 胶黄铁矿呈鲕状结构, 见方铅矿和闪锌矿交代黄铁矿成交代残余结构(反射光); d. 硫化物顺纹层交代硅化的具纹层结构的隐晶质碳酸盐岩(透射光)

矿物代号:Cf—胶黄铁矿; Ser—绢云母; Cal—方解石; 其余同图6

Fig. 7 Microphotographs of minerals(a, b)and texture(c, d)of stratabound sulfide ore in the Wushan copper deposit

- a. Pyrite+colloform pyrite+chalcopyrite+sphalerite+galena+calcite; b. Quartz+sericite+pyrite; c. Oolitic colloform pyrite;
- d. Laminated carbonate replaced by pyrite and chalcopyrite

Mineral abbreviations: Cf—Colloform pyrite; Ser—Sericite; Cal—Calcite; Others as for Fig. 6

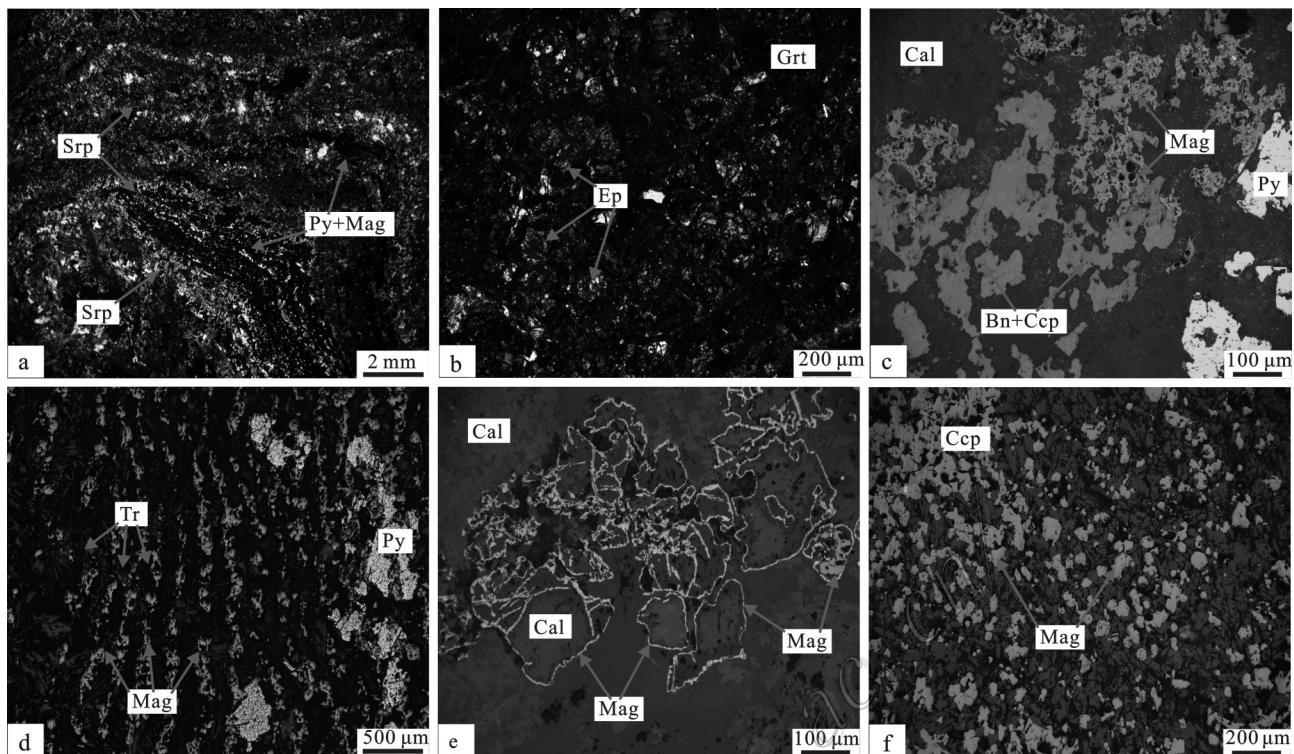


图8 江西武山铜矿层状矽卡岩型矿石的矿物组合(a~c)及矿石结构(d~f)显微照片

- a. 由蛇纹石+磁铁矿+黄铁矿组成,呈纹层状结构(透射光,+); b. 由绿帘石+石榴子石组成,粒状石榴子石集合体蚀变形成绿帘石(透射光,+); c. 由磁铁矿+斑铜矿+黄铜矿+黄铁矿+方解石组成,斑铜矿和黄铜矿呈固溶体分离结构,并交代磁铁矿呈残余结构(反射光);
d. 磁铁矿集合体和透闪石颗粒集合体互呈带状结构(反射光); e. 磁铁矿围绕重结晶方解石呈环边结构(反射光);
f. 浸染状结构磁铁矿(反射光)

矿物代号:Srp—蛇纹石;Ep—绿帘石;Bn—斑铜矿;其余同图6、图7

Fig. 8 Microphotographs of minerals(a~c)and texture(d~f)of stratabound skarn ore in the Wushan copper deposit

a. Serpentinite+magnetite+pyrite; b. Epidote+garnet; c. Magnetite+bornite+chalcopyrite;

e. The boundary of calcite replaced by magnetite; f. Disseminated magnetite

Mineral abbreviations: Srp—Serpentite; Ep—Epidote; Bn—Bornite; Others as for Fig. 6 and Fig. 7

3.3 矿石的结构构造

武山矿区各类型矿石中发育多种结构构造,既有标志沉积特征的结构构造,也有标志热液特征的结构构造,而且不同类型矿石中,发育的结构构造也各有异同。

层状硫化物型矿石发育沉积特征的结构构造,主要有鲕状结构、球粒结构和纹层状构造、角砾状构造。鲕状结构的矿石(图7c),虽受到后期硫化物热液的影响,但其鲕状特征反映出原生沉积特征;鲕状结构(图7c)和球粒状结构黄铁矿,分布于远离岩体一侧的纹层状含铜黄铁矿矿石(图7d)内,显示出同生沉积特点,是在开放环境下硫化物快速沉积的产物(王文斌等,1994;李文达,1997)。纹层状构造主要由硫化物矿物层与含硫化物的石英、碳酸盐等矿物组成,单个

纹层厚度介于1~3 mm之间,以矿石矿物和脉石矿物纹层交替出现为特征,在后期应力作用下,纹层状矿石发生变形,演变为揉皱构造(图6b)。一般情况下,矿石纹层主要由细粒黄铁矿和少量黄铜矿组成;脉石纹层主要由方解石和石英构成(图6b)。角砾状构造(图6d)的矿石出现于层状硫化物型矿石中,系同生角砾,因远离岩株,受后期热液改造影响较小而得以保存,对层状矿体的成因有重要的指示意义。

层状矽卡岩型矿石兼具沉积和热液两种特征的结构构造,由于受后期热液影响,早期沉积特征多数只呈假象保留。矿石主要发育有带状结构、环边结构、粒状结构、交代残余结构和纹层状构造。带状结构主要以磁铁矿集合体和透闪石或蛇纹石颗粒集合体组成各自条带交替出现为特征(图8d),虽结构显示

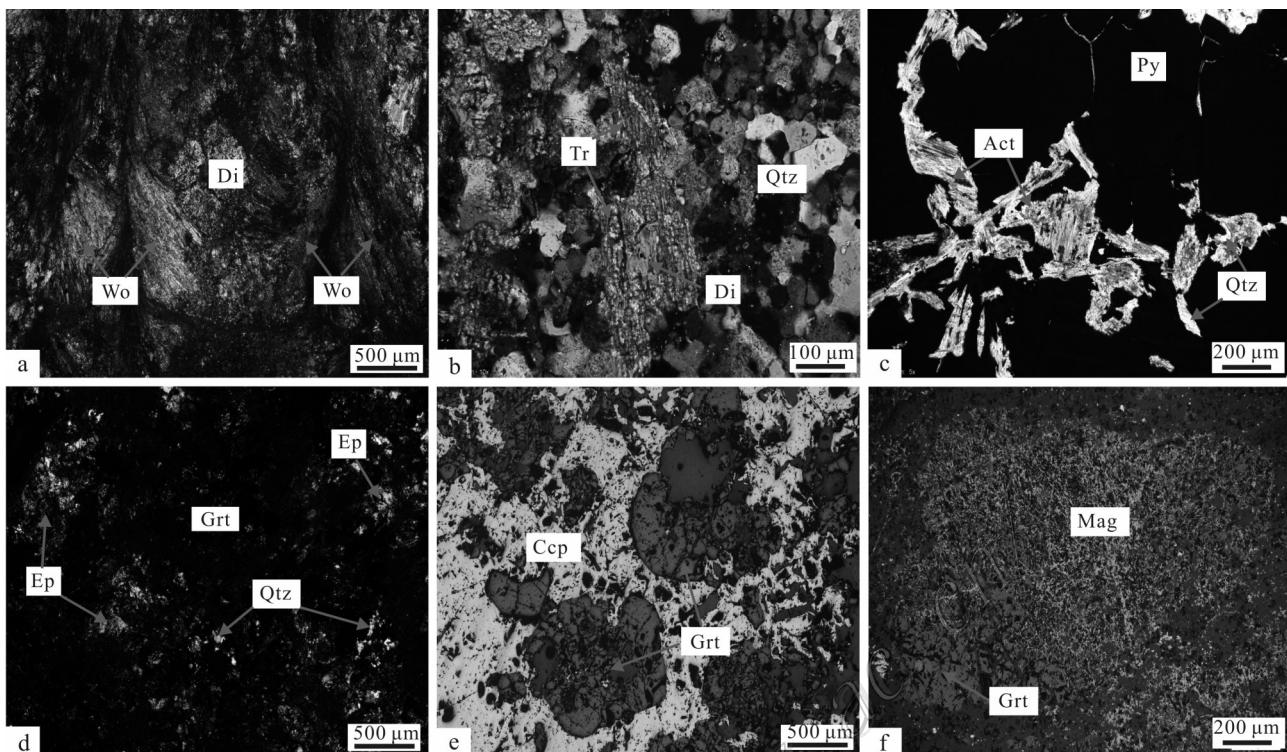


图9 江西武山铜矿接触交代矽卡岩型矿石的矿物组合(a~d)及矿石结构显微(e,f)照片

a. 透辉石+硅灰石(透射光,+); b. 透辉石+透闪石+石英(透射光,+); c. 阳起石+石英+黄铁矿(透射光,+); d. 石榴子石+绿帘石+石英(透射光,+); e. 黄铜矿呈他形晶结构,交代石榴子石呈孤岛状(反射光); f. 磁铁矿集合体从石榴子石大颗粒内部交代呈骸晶结构(反射光)
矿物代号: Wo—硅灰石; Di—透辉石; Act—阳起石; 其余同图6、图8

Fig. 9 Microphotographs of minerals(a~d)and texture(e, f)of contact metasomatic skarn ore in the Wushan copper deposit

a. Diopside+wollastonite; b. Diopside+tremolite+quartz; c. Actinolite+quartz+pyrite; d. Garnet+ epidote+quartz; e. The Garnet replaced by chalcopyrite; f. The garnet replaced by magnetite and exhibiting skeletal texture

Mineral abbreviations: Wo—Wollastonite; Di—Diopside; Act—Actinolite; Others as for Fig. 6 and Fig. 8

沉积特征,但矿物组合却表现为热液特征。环边结构主要表现为磁铁矿沿着重结晶的方解石的边缘生长(图8e)。浸染状结构则是磁铁矿呈小颗粒结合体发育在透闪石等矽卡岩矿物中间(图8f)。交代残余结构表现为黄铜矿沿着石榴子石环带进行交代,形成环带结构。靠近岩体一侧的矿石也发育纹层状构造(图8e、g),主要为磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿等金属矿物与透闪石、蛇纹石等矽卡岩矿物组成的纹层,显示出热液成因,与远离岩体一侧的纹层状构造矿石显著不同。

接触交代矽卡岩型矿石表现为典型热液特征的结构构造。矿石主要发育有残余结构、交代结构和块状构造、浸染状构造、细脉状构造。残余结构和交代结构主要表现为黄铜矿交代黄铁矿呈港湾状或交代石榴子石呈孤岛状(图9e),磁铁矿交代石榴子石颗粒(图9f)等。块状构造(图6h)、浸染状构造和细

脉状构造(图6i)多发育在侵入体周围,包括石英-硫化物和方解石-闪锌矿-方铅矿细脉在内的各种脉体,穿切各种类型铜矿石。

4 代表性矿物的成分特征

对武山铜矿中的矽卡岩矿物石榴子石、单斜辉石等及金属矿物黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿等进行了电子探针主量成分原位分析,借此讨论矽卡岩形成过程中热液的物化条件,为武山铜矿床的形成过程提供新的矿物学证据。

4.1 矽卡岩矿物

4.1.1 石榴子石

石榴子石主量元素分析结果(表1)表明,武山矿区石榴子石以富铁、铝和钙,贫镁和锰为特征,属钙

表1 武山矿床中代表性石榴子石主量元素分析结果

Table 1 Representative results of electron microprobe analysis of garnets from the Wushan deposit

组分	wsh048(近岩体)										wsh064(近岩体)				NS260-06(近岩体)			NS260-15(近岩体)			
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12	G13	G14	G15	G16	G17	G18	G19	G20	G21
<i>w(B)/%</i>																					
SiO ₂	36.96	37.44	37.09	35.78	37.32	36.65	37.07	37.27	36.84	36.68	36.87	36.72	36.39	36.48	35.15	36.32	36.25	38.52	38.06	36.83	37.49
TiO ₂	0.31	0.36	0.07	0	0.41	0.32	0.47	0.19	0.72	0.09	0.27	0.17	0.13	0.23	0.03	0.09	0.09	1.20	0.95	2.33	2.11
Al ₂ O ₃	7.43	8.34	11.44	5.22	10.08	7.85	6.56	7.18	8.16	4.55	7.74	7.32	5.54	5.93	2.51	4.71	3.69	16.88	16.99	15.85	15.94
Cr ₂ O ₃	0.05	0.09	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04	0.02	0.02	0.03	0	0.04	0	0
FeO	18.52	18.08	14.29	21.95	15.87	17.83	19.86	19.66	17.64	23.03	17.79	18.26	20.55	19.9	24.18	21.12	22.46	4.77	5.28	5.57	5.42
MnO	0.20	0.28	0.24	0.14	0.23	0.20	0.22	0.28	0.27	0.18	0.19	0.14	0.16	0.21	0.13	0.19	0.13	0.53	0.55	0.51	0.55
MgO	0.09	0.08	0	0.03	0.06	0.11	0.15	0.08	0.1	0.08	0.15	0.13	0.11	0.16	0.04	0.06	0.03	0.31	0.32	0.34	0.35
CaO	34.37	34.19	34.81	34.17	34.51	34.16	34.3	34.06	34.29	33.54	34.65	34.29	34.07	34.12	35.09	35.25	35.48	37.07	37.68	37.91	37.57
总和	97.93	98.86	98.01	97.29	98.48	97.12	98.63	98.72	98.02	98.15	97.66	97.03	96.95	97.07	97.15	97.76	98.17	99.27	99.85	99.35	99.43
基于12个氧原子																					
Si	3	3	2.97	2.96	2.98	2.99	3	3	2.98	3	3	3.01	3	3	2.95	2.99	2.99	2.98	2.94	2.87	2.91
Ti	0.02	0.02	0	0	0.02	0.02	0.03	0.01	0.04	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0.07	0.05	0.14	0.12
Al	0.71	0.79	1.08	0.51	0.95	0.76	0.62	0.68	0.78	0.44	0.74	0.71	0.54	0.58	0.25	0.46	0.36	1.54	1.54	1.46	1.46
Fe ³⁺	1.26	1.19	0.93	1.52	1.05	1.22	1.34	1.31	1.19	1.55	1.21	1.25	1.42	1.37	1.7	1.46	1.55	0.31	0.34	0.36	0.35
Fe ²⁺	0	0.02	0.02	0	0.01	0	0	0.02	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mn	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.04	0.03	0.04
Mg	0.01	0.01	0	0	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0	0.01	0	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Ca	2.99	2.93	2.99	3.03	2.96	2.99	2.97	2.94	2.97	2.94	3.02	3.01	3.01	3.16	3.11	3.13	3.07	3.11	3.17	3.13	3.13
And	62.57	60.09	46.27	74.88	52.41	60.56	67.04	65.74	59.62	77.96	59.5	61.82	70.05	67.52	80.31	69.71	73.8	14.73	16.02	16.82	16.48
Gro	36.45	38.09	52.2	24.68	46.33	38.54	31.85	32.75	39.36	20.5	39.48	37.33	29.14	31.23	19.19	29.56	25.7	83.04	81.6	80.9	81.15
Other	0.98	1.83	1.54	0.44	1.26	0.90	1.10	1.51	1.02	1.55	1.03	0.84	0.82	1.26	0.50	0.72	0.50	2.22	2.38	2.28	2.37
组分	NS260-18(近岩体)				NS260-21(近岩体)				S260-N2(远离岩体)				S260-N2(环带石榴子石,核部→边部)								
	G22	G23	G24	G25	G26	G27	G28	G29	G30	G31	G32	G33	G52	G53	G54	G55	G56	G57	G58	G59	G60
<i>w(B)/%</i>																					
SiO ₂	37.82	37.65	37.88	36.31	36.74	36.41	36.8	34.75	34.26	34.4	35.37	34.94	37.23	35.4	36.08	35.51	35.56	35.77	36.88	36.62	37.32
TiO ₂	0.14	0.03	0.08	0.19	0.68	0.65	0.97	0.01	0	0	0	0.03	2.36	0.07	0.03	0	0	0	0.16	2.31	0
Al ₂ O ₃	17.73	15.64	17.35	4.98	6.89	6.62	6.35	0.07	0.18	0.10	0	0.03	14.77	4.74	3.74	0.42	0.58	1.23	3.39	15.42	5.94
Cr ₂ O ₃	0.03	0	0	0	0	0	0.05	0	0	0	0	0.08	0.02	0	0.01	0	0	0.02	0.01	0	0.03
FeO	5.48	7.82	5.86	21.53	18.25	18.58	19.43	26.7	27.33	26.63	26.98	27.3	7.93	21.47	22.53	26.64	26.75	25.59	23.67	7.65	20.51
MnO	0.42	0.42	0.46	0.13	0.24	0.2	0.13	0.13	0.12	0.15	0.19	0.36	0.17	0.24	0.23	0.22	0.22	0.13	0.21	0.11	0.23
MgO	0.24	0.15	0.15	0.10	0.12	0.09	0.16	0.18	0.11	0.30	0.03	0.60	0	0.02	0.02	0.02	0.03	0.05	0.57	0.02	
CaO	38.01	37.58	38.37	33.07	33.36	34.52	34.5	34.59	35.1	34.53	34.42	34.06	37.53	35.51	34.76	34.71	34.91	34.69	33.28	37.47	33.55
总和	99.86	99.28	100.14	96.31	96.28	97.07	98.39	96.42	97.10	96.12	97.00	96.81	100.6	97.42	97.40	97.52	98.03	97.46	97.64	100.13	97.61
基于12个氧原子																					
Si	2.92	2.94	2.92	3.02	3.03	2.99	2.98	2.97	2.92	2.95	3.00	2.97	2.88	2.94	3.00	2.99	2.98	3.00	3.04	2.84	3.05
Ti	0.01	0	0	0.01	0.04	0.04	0.06	0	0	0	0	0.14	0	0	0	0	0	0	0.01	0.13	0
Al	1.61	1.44	1.58	0.49	0.67	0.64	0.61	0.01	0.02	0.01	0	0	1.34	0.46	0.37	0.04	0.06	0.12	0.33	1.41	0.57
Fe ³⁺	0.35	0.51	0.38	1.49	1.26	1.28	1.32	1.91	1.95	1.91	1.94	0.51	1.49	1.56	1.88	1.87	1.79	1.63	0.50	1.40	
Fe ²⁺	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mn	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	
Mg	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.04	0	0	0.07	0	0	0	0	0	0	0.01	0.07	0
Ca	3.14	3.15	3.17	2.94	2.94	3.04	3.00	3.16	3.20	3.17	3.12	3.10	3.11	3.16	3.09	3.13	3.13	3.12	2.94	3.12	2.93
And	16.59	24.02	17.61	75.37	63.37	62.5	65.32	89.48	90.51	88.88	91.25	92.96	24.11	70.4	75.41	89.35	89.2	86.01	82.71	23.36	70.89
Gro	81.62	74.57	80.91	23.77	35.57	36.68	33.58	9.52	8.80	9.57	8.19	5.85	73.32	29.06	23.97	10.07	10.25	13.52	16.56	74.35	28.26
Other	1.79	1.41	1.48	0.86	1.06	0.81	1.10	1.00	0.69	1.55	0.56	1.18	2.56	0.54	0.63	0.57	0.56	0.47	0.73	2.28	0.84

续表1

Continued Table 1

组分	wsh064(环带石榴子石,核部→边部)								wsh065(环带石榴子石,核部→边部)									
	G34	G35	G36	G37	G38	G39	G40	G41	G42	G43	G44	G45	G46	G47	G48	G49	G50	G51
<i>w(B)/%</i>																		
SiO ₂	36.13	35.37	35.15	35.94	34.80	35.79	35.25	35.04	35.63	34.87	36.74	35.35	35.56	36.34	35.33	36.96	35.25	35.11
TiO ₂	0.32	0.18	0	0.10	0.04	0.07	0.05	0.06	0	0	0.08	0	0	0.09	0	0	0	0
Al ₂ O ₃	4.10	2.99	0.04	3.21	0.34	4.05	1.99	2.55	0.67	0.59	9.56	0.91	0.82	7.32	1.01	7.07	0.43	0.52
Cr ₂ O ₃	0	0.04	0.04	0.04	0	0	0.05	0	0	0	0	0	0.03	0	0	0.04	0	0.07
FeO	22.67	23.96	28.33	23.91	27.53	23.23	25.45	24.94	27.51	27.42	15.74	27.39	26.94	18.85	26.86	19.07	26.45	27.02
MnO	0.16	0.12	0.37	0.18	0.22	0.21	0.17	0.10	0.21	0.18	0.26	0.28	0.10	0.22	0.19	0.2	0.16	0.08
MgO	0.19	0.09	0.06	0.09	0.15	0.05	0.03	0.07	0.19	0.16	0.10	0.11	0.21	0.11	0.21	0.13	0.20	0.11
CaO	33.48	33.3	32.04	33.57	33.06	33.79	33.65	33.35	32.56	32.97	34.58	32.86	32.72	34.58	32.73	33.63	33.16	33.1
总和	97.05	96.05	96.03	97.04	96.14	97.19	96.64	96.11	96.77	96.19	97.06	96.90	96.38	97.51	96.33	97.1	95.65	96.01
基于12个氧原子																		
Si	3.00	2.98	3.00	2.99	2.97	2.97	2.97	2.96	3.01	2.97	2.99	2.98	3.01	2.97	2.99	3.02	3.01	2.99
Ti	0.02	0.01	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0
Al	0.40	0.30	0	0.32	0.03	0.40	0.20	0.25	0.07	0.06	0.92	0.09	0.08	0.71	0.10	0.68	0.04	0.05
Fe ³⁺	1.57	1.69	1.99	1.67	1.96	1.61	1.79	1.76	1.93	1.95	1.07	1.92	1.91	1.29	1.90	1.30	1.89	1.93
Fe ²⁺	0	0	0.03	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0
Mn	0.01	0.01	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.03	0.01	0.03	0.02	0.03	0.01
Ca	2.97	3.01	2.93	3.00	3.02	3.01	3.04	3.02	2.94	3.01	3.01	2.97	2.97	3.03	2.97	2.95	3.04	3.02
And	78.36	83.69	99.66	82.73	96.38	79.93	88.09	87.10	96.66	96.31	52.77	95.50	95.32	63.22	94.80	65.56	92.26	94.95
Gro	20.48	15.52	0	16.35	2.47	19.37	11.23	12.38	1.65	2.60	46.25	2.98	3.46	35.84	3.86	33.24	6.53	4.16
Other	1.15	0.78	0.34	0.92	1.14	0.69	0.68	0.53	1.69	1.10	0.99	1.52	1.22	0.94	1.33	1.21	1.21	0.88

注: And、Gro、Other 分别表示钙铁榴石、钙铝榴石和其他石榴子石端员的质量分数(%)。

系石榴子石,为钙铝-钙铁石榴子石固溶体系列($\text{And}_{100}\text{Gro}_0\text{-And}_{20}\text{Gro}_{80}$),包括钙铝榴石和钙铁榴石2种类型,其他亚种总含量不超过3%。武山矿区石榴子石 SiO_2 和 CaO 含量较稳定,其中 $w(\text{SiO}_2)$ 变化于 34.26%~38.06%, $w(\text{CaO})$ 为 32.04%~38.37%; $w(\text{FeO})$ 变化于 4.77%~28.33%; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 0~17.73%,与 FeO 相互消长; $w(\text{MnO})$ 变化于 0.08%~0.55%, $w(\text{MgO})$ 为 0.02%~0.57%,几乎不含 Ti 。

在石榴子石分类图(图 10a)上,石榴子石的成分在空间上具有一定的变化规律:①靠近岩体一侧(接触交代矽卡岩中)的石榴子石中 Fe 含量明显低于远离岩体的石榴子石,而 Al 含量明显高于远离岩体(层状矽卡岩中)的石榴子石;②环带石榴子石的 And(钙铁榴石端员)和 Gro(钙铝榴石端员)值变化范围广,呈现出振荡特征,即流体的循环和停滞交替出现,或者流体的成分、氧化还原状态等方面发生

过周期性的变化(Meinert et al., 2005)。

4.1.2 单斜辉石

单斜辉石主量元素分析结果(表2)表明,武山矿区单斜辉石以富镁和钙为特征,属于钙铁辉石-透辉石固溶体系列,其中透辉石组分占 76%~95%,其他亚种含量之和低于 7%。其 $w(\text{SiO}_2)$ 为 51.42%~54.60%, $w(\text{CaO})$ 变化于 23.62%~25.92%, $w(\text{MgO})$ 为 14.22%~17.43%, $w(\text{FeO})$ 变化于 0.40%~6.01%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 0.07%~1.26%, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 变化于 0.00%~0.33%,其他元素含量多低于 1%。在矽卡岩单斜辉石分类图中均落入透辉石一侧(图 10b),其 Di(透辉石端员)变化于 76.77%~95.16%, Hd(钙铁辉石端员)变化于 1.23%~18.37%。

4.1.3 其他矽卡岩矿物

武山矿区主要矽卡岩矿物是进变质阶段产生的钙铁榴石、钙铝榴石和透辉石等矿物,但在矿区内

表2 武山矿床中代表性单斜辉石主量元素分析结果

Table 2 Representative results of electron microprobe analysis of clinopyroxenes from the Wushan deposit

组分	wsh048												wsh064			
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16
<i>w(B)/%</i>																
SiO ₂	53.97	53.85	53.97	53.67	53.37	53.61	54.26	54.04	53.70	53.95	53.53	53.68	53.89	54.60	53.36	53.92
TiO ₂	0	0	0	0.06	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0.12	0	0	0.04
Al ₂ O ₃	0.08	0.08	0.16	0.09	0.05	0.10	0.48	0.17	0.07	0.20	0.15	0.10	0.42	0.17	0.25	0.28
Cr ₂ O ₃	0.08	0.08	0.06	0	0.07	0.06	0.42	0	0	0	0.04	0.05	0.03	0.03	0	0
FeO	3.70	3.31	5.17	4.47	4.23	3.76	0.40	2.28	4.55	5.56	4.56	5.10	3.35	3.07	3.11	3.17
MnO	0.64	0.50	0.45	0.63	0.63	0.56	0.04	0.42	0.56	0.42	0.48	0.61	0.31	0.36	0.33	0.24
MgO	15.59	15.70	14.55	14.83	14.47	14.66	17.43	15.90	15.38	14.76	15.11	15.16	16.38	16.89	16.52	16.64
CaO	25.10	24.96	25.17	25.40	23.97	24.13	25.27	25.42	25.11	24.98	25.22	25.46	24.94	25.11	25.36	25.69
Na ₂ O	0.15	0.10	0.08	0.06	0.04	0.26	0.20	0.02	0.05	0.05	0.06	0.07	0.05	0.02	0	0.04
K ₂ O	0	0	0	0	0	0.02	0.02	0	0.02	0	0	0.02	0	0	0	0
总和	99.31	98.58	99.61	99.21	96.87	97.16	98.52	98.25	99.44	99.92	99.11	100.24	99.51	100.25	98.96	100.02
以6个氧原子和4个阳离子为基准																
Si	2.00	2.00	2.00	2.00	2.02	2.02	1.99	2.01	1.99	2.00	1.99	1.98	1.98	1.99	1.98	1.98
Al(IV)	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0
Al(VI)	0	0	0.01	0	0	0	0.01	0.01	0	0.01	0	0	0	0	0	0
Ti	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cr	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ³⁺	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0.02	0.05	0.02	0.02	0.05	0.05
Fe ²⁺	0.10	0.10	0.16	0.13	0.13	0.12	0.01	0.07	0.12	0.17	0.12	0.11	0.09	0.08	0.05	0.05
Mn	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.86	0.87	0.80	0.82	0.82	0.82	0.95	0.88	0.85	0.81	0.84	0.84	0.90	0.92	0.91	0.91
Ca	1.00	0.99	1.00	1.01	0.97	0.98	0.99	1.01	1.00	0.99	1.01	1.01	0.98	0.98	1.01	1.01
Na	0.01	0.01	0.01	0	0	0.02	0.01	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Di	85.26	87.05	81.11	83.11	83.61	83.71	95.16	90.44	84.00	80.48	83.87	82.18	86.99	89.65	89.56	89.37
Hd	11.34	10.30	16.18	14.05	13.79	12.09	1.23	7.29	13.91	17.01	14.18	15.45	9.97	9.13	9.42	9.51
Jo	1.99	1.58	1.43	2.01	2.07	1.82	0.12	1.36	1.74	1.30	1.51	1.88	0.93	1.09	1.02	0.73
Jd+Ae	1.41	1.07	1.29	0.84	0.53	2.38	3.49	0.91	0.36	1.22	0.43	0.49	2.11	0.14	0	0.39

注:Di、Hd、Jo、Jd和Ae分别表示透辉石、钙铁辉石、钙镁辉石、硬玉和霓石端员的质量分数(%)

仍可见到这些矿物被阳起石和透闪石化学位中钙离子的数目(1.73~2.03)均大于1.5,因此依据国际矿物协会的角闪石分类法,它们都属于钙质闪石类矿物。且它们A位置的离子数总和均小于0.5(表3),对应的子分类图见图11。有一个样品投点在阳起石区域,另

外6个样品投在透闪石区域,它们均具有高Mg、Si、Ca和低Al、Na、K的特点。

4.2 金属矿物

(1) 黄铁矿:黄铁矿主量元素分析结果(表4)显示,武山矿区矿体中的黄铁矿w(S)范围是49.89%~53.77%,平均值为52.60%,w(Fe)范围是44.52%~48.48%,平均值为46.20%,部分S和Fe含量低于理想黄铁矿的成分含量。前述表明,武山矿区黄铁矿

续表 2
Continued Table 2

测点	NS260-15		NS260-21		S260-N2									
	D17	D18	D19	D20	D21	D22	D23	D24	D25	D26	D27	D28	D29	D30
<i>w(B)/%</i>														
SiO ₂	53.04	53.29	53.32	53.45	53.52	52.65	52.91	52.86	52.99	53.08	53.85	52.49	53.31	51.42
TiO ₂	0	0.06	0.06	0	0.02	0.05	0.06	0.01	0.06	0.09	0	0.02	0.05	0.07
Al ₂ O ₃	0.40	0.57	0.84	0.27	0.73	0.86	1.22	0.66	0.50	1.18	0.26	0.96	1.26	0.92
Cr ₂ O ₃	0	0.01	0	0.03	0.03	0.08	0.07	0	0	0.07	0.05	0	0.03	0.02
FeO	3.50	4.96	4.33	5.26	4.64	5.77	4.30	4.38	6.01	4.54	5.06	3.14	3.67	5.30
MnO	0.45	0.54	0.43	0.17	0.26	0.49	0.36	0.39	0.60	0.41	0.44	0.21	0.30	0.14
MgO	15.83	14.67	15.47	15.34	15.27	14.22	14.93	15.39	14.44	14.84	15.05	15.61	15.22	15.11
CaO	25.72	25.31	25.39	23.62	24.11	25.37	25.63	25.82	25.14	25.49	25.58	25.92	25.92	25.90
Na ₂ O	0.10	0.23	0.13	0.33	0.28	0.09	0.11	0.06	0.08	0.09	0.11	0.17	0.23	0.12
K ₂ O	0	0.10	0.02	0	0.01	0.01	0	0	0	0.01	0	0	0.01	0
总和	99.04	99.72	99.99	98.46	98.87	99.58	99.58	99.59	99.82	99.79	100.38	98.51	99.98	99.00
以6个氧原子和4个阳离子为基准														
Si	1.97	1.98	1.97	2.00	1.99	1.97	1.96	1.96	1.97	1.96	1.99	1.96	1.96	1.93
Al(IV)	0	0.02	0.03	0	0.01	0.03	0.04	0	0	0.04	0	0.04	0.04	0
Al(VI)	0	0	0	0.01	0.02	0	0.01	0	0	0.02	0	0	0.02	0
Ti	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ³⁺	0.07	0.05	0.05	0.02	0.01	0.05	0.04	0.07	0.05	0.03	0.04	0.07	0.05	0.14
Fe ²⁺	0.04	0.10	0.08	0.14	0.13	0.13	0.09	0.06	0.14	0.11	0.12	0.02	0.06	0.02
Mn	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0
Mg	0.88	0.81	0.85	0.86	0.85	0.79	0.83	0.85	0.80	0.82	0.83	0.87	0.84	0.85
Ca	1.02	1.01	1.00	0.95	0.96	1.01	1.02	1.03	1.00	1.01	1.01	1.04	1.02	1.04
Na	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Di	87.09	79.34	81.58	80.66	80.53	76.77	80.10	84.85	79.04	79.52	82.41	84.61	81.28	82.50
Hd	10.75	14.98	12.74	15.49	13.72	17.41	12.89	13.45	18.37	13.61	15.49	9.47	10.96	16.04
Jo	1.42	1.65	1.29	0.52	0.79	1.51	1.11	1.23	1.86	1.25	1.36	0.64	0.90	0.43
Jd+Ae	0.74	4.03	4.39	3.33	4.96	4.31	5.91	0.47	0.73	5.62	0.75	5.27	6.86	1.03

中存在类质同象现象,而黄铁矿的类质同象不仅是导致成矿元素富集的因素,还是不同成因黄铁矿的标型特征(杜轶伦,2013)。另外,胶状黄铁矿与粒状黄铁矿在主量元素含量上的差异,也反映出这2种黄铁矿形成的物理化学环境存在较大差异。

黄铁矿中的Fe常被Co和Ni等元素替代形成类质同像,并且S也部分会被Te和Se等元素所替代,因此这些元素在黄铁矿中的含量以及S/Se和Co/Ni比值常被用作判别黄铁矿的形成环境,并且还被广泛用于矿床地球化学的研究(Zhao et al., 1997)。武

山铜矿床中黄铁矿电子探针测试结果显示,胶状黄铁矿中的w(Co)多低于检出限,Co/Ni比值0.02~0.96,粒状黄铁矿中的w(Co)变化相对较大($w(\text{Co})=0.03 \times 10^{-6} \sim 0.77 \times 10^{-6}$),w(Ni)多低于检出限,Co/Ni比值变化于2~130。在Co-Ni成因关系图解(图12)上,可以发现胶状黄铁矿均落在沉积和沉积改造区,而粒状黄铁矿则落在岩浆和热液区,指示二者各自不同的成因。

(2) 黄铜矿:黄铜矿电子探针分析结果(表5)表明,w(Cu)为34.16%~35.51%;w(Fe)为29.58%~

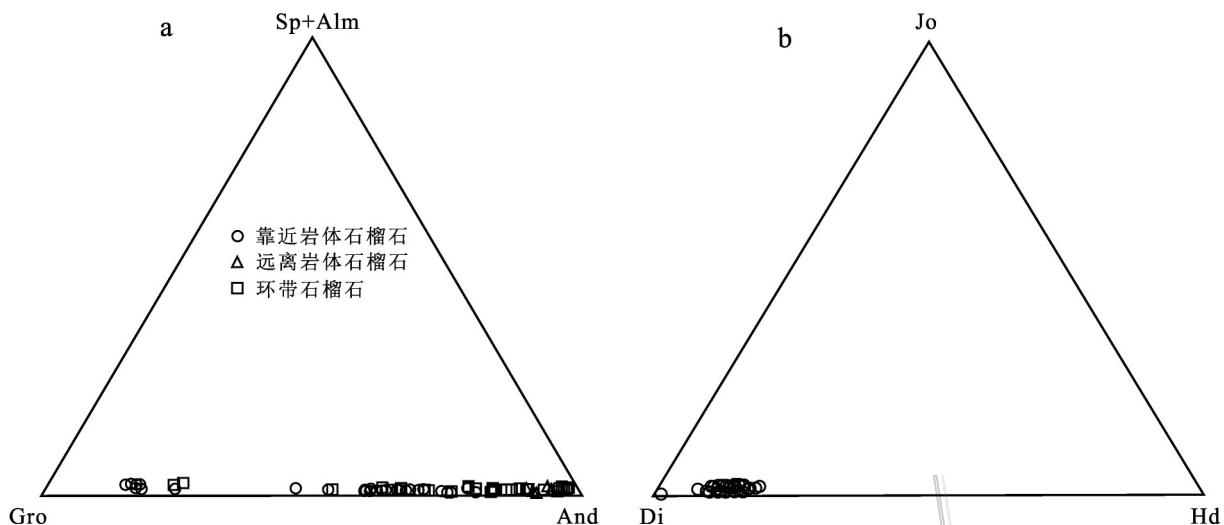


图10 武山矿区石榴子石(a)和单斜辉石(b)分类图

Gro—钙铝榴石; And—钙铁榴石; Sp—锰铝榴石; Alm—铁铝榴石; Di—透辉石; Hd—钙铁辉石; Jo—锰钙辉石

Fig. 10 Ternary diagram of the composition of skarn garnet (a) and pyroxene (b) from the Wushan copper deposit

Gro—Grossularite; And—Andradite; Sp—Spessartine; Alm—Almandite; Di—Diopside; Hd—Hedenbergite; Jo—Johannsenite

31.10%; $w(\text{S})$ 为 34.11%~34.92%; 与黄铜矿的标准含量($w(\text{Cu})$:34.56%, $w(\text{Fe})$:30.52%, $w(\text{S})$:34.92%)相近。 $w(\text{Mo})$ 为 0.28%~0.56%, $w(\text{Pb})$ 为 0%~0.27%, $w(\text{Zn})$ 为 0~0.69%, 其余元素含量均小于 0.1%。黄铜矿中中低温元素 Pb 和 Zn 含量大于中高温元素 Mo 的含量, 说明黄铜矿生成环境为中低温环境, 形成较晚, 这与黄铜矿生成顺序晚于辉钼矿和黄铁矿的地质事实相吻合。

(3) 磁铁矿: 磁铁矿主量元素分析结果(表6)显示, 层状矽卡岩中磁铁矿主要成分为 FeO 与 Fe_2O_3 , ($w(\text{FeO}_T)$ =85.09%~92.29%), 另含少量 MnO 、 MgO 、 SiO_2 和 CaO , 其质量分数分别为 0.08%~0.67%、1.02%~2.97%、0~0.27% 和 0~0.37%, 其余元素质量分数均不超过 0.1%, 其中 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 变化于 0~0.07%; 接触交代矽卡岩中磁铁矿主要成分为 FeO 与 Fe_2O_3 , ($w(\text{FeO}_T)$ =88.53%~89.55%), 另含少量 SiO_2 、 Al_2O_3 和 CaO , 质量分数分别为 0.03%~0.87%、0.04%~0.15% 和 0~0.15%, 其余元素的质量分数均不超过 0.1%, 其中 $w(\text{MnO})$ 和 $w(\text{MgO})$ 分别为 0.03%~0.06% 和 0~0.01%。

5 讨 论

5.1 武山铜矿床形成过程的岩相学证据

野外地质调查研究表明, 武山铜矿床 3 类矿体

的分布在空间上具有一定规律。层状硫化物型矿体和层状矽卡岩型矿体主要分布在上泥盆统五通组和上石炭统黄龙组地层之间的层间滑脱带内, 其中远离岩体一侧发育层状硫化物型矿体, 靠近岩体一侧则发育层状矽卡岩型矿体; 接触交代矽卡岩型矿体主要分布于花岗闪长斑岩与围岩接触带内。三者在空间上的分布特征, 反映了武山铜矿床形成过程的复杂性。

岩相学研究表明, 武山铜矿床矿石类型兼有原生沉积、岩浆热液交代和叠加改造的结构构造特征, 反映了武山铜矿床的形成经历了原生沉积作用、热液交代作用以及叠加改造作用。层状硫化物矿石中层状网脉状含铜黄铁矿矿石(图 6a)的特征与 VMS 型和 Sedex 型矿床的网脉状矿类似(Lambert, 1976; Large, 1981; Hou et al., 2001; 侯增谦等, 2003; 2011)。矿石的形成可解释为, 向上运移的海底热水流体穿过孔隙度较高的碎屑岩层时发生侧向流动并沉淀, 形成具有层状特征的网脉状矿化带(Lydon, 1988; Large, 1992)。此外, 纹层状含铜黄铁矿矿石(图 6b), 胶状、鲕状及球粒结构黄铁矿(图 7a、c、d)都是典型沉积成因的。在热液交代过程中出现了黄铜矿交代自形黄铁矿呈残余结构, 黄铜矿交代石榴子石呈孤岛状结构(图 9e)的现象, 以及磁铁矿交代石榴子石呈骸晶结构(图 9f), 这些结构都具有典型的热液交

表3 武山矿床中代表性阳起石和透闪石主量元素分析结果

Table 3 Representative results of electron microprobe analysis of actinolites and tremolites from the Wushan deposit

组分	S260-N2		NS260-14		wsh029			组分	S260-N2		NS260-14		wsh029		
	A1	T1	T2	T3	T4	T5	T6		A1	T1	T2	T3	T4	T5	T6
<i>w(B)/%</i>															
SiO ₂	53.09	55.19	55.17	57.31	57.62	58.57	58.83	Ca	1.91	1.84	2.03	1.73	1.87	1.89	1.90
TiO ₂	0.05	0	0.19	0	0.04	0	0	Na	0.13	0.10	0.13	0.05	0.06	0.01	0.01
Al ₂ O ₃	1.98	1.13	2.04	0.18	0.11	0.03	0.03	K	0.05	0.03	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01
FeO	12.42	8.33	4.39	3.74	2.17	0.99	1.74	阳离子总量	15.23	15.15	15.13	15.10	15.04	15.00	15.02
MnO	0.38	0.24	0.09	0.1	0.12	0.11	0.09	Si _T	7.68	7.82	7.76	7.91	7.98	8.00	7.98
MgO	16.56	19.62	20.45	23.95	23.46	24.32	24.29	Al _T	0.32	0.18	0.24	0.03	0.02	0	0
CaO	12.30	12.12	13.47	11.66	12.62	12.91	13.1	Al _C	0.02	0.01	0.10	0	0	0.01	0
Na ₂ O	0.46	0.35	0.48	0.2	0.22	0.05	0.02	Fe ³⁺ _C	0.77	0.85	0.52	0.43	0.25	0.11	0.20
K ₂ O	0.25	0.18	0.20	0.03	0.03	0.06	0.06	Ti _C	0.01	0	0.02	0	0	0	0
阳离子数															
Si	7.68	7.82	7.76	7.91	7.98	8.00	7.98	Mg _C	3.57	4.13	4.29	4.57	4.74	4.88	4.80
Al ^V	0.32	0.18	0.24	0.03	0.02	0	0	Mn _C	0	0	0.01	0	0	0	0
Al ^{VI}	0.02	0.01	0.10	0	0	0.01	0	Fe ²⁺ _B	0.10	0.13	0	0	0	0	0
Ti	0.01	0	0.02	0	0	0	0	Mn _B	0.05	0.03	0	0.01	0.01	0.01	0.01
Fe ³⁺	0.77	0.85	0.52	0.43	0.25	0.11	0.20	Ca _B	1.85	1.84	2.00	1.73	1.87	1.89	1.90
Fe ²⁺	0.73	0.13	0	0	0	0	0	Na _B	0	0	0	0.05	0.06	0.01	0.01
Mn	0.05	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	Ca _A	0.06	0	0.03	0	0	0	0
Mg	3.57	4.15	4.29	4.93	4.84	4.96	4.91	Na _A	0.13	0.10	0.13	0.05	0.06	0.01	0.01
K _A															

表4 武山矿床中代表性黄铁矿电子探针分析结果(*w(B)/%*)Table 4 Representative results of electron microprobe analysis of pyrites from the Wushan deposit (*w(B)/%*)

样品编号	测点	S	Fe	Co	Ni	As	Se	Cu	Zn	Mo	Pb	Cr	总和
胶状黄铁矿													
wsh003	C1	53.09	46.12	0.05	0.2	-	-	0.10	-	0.51	0.34	0.05	100.46
	C2	52.32	45.36	0.07	0.11	-	0.04	0.15	0.14	0.61	0.40	0.06	99.26
wsh057	C3	53.29	46.28	0.23	0.24	-	0.07	-	-	0.67	0.17	-	100.95
	C4	53.17	46.52	0.08	0.23	-	-	-	-	0.59	0.28	-	100.87
wsh073	C5	52.51	46.51	-	0.02	-	-	-	-	-	-	-	99.04
	C6	52.36	46.99	-	0.04	0.04	-	-	-	-	-	-	99.43
	C7	50.86	48.47	-	-	0.02	0.03	0.21	-	-	-	-	99.6
	C8	53.21	46.22	-	0.05	0.04	0.04	-	-	-	-	-	99.56
粒状黄铁矿													
wsh003	P1	53.51	46.8	0.05	-	-	-	-	-	0.55	0.18	0.06	101.15
	P2	49.89	43.95	0.08	-	3.61	-	0.1	0.06	0.51	0.16	0.03	98.39
	P3	50.86	44.52	0.05	-	1.91	-	0.39	-	0.72	-	-	98.45
	P4	51.52	44.63	0.07	-	1.52	-	0.12	0.05	0.57	0.27	-	98.75
	P5	53.73	46.13	-	-	-	-	-	-	0.65	0.34	-	100.85
	P6	53.49	46.52	0.03	-	-	-	-	-	0.48	0.34	-	100.86
	P7	53.45	45.8	0.07	-	-	-	0.06	0.07	0.55	0.42	-	100.42
wsh020	P8	53.3	46.27	0.10	0.04	-	-	-	-	0.66	0.12	-	100.49
wsh027	P9	53.77	46.04	0.06	-	-	-	-	-	0.57	0.21	-	100.65
	P10	53.77	46.06	0.08	-	0.06	-	-	-	0.69	0.15	-	100.81
wsh057	P11	52.88	46.95	-	-	0.06	-	-	-	0.65	0.17	-	100.71
	P12	53.53	44.72	0.77	0.38	-	-	-	-	0.58	0.20	-	100.18
wsh073	P13	52.42	46.4	0.09	0.05	0.03	0.10	-	-	-	-	-	99.08
	P14	52.29	46.73	0.10	-	0.15	-	0.08	-	-	-	-	99.35
	P15	51.97	46.87	0.23	0.07	-	0.10	0.41	-	-	-	-	99.65
	P16	52.72	46.02	0.22	0.06	-	-	-	-	-	-	-	99.02
	P17	51.51	48.48	0.13	-	0.09	-	-	-	-	-	-	100.21
	P18	52.22	46.63	0.06	0.02	0.07	0.05	-	-	-	-	-	99.05

注:下标T,C,B,A表示离子在晶体中所占位置。

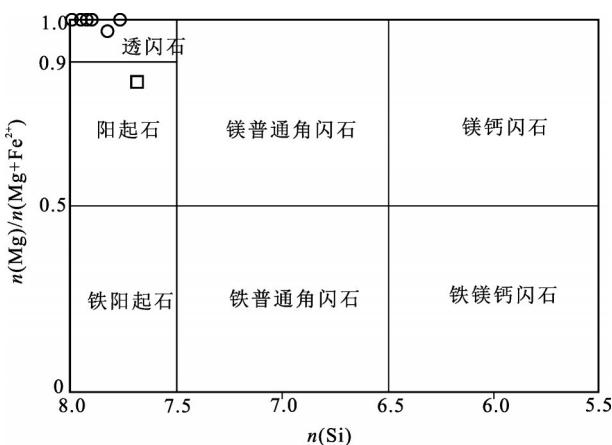


Fig. 11 Classification of amphiboles in the Wushan copper deposit

代特征。图7c中的黄铁矿虽然被后期热液交代破坏了原有的面貌,但仍清晰可见部分保存下来的鲕状结构特征,它既保留了早期的部分沉积结构特点,又显示了后期热液交代的过程。此外,层状矽卡岩型矿石多发育兼具沉积和热液交代两种特征的结构构造,常见磁铁矿集合体和透闪石或蛇纹石颗粒集合体组成各自条带交替呈带状结构(图8a,d),手标本多呈现纹层状

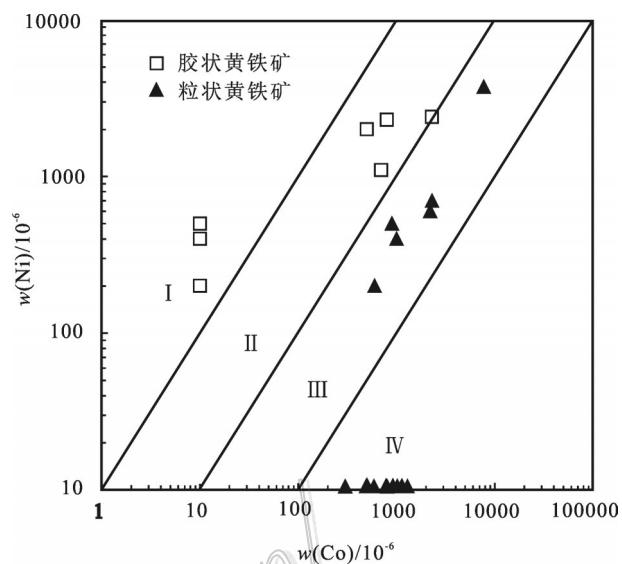


图12 武山铜矿床黄铁矿Co-Ni含量关系图(底图据Zhao et al. 1997)

Fig. 12 The Co-Ni diagram of pyrite in the Wushan copper deposit (modified after Zhao et al. 1997)

构造(图6g),这些矿石仅保留了原生沉积的结构构造假象,其矿物组合已显示岩浆热液矿物组合的特征。

综上所述,武山铜矿的三类矿体在矿石类型、矿

表5 武山铜矿中代表性黄铜矿电子探针分析结果(w(B)/%)

Table 5 Representative results of electron microprobe analysis of chalcopyrites from the Wushan deposit (w(B)/%)

样品编号	测点	S	Fe	Cu	Mo	Pb	Zn	Co	Se	Mn	Cr	总和
wsh003	Ccp1	34.92	30.49	34.49	0.40	0.10	0.23	0.06	-	-	-	100.69
	Ccp2	34.52	30.51	34.43	0.32	-	0.24	0.04	-	-	-	100.06
	Ccp3	34.41	29.58	34.73	0.37	0.24	0.24	0.05	-	-	-	99.62
wsh027	Ccp4	34.7	30.06	34.16	0.43	-	0.30	0.04	-	0.06	-	99.75
wsh057	Ccp5	34.65	30.56	35.51	0.40	0.13	-	0.03	0.05	0.03	0.06	101.42
	Ccp6	34.31	29.82	34.62	0.56	-	0.12	0.04	0.02	-	-	99.49
	Ccp7	34.79	30.74	34.94	0.28	-	0.11	-	-	-	-	100.86
	Ccp8	34.71	30.77	33.98	0.50	0.27	0.06	-	0.04	-	-	100.33
S260-N2	W10-5 Ccp9	34.52	30.10	35.21	0.34	-	0.45	0.03	-	-	-	100.66
	Ccp10	34.57	30.04	34.65	0.36	0.10	0.13	0.02	-	-	-	99.86
	Ccp11	34.26	30.11	34.16	0.36	0.05	0.09	0.07	-	-	-	99.09
	Ccp12	34.25	29.65	34.34	0.41	-	0.69	0.07	-	-	-	99.41
	Ccp13	34.11	31.10	34.31	0.38	0.11	0.26	0.01	-	-	-	100.29
	Ccp14	34.41	30.09	34.69	0.38	0.01	-	0.05	-	-	-	99.63
	Ccp15	34.78	29.94	34.67	0.47	0.11	0.15	0.05	-	-	-	100.18
	Ccp16	34.47	29.92	34.50	0.49	0.04	0.19	0.08	-	-	-	99.69
	Ccp17	34.73	30.82	34.44	0.43	0.03	0.24	0.01	-	-	-	100.70

注:“-”代表低于检出限。

表6 武山铜矿床代表性磁铁矿电子探针分析结果($w(B)/\%$)
**Table 6 Representative results of electron microprobe analysis of magnetites from
the Wushan deposit ($w(B)/\%$)**

样品编号	测点	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	NiO	Na_2O	K_2O	总和
层状矽卡岩中的磁铁矿													
wsh023	M1	-	0.07	0.02	-	90.83	0.3	1.74	-	-	-	-	92.96
	M2	0.07	-	0.02	-	85.73	0.14	1.36	0.37	-	0.03	-	87.72
	M3	-	-	-	-	91.77	0.2	1.67	-	-	-	-	93.64
	M4	0.04	-	0.07	-	85.6	0.08	1.24	0.3	-	-	-	87.33
	M5	-	-	0.03	0.07	91.22	0.24	1.7	-	-	-	0.01	93.27
	M6	-	-	0.02	-	90.81	0.33	1.73	0.05	0.08	0.05	-	93.07
	M7	0.06	-	0.03	-	85.09	0.12	1.42	0.2	-	0.07	-	86.99
wsh029	M8	-	-	0.03	0.04	92.29	0.25	1.02	-	-	-	-	93.63
	M9	0.04	-	-	-	92.02	0.18	1.09	-	-	-	-	93.33
	M10	0.03	-	0.02	-	91.12	0.17	1.11	-	-	-	-	92.45
	M11	0.02	-	0.02	-	92.14	0.26	1.12	-	-	0.05	-	93.61
wsh030	M12	0.09	-	-	0.05	90	0.43	2.03	-	-	-	-	92.6
	M13	0.27	-	0.02	0.2	89.84	0.42	1.87	-	-	-	-	92.62
	M14	0.03	-	-	0.08	89.03	0.67	2.97	-	-	0.07	-	92.85
接触交代矽卡岩中的磁铁矿													
wsh065	M15	0.03	-	0.04	0.01	89.55	0.03	-	-	0.01	0.03	0	89.7
	M16	0.87	0.04	0.15	0.01	88.53	0.06	0.01	0.15	0	0.03	0.02	89.88

注：“-”代表低于检出限。

物组合和结构构造方面有明显差异,分别显示出原生沉积、叠加改造和岩浆热液交代产物的特征。

5.2 矿物成因

(1) 矽卡岩矿物成因

石榴子石:石榴子石的成分环带可以反映其形成过程中水岩比的变化,其中富Fe的石榴子石主要由渗滤交代作用在较高的水岩比条件下形成的(流体活动性较强),而富Al石榴子石则主要由扩散交代作用在较低的水岩比条件下形成的(流体相对停滞)(Gaspar et al., 2008)。本文选取具有典型振荡环带结构的石榴子石进行了剖面微区分析,其结果列于表1。由图13可知,石榴子石晶型较完整,环带发育,边部被后期方解石脉体穿切(图13a)。石榴子石端员组分钙铁榴石分子和钙铝榴石分子从核部到边部呈振荡变化(图13b),其钙铁榴石含量变化为96.49%~52.77%~95.41%~63.22%~94.80%~65.56%~93.61%,相应的,钙铝榴石含量变化为2.13%~46.25%~3.22%~35.84%~3.86%~33.24%~5.35% (表1)。环带石榴子石的Al离子和Fe离子,Si离子和Ca离子呈现出非常明显的消长关系,尤其是在振荡环带密集部位,它们之间变化剧烈,反映出流体处于一

种循环和停滞交替出现的动荡环境。但整体而言,这些振荡环带还是富铁的,仍是在较高水岩比的条件下形成的。

石榴子石震荡环带中Fe、Al含量的变化,可能是流体氧逸度的变化引起含矿热液中 Fe^{3+} 含量的周期性变化结果(Yardley et al., 1991; Jamtveit et al., 1993),可以反映成矿流体的演化特征(Jamtveit et al., 1993; Crowe et al., 2001; Smith et al., 2004)。Yardley等(1991)认为石榴子石环带是在流体发生沸腾的阶段形成的,流体沸腾作用引起残留热液的氧化态发生变化,进而引起 Fe^{3+} 和 Al^{3+} 活度的变化,形成 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 变化的生长环带,多次沸腾形成周期性变化。热液石榴子石中氧同位素和微量元素的研究表明石榴子石环带可能是在岩浆水与天水混合过程中形成的(Crowe et al., 2001)。结合武山矿区矽卡岩阶段成矿流体特征(东前等,2015),以及本区石榴子石的矿物学特征,笔者认为本区石榴子石是流体渗滤交代作用的产物。

单斜辉石:用矽卡岩中石榴子石和单斜辉石的端员组成可以判断矽卡岩形成的氧化还原条件(Ray et al., 1990)。由于武山铜矿的单斜辉石多集

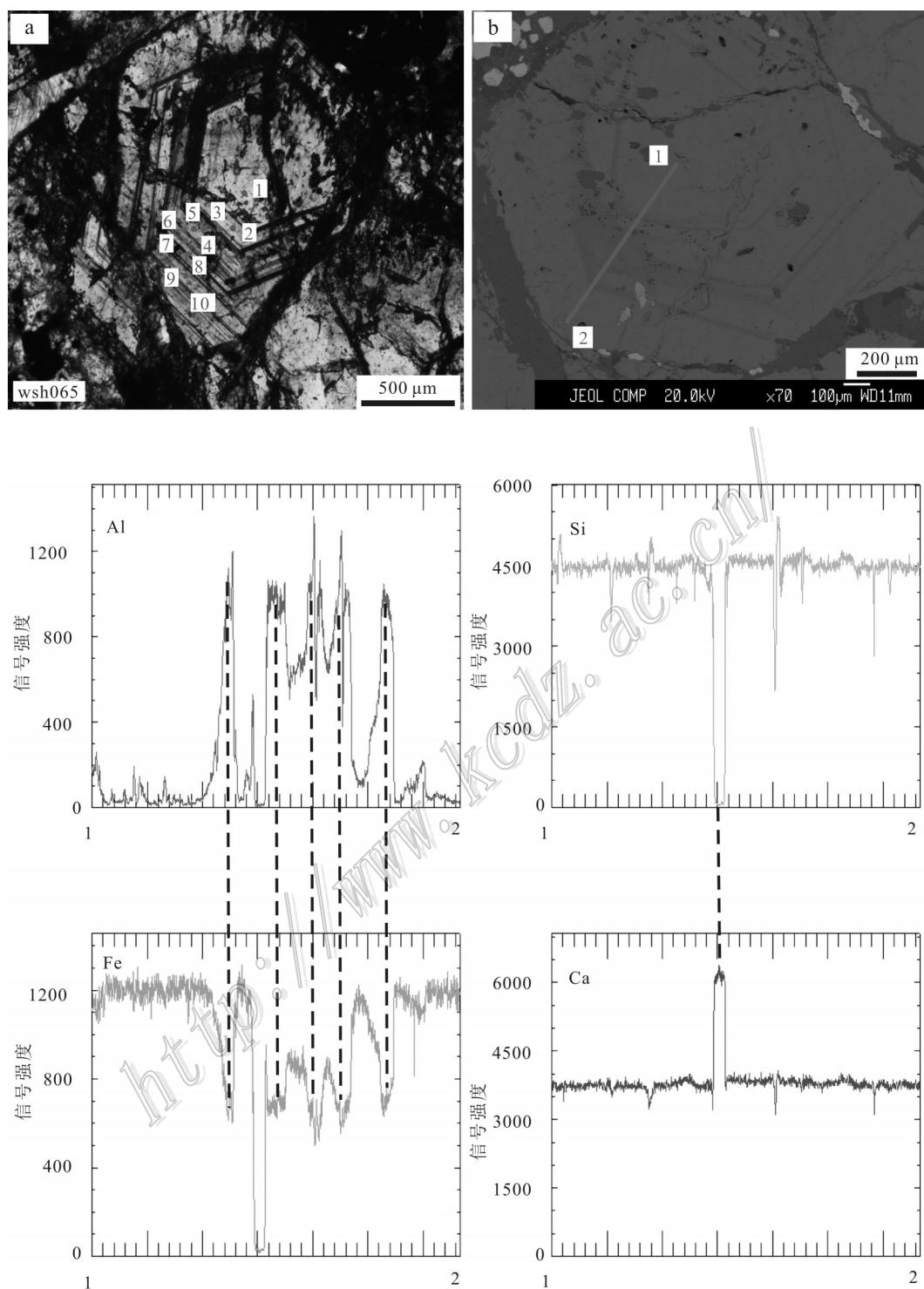


图13 武山矿区石榴子石环带成分变化图

a. 环带石榴子石(透射光,-)及对应电子探针点(数据见表1); b. 环带石榴子石(背散射)及对应电子探针线扫描路径(1→2);
Al, Si, Fe, Ca 分别为电子探针线扫描 Al, Si, Fe, Ca 元素信号强度图

Fig.13 Composition variation of garnet zoning

a. oscillatory-zoned garnet (transmitted light,-); b. oscillatory-zoned garnet (Back scattered electron imaging); Figures of Al, Si, Fe and Ca are represented the Al, Si, Fe and Ca elements' signal intensity by electron microprobe analysis

中于透辉石端员,而石榴子石端员与单斜辉石相比,其含铁端员比例相对较高。这说明在干矽卡岩阶段流体中的铁主要进入了石榴子石中,而进入单斜辉石中的铁相对较少,由于石榴子石中的铁为 Fe^{3+} 而单斜辉石中的铁为 Fe^{2+} ,因此可以判断在此阶段成矿流体处于相对氧化的条件下。

结合岩相学研究结果,笔者认为本区单斜辉石与石榴子石密切共生,相互之间无交代现象,呈共结结构,表明两者近同时结晶。因此,本区单斜辉石亦为流体渗滤交代作用的产物,且成矿流体处于相对氧化的条件下。

其他退化蚀变矿物:阳起石和透闪石中的Ti和Al含量特别低,说明它们形成于低温、低压条件下(姜常义等,1984),这与退化蚀变的成因是相符的。因此,阳起石和透闪石应该是在近地表环境较低的温度和压力条件下从成矿热液中沉淀出来的。

(2) 矿石矿物成因

黄铁矿:武山矿区主要分布有2类黄铁矿:一类为胶状黄铁矿,多呈灰黄色,胶状、鲕状和球粒状微晶集合体(图7a,c),多出现于远离岩体的层状硫化物矿体中;另一类为粒状黄铁矿,呈亮黄色,结晶粒状结构,多呈块状或脉状产出,出现于岩体附近。在Co-Ni成因关系图解(图12)上,胶状黄铁矿均落在沉积和沉积改造区,而粒状黄铁矿则落在岩浆和热液区,表明区内胶状黄铁矿为原生沉积成因,而粒状黄铁矿为岩浆热液交代成因的。此外,崔彬等(2002)和孔凡斌等(2012)曾对武山胶状黄铁矿和粒状黄铁矿进行了稀土和微量元素研究,分析结果同样也显示出沉积成因和热液交代成因2种类型。

黄铜矿:武山矿区黄铜矿具有典型热液成因的结构构造,形成于中低温环境,形成时间稍晚于辉钼矿和粒状黄铁矿。

磁铁矿:磁铁矿类质同象置换的主要类型具有指示成因的意义(段士刚等,2014),如岩浆岩中的磁铁矿,Ti含量高,而岩浆期后形成的各类交代岩石中的磁铁矿,Ti含量显著降低(徐国风等,1979);矽卡岩中的磁铁矿Mg、Mn和Ca含量高,岩浆岩中次之,区域变质岩中则最低(林师整,1982)。武山磁铁矿中的主要类质同象置换元素为Al、Mn和Mg,这与矽卡岩中的磁铁矿相类似。

在林师整(1982)的 $\text{TiO}_2\text{-}\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}(\text{MgO}+\text{MnO})$ 图解(图14a)上,武山层状矽卡岩中的磁铁矿主要位于

MgO和MnO端员的矽卡岩型和沉积变质型区域,而接触交代矽卡岩中的磁铁矿主要位于接触交代型和沉积变质区域。在靳是琴等(1986)的 $\text{TiO}_2\text{-}\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}\text{MgO}$ 图解(图14b)上,武山层状矽卡岩中的磁铁矿落在热液型镁矽卡岩型和沉积变质、热液叠加型区域内,而接触交代矽卡岩中的磁铁矿则落在热液型及钙矽卡岩型区域内。上述图解表明,磁铁矿是矽卡岩岩浆期后热液交代作用的产物,其中层状矽卡岩中的磁铁矿与镁质矽卡岩关系密切,接触交代的磁铁矿与钙质矽卡岩关系密切。

综上所述,武山铜矿床的磁铁矿是与矽卡岩有关的岩浆期后热液交代作用的产物,其中层状矽卡岩中磁铁矿相对富MgO和MnO,贫 Al_2O_3 ,受地层影响相对明显(近地层),与镁质矽卡岩关系密切;接触交代矽卡岩中磁铁矿相对富 Al_2O_3 ,贫MgO和MnO,受岩浆岩影响相对明显(近岩体),与钙质矽卡岩关系密切。

5.3 矿物对成矿过程的指示

大量的矿床地质和地球化学资料表明,在九瑞矿集区内广泛存在古生代海相沉积成矿作用(富士谷等,1977;顾连兴,1984;顾连兴等,1986;岳文浙等,1986;常印佛等,1991;翟裕生等,1992;王文斌等,1994;徐克勤等,1996)。古生代区域成矿作用在区域上形成了一批以S、Fe为主的块状硫化物矿床和矿源层(常印佛等,1991),这些矿床成为燕山期壳幔混源岩浆热液成矿作用叠加改造的载体(唐永成等,1998)。董平等(1995)采用Rb-Sr同位素等时线法对武山铜矿床中层状硫化物矿体黄铁矿进行了年龄测试,得到等时线年龄为 $(328\pm21)\text{ Ma}$,属于晚石炭世黄龙组时代,这证明了原生层状硫化物矿体为石炭系海相沉积成矿作用的产物。本文对层状硫化物矿体中胶状黄铁矿的成因矿物学研究表明,区内胶状黄铁矿为原生沉积成因。这也验证了本区在石炭纪发生了海相沉积成矿作用,形成了重要的矿源层。

自中生代以来,特别是晚侏罗世至早白垩世期间,长江中下游地区发生了大规模的岩石圈减薄和强烈的壳幔相互作用(杜杨松等,2007)。壳幔相互作用引起了地幔隆起带及其附近的部分熔融作用,随后是裂解和伸展作用,形成了深部碱性玄武质原始岩浆(周涛发等,2000)。碱性玄武岩浆沿着基底断裂上升侵位,在上侵和演化的过程中,原始岩浆发生结晶分异,并且同化混染地壳物质,形成高钾钙碱

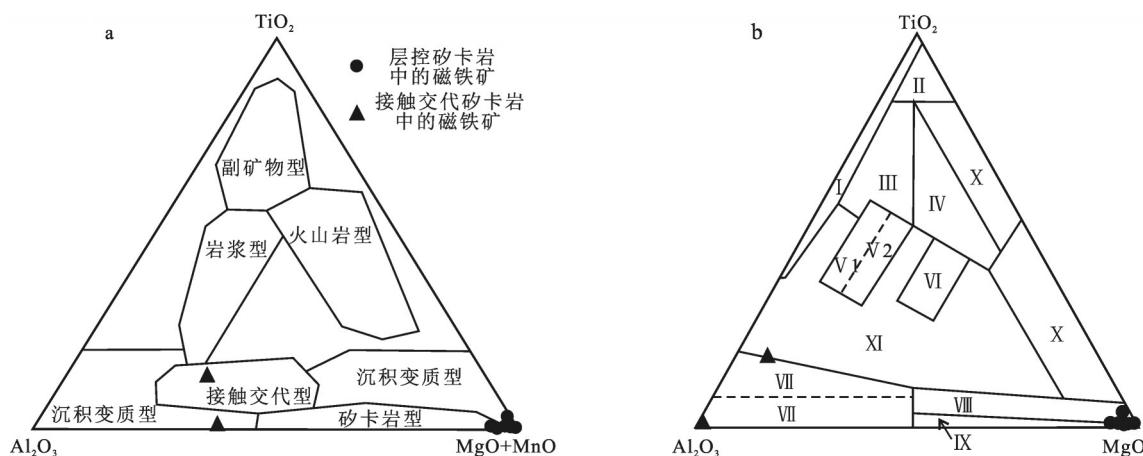


图14 武山铜矿床磁铁矿 $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-(MgO+MnO)}$ 成因图解(a; 据林师整, 1982)和 $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 成因图解(b; 据是琴等, 1986)

I—花岗岩区; II—玄武岩区; III—辉长岩区; IV—橄榄岩区; V1—角闪石岩区; V2—闪长岩区; VI—金伯利岩区; VII—热液型及矽卡岩型(虚线以上为深成热液区, 以下为热液型及钙矽卡岩型); VIII—热液型镁矽卡岩型; IX—沉积变质、热液叠加型; X—碳酸盐岩型; XI—过渡区

Fig. 14 Ternary diagram of $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-(MgO+MnO)}$ (a; modified after Lin, 1982) and $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$

(b; modified after Jin et al., 1986)

I—Granite area; II—Basalt area; III—Gabbro area; IV—Peridotite area; V1—Hornblendite area; V2—Diorite area; VI—Kimberlite area; VII—Hydrothermal type and calcium skarn area; VIII—Hydrothermal type and magnesium skarn area; IX—Sedimentary metamorphic and hydrothermal superimposition area; X—Carbonate rock area; XI—Intermediate area

性系列中酸性岩浆(闪长质岩浆),并在中上地壳(10 km左右)的深浅变质过渡带(毛景文等, 2006)附近形成浅部岩浆房(杜杨松等, 2004; Du et al., 2013),岩浆挥发分增加,铜、钼等成矿物质开始聚集。在高压的作用下,浅部岩浆房的岩浆沿着深断裂构造系统继续上侵,同时岩浆结晶分异和同化混染作用持续进行,岩浆中成矿流体、成矿物质含量急剧增加,并形成含矿的岩浆气液。随着岩浆的进一步上侵,富含成矿金属、F、Cl等物质的挥发相通过岩浆减压作用发生相分离。由于岩浆内部流体压力超过静岩压力,花岗质岩体冷凝顶壳与相近围岩裂开,剧烈的减压造成岩浆流体的沸腾,并释放出岩浆流体顶部所剩余的岩浆挥发分和大量超临界流体,引发大规模岩浆期后热液活动,与围岩发生交代反应。武山矿区矽卡岩正是由来自花岗质岩体的高温热水溶液沿岩体接触带与围岩岩性界面,通过渗透交代作用和局部扩散作用形成的。从野外地质调研和室内岩相学来看,硅灰石代表着交代前锋,随着交代作用增强,生成大量辉石和石榴子石,形成块状矽卡岩。矽卡岩矿物的生成,造成大理岩 CO_2 的丢失,密度增加,矿物多发育为粒状,体积减少,使原岩孔隙度和渗透性增加,有利于成矿金属以络合物形式搬运。

而成矿流体中 CO_2 的含量增高,又增强了流体萃取铁铜等物质的能力(Meinert, 1992)。

继矽卡岩阶段之后,武山矿区矽卡岩普遍发生了退化蚀变作用(图8, 图9a、9b),以磁铁矿、阳起石和透闪石的发育为标志。

随着流体温度的降低,石榴子石常蚀变为石英、磁铁矿和方解石的集合体,而辉石则在水化反应中被阳起石和透闪石所替代。在退化蚀变作用后期,绿帘石(图8b、图9d)的发育指示了成矿流体Al组分的带入,其可能来自于岩体中长石类的分解及钙铝榴石的蚀变。

退化变质反应消耗了成矿流体中大量的水和 CO_2 ,生成体积增量很大的含水矿物,许多反应体积膨胀可达30%~55%(O'Hanley, 1996)。退变质生成物体积增加不仅导致孔隙流体压力的增加,还引起固体应力场的变化,使岩石发生破裂(Jamtveit et al., 2008),导致流体因扩容而压力骤降,这种泄压作用会引起流体沸腾、相分离以及围岩中流体向破裂处汇流、混合和反应,最终导致矿物的沉淀。

在含水矿物、石英、方解石的形成以及金属矿物沉淀的同时,实际又使破裂的围岩愈合,引起岩石孔隙度和渗透率减少,进入下一次泄压的循环(刘亮

明, 2011), 形成大量酸性流体淋滤阶段的石英-硫化物脉。

综上所述, 武山矿床中金属矿物的大量堆积, 其动力来源于自岩浆上侵过程中的压力变化体系, 即流体超压→流体沸腾, 裂隙生成→减压排泄, 裂隙愈合→流体超压的循环, 直至整个成矿体系完全开放, 并与大气水发生混合, 使成矿流体中剩余金属最终沉淀(东前等, 2015)。此外, 金属矿物沉淀过程中, 含矿热液对早期形成的矿源层进行叠加改造, 致使矿区块状硫化物矿体富集铜等成矿物质, 在靠近岩体一侧的地层内(温度相对较高), 形成武山层状矽卡岩型铜矿体, 在远离岩体一侧的地层内(温度相对较低), 形成层状硫化物型铜矿体。同样, 当含矿流体进入侵入体与围岩的接触带之间时, 形成接触交代矽卡岩型铜矿体。

6 结 论

(1) 矿床发育有层状硫化物型、层状矽卡岩型和接触交代矽卡岩型三种成因矿体和相应的3种类型矿石, 它们在蚀变分带、矿物组合和结构构造等方面有明显差异, 分别显示出原生沉积、叠加改造和岩浆热液交代产物的特征。

(2) 石榴子石是岩浆期后热液渗滤交代作用的产物, 层状矽卡岩中石榴子石相对富Fe, 而接触交代矽卡岩中石榴子石相对富Al; 矿石胶状黄铁矿为原生沉积成因, 而粒状黄铁矿和黄铜矿以及磁铁矿等为岩浆热液交代成因, 其中层状矽卡岩中磁铁矿相对富MgO和MnO, 贫Al₂O₃, 受地层影响明显, 而接触交代矽卡岩中磁铁矿相对富Al₂O₃, 贫MgO和MnO, 受岩浆岩影响明显。

(3) 武山铜矿床的形成可能经历了原生沉积作用、岩浆热液交代作用及叠加改造作用等复杂成矿过程。

志 谢 野外工作得到了江铜集团刘国洪工程师和李明骏工程师的大力支持, 电子探针工作得到了核工业北京地质研究院电子探针分析室实验人员的热情帮助, 沈能平副研究员及其他三位匿名审稿人对本文提出了详细的修改意见, 在此一并表示衷心感谢!

References

- Bao J B, Tang S Q and Yu Z Q. 2002. Jiangxi copper geology[M]. Nan-
- chang: Jiangxi Science and Technology Press. 75-85(in Chinese with English abstract).
- Chang Y F, Liu X P and Wu Y C. 1991. The copper-iron belt of the Lower and Middle reaches of the Yangtze River[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-379(in Chinese with English abstract).
- Crowe D E, Riciputi L R, Bezenek S and Ignatiev A. 2001. Oxygen isotope and trace element zoning in hydrothermal garnets: Windows into large-scale fluid-flow behavior[J]. Geology, 29(6): 479-482.
- Cui B, Li Z W and Xu B Y. 1995. Discussion on origin of kaolinite layer in north ore zone of Wushan copper deposit[J]. Geoscience, 9(4): 495-500(in Chinese with English abstract).
- Cui B, Yang M Y and Zhan Z Y. 2002. Research genetic mineralogy of pyrite for north ore zone of Wushan copper deposit[J]. Geology and Prospecting, 38 (5): 44-48(in Chinese with English abstract).
- Ding X, Jiang S Y, Ni P, Gu L X and Jiang Y H. 2005. Zircon SIMS U-Pb geochronology of host granitoids in Wushan and Yongping copper deposits, Jiangxi Province[J]. Geological Journal of China Universities, 11(3): 383-389(in Chinese with English abstract).
- Dong P, Wang W B, Li W D and Xie H G. 1995. The Sr-isotopic geochemistry and the genesis of stratiform cupriferous pyrite orebodies, Wushan copper deposit, Jiangxi, East China[J]. Volcanology and Mineral Resources, 16(2): 94-100(in Chinese with English abstract).
- Dong Q, Du Y S, Cao Y, Pang Z S, Song L X and Zheng Z. 2011. Composition of biotite within the Wushan granodiorite, Jiangxi Province, China: Petrogenetic and metallogenetic implications[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 31(2): 1-6(in Chinese with English abstract).
- Dong Q, Du Y S, Miao W T, Cao Y, Pang Z S, Zeng R and Wang J B. 2015. Evolution of ore-forming fluids in the Wushan skarn copper deposit, Jiangxi Province, and its ore-forming implications[J]. Mineral Deposits, 34(5): 929-947(in Chinese with English abstract).
- Du Y L. 2013. Ore-controlling factors and metallogenetic model of strata bound skarn deposits in Tongling area, Anhui Province[D]. Beijing: China University of Geosciences, 1-158(in Chinese with English abstract).
- Du Y L, Qin X L, Calvin G B, Cao Y, Dong Q and Du Y S. 2014. Sulphide melt evolution in upper mantle to upper crust magmas, Tongling, China[J]. Geoscience Frontiers, 5: 237-248.
- Du Y S, Qin X L and Lee X J. 2004. Mesozoic mantle-derived magma underplating in Tongling, Anhui Province: Evidence from megac-

- rysts and xenoliths[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 23 (2): 109-116(in Chinese with English abstract).
- Du Y S, Cao Y, Yuan W M, Lou Y E, Li S T and Lu X. 2007. Mesozoic post-collisional to postorogenic magmatic activities and crustal interaction with mantle along the Yangtze River, Anhui Province: Evidence from volcanic-intrusive complexes and xenoliths[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (6): 1294-1302(in Chinese with English abstract).
- Duan S G, Dong M H, Zhang Z H, Jiang Z S and Li F M. 2014. A LA-ICP-MS analysis of elements in magnetite from Dunde iron deposit in Western Tianshan Mountains, Xinjiang: Constraints of genesis of the deposit[J]. *Mineral Deposits*, 33(6): 1325-1337(in Chinese with English abstract).
- Fu S G, Yan X Y, Yuan C X, Yan Q N, Wang Z T, Li N Y and Rong H B. 1977. Geological characteristics of the Carboniferous submarine exhalative sedimentary pyrite-type copper deposits in the Lower-Middle Yangtze area[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 1: 43-67(in Chinese).
- Gasper M, Knaack C, Meinert L D and Moretti R. 2008. REE in skarn systems: A LA-ICP-MS study of garnets from Crown Jewel gold deposit[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72 (1): 185-205.
- Gu L X. 1984. The Middle Carboniferous marine volcanics and the origin of the bedded ore in Wushan, Jiangxi Province[J]. *Journal of Guilin College of Geology*, 4(4): 91-102(in Chinese with English abstract).
- Gu L X and Xu K Q. 1986. On the Carboniferous submarine massive sulphide deposits in the lower reaches of the Changjiang (Yangzi) River[J]. *Acta Geologica Sinica*, 60(2): 176-188(in Chinese with English abstract).
- Gu L X. 1987. The Mesozoic intrusive associated with the carboniferous massive sulphide ore deposit in Wushan, Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, (1): 64-76(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Zaw K and Qu X M. 2001. Origin of the Gacun volcanic-hosted massive sulfide deposit in Sichuan, China: Fluid inclusion and oxygen isotope evidence[J]. *Econ. Geol.*, 96: 1491-1512.
- Hou Z Q, Han F, Xia L Q, Zhang Q L, Qu X J, Li Z Q, Bie F L, Wang L Q, Yu J J and Tang S H. 2003. Hydrothermal systems and metallogeny on the modern and ancient sea-floor: Case study of some VMS deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-423 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Yang Z S, Lv Q T, Zeng P S, Xie Y L, Meng Y F, Tian S H, Xu W Y, Li H Y, Jiang Z P, Wang X C and Yao X D. 2011. The large-scale Dongguashan deposit, Shizishan district in East China: Carboniferous sedex-type massive sulfides overprinted by late Jurassic skarn Cu mineralization[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 659-686(in Chinese with English abstract).
- Huang E B, Zhang N T and Luo D S. 1990. The genesis of the Chenmenshan and Wushan copper deposits[J]. *Mineral Deposits*, 9(4): 291-308(in Chinese with English abstract).
- Jia W. 1999. A discussion on the genesis of the Chenmenshan and Wushan massive sulfide copper deposits in Jiangxi Province[J]. *Jiangxi Geology*, 13(1): 33-37(in Chinese with English abstract).
- Jiang C Y and An S Y. 1984. On chemical characteristics of calcic amphiboles from igneous rocks and their petrogenesis significance[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 5 (3): 1-9(in Chinese with English abstract).
- Jiang S Y, Li L, Zhu B, Ding X, Jiang Y H, Gu L X and Ni P. 2008. Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic compositions of granodiorite from the Wushan copper deposit, Jiangxi Province and their implications for petrogenesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1679-1690(in Chinese with English abstract).
- Jiang S Y, Sun Y, Sun M Z, Bian L Z, Xiong Y G, Yang S Y, Cao Z Q and Wu Y M. 2010. Reiterative fault systems and superimposed mineralization in the Jiurui metallogenic cluster district, Middle and Lower Yangtze River mineralization belt, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2571-2767(in Chinese with English abstract).
- Jiang S Y, Ding Q F, Yang S Y, Zhu Z Y, Sun M Z, Sun Y and Bian L Z. 2011. Discovery and significance of carbonate mud mounds from Cu-polymetallic deposits in the Middle and Lower Yangtze Metallogenic Belt: Examples from the Wushan and Dongguashan deposits[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 744-756(in Chinese with English abstract).
- Jiang S Y, Xu Y M, Zhu Z Y, Zhou W, Kong F B and Sun Y. 2013. Study on Mesozoic tectonics and granitic magmatism and their relationship with Cu-Au mineralization in the Jiurui ore district, Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(12): 4051-4068 (in Chinese with English abstract).
- Jamtveit B, Malthe-Sorensen A and Kostenko O. 2008. Reaction enhanced permeability during retrogressive metamorphism[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 267(3-4): 620-627.
- Jamtveit B, Wogelius R A and Fraser D G. 1993. Zonation patterns of skarn garnets: Records of hydrothermal system evolution[J].

- Geology, 21(2): 113-116.
- Jin S Q and Li H C. 1984. Mineralgenesis conspectus[M]. Changchun: Jilin University Press. 1-318(in Chinese).
- Kong F B, Jiang S Y, Xu Y M, Zhu Z Y, Qian H D and Bian L Z. 2012. Submarine hydrothermal exhalation with superimposed magmatic-hydrothermal mineralization in the Wushan copper deposit, Jiangxi Province: Constraints from geology, ore texture and ore deposit geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 3929-3937(in Chinese with English abstract).
- Lambert I B. 1976. The McArthur zinc-lead-silver deposit: features, metallogenesis and comparisons with some other stratiform ores[A]. In: Wolf K H, ed. *Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits*, Vol.6[M]. Amsterdam: Elserior Scientific Publishing Company. 535-585.
- Large D E. 1981. Sediment-hosted submarine exhalative lead-zinc deposits-A review of their geological characteristics and genesis[A]. In: Wolf K H, ed. *Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits*, Vol.9[M]. Amsterdam: Elserior Scientific Publishing Company, 469-507.
- Large R R. 1992. Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits: Features, styles and genetic models[J]. *Econ. Geol.*, 87: 469-470.
- Li J W, Li X H, Pei R F, Mei Y H, Wang Y L, Qu W J, Huang X B and Zang W S. 2007. Re-Os age of molybdenite from the southern ore zone of the Wushan copper deposit, Jiangxi Province, and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(6): 801-807 (in Chinese with English abstract).
- Li W D. 1997. More efforts should be made for research on ore deposits[J]. *Volcanology and Mineral Resources*, 18(2): 88-92(in Chinese with English abstract).
- Li X H, Li W X, Wang X C, Li Q L, Liu Y, Tang G Q, Gao Y Y and Wu F Y. 2010. SIMS U-Pb zircon geochronology of porphyry Cu-Au-(Mo) deposits in the Yangtze River Metallogenic Belt, eastern China: Magmatic response to early Cretaceous lithospheric extension[J]. *Lithos*, 119: 427-438.
- Li Y, Lv G X, Shen Y K and Wu Y M. 2010. The characteristics of tectonic-alteration and mineralization at Wushan copper deposit, Jiangxi and prognosis of deep-seated ore bodies[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 25(1): 18-23(in Chinese with English abstract).
- Lin S Z. 1982. A contribution to the chemistry, origin and evolution of magnetite[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, (3): 166-174(in Chinese with English abstract).
- Liu L M. 2011. Fluid overpressure and rock fracturing caused by shallow intrusion and their constraints on hydrothermal mineralization[J]. *Earth Science Frontiers*, 18 (5): 78-89(in Chinese with English abstract).
- Luo Z S. 1991. A new type of copper deposit in Jiurui area: A summary about geological characteristic of veinlet-disseminated copper deposit[J]. *Mineral Resources and Geology*, 5 (6): 423(in Chinese).
- Lydon J W. 1988. Ore deposit models #14 Volcanogenic massive sulfide deposits Part 2[J]. *Geoscience Canada*, 15: 43-65.
- Mao J W, Stein H, Du A D, Zhou T F, Mei Y X, Li Y F, Zang W S and Li J W. 2004. The Re-Os isotope accrate timing of copper (molybdenum) in the Middle and Lower Yangtze area and its indication for metallogenesis[J]. *Acta Geological Sinica*, 78(1): 121-131 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Hu R Z, Chen Y C and Wang Y T. 2006. The large-scale metallogenesis and large clusters of mineral deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-533(in Chinese with English abstract).
- Meinert L D, Dipple G M and Nicolescu S. 2005. World skarn deposits[J]. *Economic Geology* 100th Anniversary Volume, 299-336.
- Meinert L D. 1992. Skarns and skarn deposits[J]. *Geoscience Canada*, 19(4): 145-162.
- Meng L Y. 1997. Metallogenic characteristics of the Wushan intrusive massive sulphide deposit, Jiangxi Province[J]. *Science in China (Series D)*, 27(6): 509-513(in Chinese).
- Meng L Y, Huang X D, Huang E B and Zhang W X. 1982. The characteristics of the sulfur isotopic composition of Wushan copper deposits[J]. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 3: 83-90(in Chinese with English abstract).
- Meng L Y, Huang X D, Huang E B and Zhang W X. 1983. The ore-forming temperature of the Wushan copper deposits[J]. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 1: 27-32(in Chinese with English abstract).
- O' Hanley D S. 1996. Serpentinites: Recorders of tectonic and petrological history[M]. New York: Oxford University Press. 1-296.
- Pan Y and Dong P. 1999. The Lower Changjiang (Yangzi / Yangtze River) metallogenic belt, east central China: Intrusion- and wall rock-hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits[J]. *Ore Geology Review*, 15: 177-242.
- Ray G E, Ettlinger A D and Meinert L D. 1990. Gold skarns: Their distribution, characteristics and problems in classification[A]. In: *Geological Fieldwork 1989, Paper 1990-1*[M]. British Columbia:

- British Columbia Geological Survey, 237-246.
- Smith M P, Henderson P, Jeffries T E R, Long J and Williams C T. 2004. The rare earth elements and uranium in garnet from the Beinn an Dubhaich aureole, Skye, Scotland, UK: Constraints on processes in a dynamic hydrothermal system[J]. Journal of Petrology, 45(3): 457-484.
- Tang Y C, Wu C Y, Chu G Z, Xing F M, Wang Y M, Cao F Y and Chang Y F. 1998. Geology of copper-gold polymetallic deposits in the along-Changjiang area of Anhui Province[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-351(in Chinese with English abstract).
- Wang W B, Ji S X, Xing W C, Wu H R and Zhou H M. 1988. A typical polygenetic deposit Wushan copper deposit, Jiangxi Province[J]. Bulletin of Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, 9(1): 51-62(in Chinese with English abstract).
- Wang W B, Li W D, Dong P and Xie H G. 1994. The genesis of cupriferous pyrite deposits, Middle-Lower Yangtze area, East China[J]. Volcanology and Mineral Resources, 15(2): 25-34(in Chinese with English abstract).
- Wang Z L. 1987. A discussion on geological feature and genesis of the Wushan copper deposit[J]. Geology and Exploration, 7: 14-19(in Chinese with English abstract).
- Xu G F and Shao J L. 1979. The typomorphic characteristics of magnetite and its significance[J]. Geology and Prospecting, 3: 30-37(in Chinese).
- Xu K Q and Zhu J C. 1978. Origin of the sedimentary- (or volcanosedimentary-) iron-copper deposits in some fault depression belts in southeast China[J]. Fujian Geology, (4): 1-68(in Chinese).
- Xu K Q, Wang H N, Zhou J P and Zhu J C. 1996. A discussion on the exhalative sedimentary massive sulfide deposits of South China[J]. Geological Journal of China Universities, 2 (3): 241-256(in Chinese with English abstract).
- Xu T G. 2007. Ore-controlling factor of Jiangxi Wushan copper deposit and ore-prospecting orientation[J]. Metal Mine, 375: 76-78(in Chinese with English abstract).
- Yang S Y, Jiang S Y, Li L, Sun Y, Sun M Z, Bian L Z, Xiong Y G and Cao Z Q. 2011. Late Mesozoic magmatism of the Jiurui mineralization district in the Middle-Lower Yangtze River metallogenic belt, eastern China: Precise U-Pb ages and geodynamic implications[J]. Gondwana Research, 20: 831-843.
- Yardley B W D, Rochelle C A, Barnicoat A C and Lloyd G E. 1991. Oscillatory zoning in metamorphic minerals: An indicator of infiltration metasomatism[J]. Mineralogical Magazine, 55(380): 357-365.
- Yue W Z, Wei N Y, Song W and Liu F M. 1986. Sedimentary facies of the late Carboniferous Weining age and its control to the metallogenesis of massive sulfide deposits[J]. Bulletin of Nanjing Institute of Geological Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, 7 (4): 19-41(in Chinese with English abstract).
- Zhai Y S, Yao S Z and Lin X D. 1992. Metallogenic regularity of iron and copper deposits in the middle and lower valley of the Yangtze River[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-235(in Chinese with English abstract).
- Zhai Y S, Xiong Y L, Yao S Z and Lin X D. 1996 Metallogeny of copper and iron deposits in the eastern Yangtse Craton, east-central China[J]. Ore Geology Reviews, 11: 229-248.
- Zhai Y S, Wang J P, Peng R M and Liu J J. 2009. Research on superimposed metallogenic systems and polygenetic mineral deposits[J]. Earth Science Frontiers, 16(6): 282-290(in Chinese with English abstract).
- Zhao J S, Zhao B, Zhang Z Z and Wang R. 2003. Compositions of melt inclusions in garnet and pyroxene from skarn deposits distributed in the area from Daye to Chenmenshan[J]. Geochimica, 32(6): 540-550(in Chinese with English abstract).
- Zhao J S, Qiu X L, Zhao B, Tu X L, Yu J and Lu T S. 2007. REE geochemistry of mineralized skarns from Daye to Wushan region, China[J]. Geochimica, 36(4): 400-412(in Chinese with English abstract).
- Zhao Z H and Zhou L D. 1997. REE geochemistry of some alkali-rich intrusive rocks in China[J]. Science in China(Series D), 40(2): 145-158.
- Zhou T F and Yue S C. 2000. Forming conditions and mechanism for the fluid ore-forming system of the copper, gold deposits in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River area[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis, 36(5): 697-707(in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 包家宝,汤树清,余志庆. 2002. 江西铜矿地质[M]. 南昌:江西科学技术出版社. 75-85.
- 常印佛,刘湘培,吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带[M]. 北京:地质出版社. 1-379.
- 崔彬,李忠文,许碧燕. 1995. 江西武山铜矿床北矿带层状高岭土成

- 因商榷[J]. 现代地质, 9(4): 495-500.
- 崔彬, 杨明银, 詹朝阳. 2002. 武山铜矿北矿带黄铁矿的成因矿物学研究[J]. 地质与勘探, 38(5): 44-48.
- 丁昕, 蒋少涌, 倪培, 顾连兴, 姜耀辉. 2005. 江西武山和永平铜矿含矿花岗质岩体锆石 SIMS U-Pb 年代学[J]. 高校地质学报, 11(3): 383-389.
- 董平, 王文斌, 李文达, 谢华光. 1995. 武山铜矿层状含铜黄铁矿矿体锶同位素地球化学特征及矿床成因[J]. 火山地质与矿产, 16(2): 94-100.
- 东前, 杜杨松, 曹毅, 庞振山, 宋林旭, 郑震. 2011. 江西武山花岗闪长斑岩中黑云母成分特征及其成岩成矿意义[J]. 矿物岩石, 31(2): 1-6.
- 东前, 杜杨松, 苗文韬, 曹毅, 庞振山, 曾锐, 王剑波. 2015. 江西武山矽卡岩型铜矿床成矿流体演化及其成矿意义[J]. 矿床地质, 34(5): 929-947.
- 杜杨松, 秦新龙, 李铉具. 2004. 安徽铜陵地区中生代幔源岩浆底侵作用——来自矿物巨晶和岩石包体的证据[J]. 岩石矿物学杂志, 23(2): 109-116.
- 杜杨松, 曹毅, 袁万明, 楼亚儿, 李顺庭, 鲁鑫. 2007. 安徽沿江地区中生代碰撞后造山后岩浆活动和壳幔相互作用——来自火山-侵入杂岩和岩石包体的证据[J]. 岩石学报, 23(6): 1294-1302.
- 杜铁伦. 2013. 安徽铜陵地区层控矽卡岩型矿床控矿因素及成矿模型研究[D]. 北京: 中国地质大学. 1-158.
- 段士刚, 董满华, 张作衡, 蒋宗胜, 李凤鸣. 2014. 西天山敦德铁矿床磁铁矿原位 LA-ICP-MS 元素分析及意义[J]. 矿床地质, 33(6): 1325-1337.
- 富士谷, 阎学义, 袁成祥, 鄢庆南, 王则田, 李南洋, 容华贝. 1977. 长江中、下游成矿带石炭纪海底火山喷发-沉积黄铁矿型矿床的地质特征[J]. 南京大学学报(自然科学), (4): 43-67.
- 顾连兴. 1984. 江西武山中石炭世海相火山岩和块状硫化物矿床[J]. 桂林冶金地质学院学报, 4(4): 91-102.
- 顾连兴, 徐克勤. 1986. 论大陆地壳断裂拗陷带中的华南型块状硫化物矿床[J]. 矿床地质, 5(2): 1-13.
- 顾连兴. 1987. 江西武山与华南型块状硫化物矿床伴生的燕山期侵入岩[J]. 岩石学报, (1): 64-76.
- 侯增谦, 韩发, 夏林圻, 张绮玲, 曲晓明, 李振清, 别风雷, 王立全, 余金杰, 唐绍华. 2003. 现代与古代海底热水成矿作用——以若干火山成因块状硫化物矿床为例[M]. 北京: 地质出版社. 1-423.
- 侯增谦, 杨竹森, 吕庆田, 曾普胜, 谢玉玲, 蒙义峰, 田世洪, 徐文艺, 李红阳, 姜章平, 王训成, 姚孝德. 2011. 安徽铜陵冬瓜山大型铜矿: 海底喷流-沉积与矽卡岩化叠加复合成矿过程[J]. 地质学报, 85(5): 659-686.
- 黄恩邦, 张迺堂, 罗钊生. 1990. 城门山、武山铜矿床成因[J]. 矿床地质, 9(4): 291-300.
- 贾伟. 1999. 江西城门山、武山矿区块状硫化物型铜矿成因新探讨[J]. 江西地质, 13(1): 33-37.
- 姜常义, 安三元. 1984. 论火成岩中钙质角闪石的化学组成特征及其岩石学意义[J]. 矿物岩石, 5(3): 1-9.
- 蒋少涌, 李亮, 朱碧, 丁昕, 姜耀辉, 顾连兴, 倪培. 2008. 江西武山铜矿区花岗闪长斑岩的地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素组成及成因探讨[J]. 岩石学报, 24(8): 1679-1690.
- 蒋少涌, 孙岩, 孙明志, 边立曾, 熊永根, 杨水源, 曹钟清, 吴亚民. 2010. 长江中下游成矿带九瑞矿集区叠合断裂系统和叠加成矿作用[J]. 岩石学报, 26(9): 2751-2767.
- 蒋少涌, 丁清峰, 杨水源, 朱志勇, 孙明志, 孙岩, 边立曾. 2011. 长江中下游成矿带铜多金属矿床中灰泥丘的发现及其意义——以武山和冬瓜山铜矿为例[J]. 地质学报, 85(5): 744-756.
- 蒋少涌, 徐耀明, 朱志勇, 周巍, 孔凡斌, 孙岩. 2013. 九瑞矿集区燕山期构造岩浆-岩浆作用及其与铜金多金属成矿关系研究[J]. 岩石学报, 29(12): 4051-4068.
- 靳斯琴, 李鸿超. 1986. 成因矿物学概论[M]. 长春: 吉林大学出版社. 1-318.
- 孔凡斌, 蒋少涌, 徐耀明, 朱志勇, 钱汉东, 边立曾. 2012. 江西武山铜矿床海底喷流与岩浆热液叠加成矿作用: 控矿地质条件、矿石结构构造与矿床地球化学制约[J]. 岩石学报, 28(12): 3929-3937.
- 李进文, 李旭辉, 裴荣富, 梅燕雄, 王永磊, 屈文俊, 黄修保, 藏文栓. 2007. 江西武山铜矿南矿带辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 81(6): 801-807.
- 李文达. 1997. 矿床研究急需加强[J]. 火山地质与矿床, 18(2): 88-92.
- 李颖, 吕吉贤, 申玉科, 吴亚民. 2010. 江西九江武山铜矿构造-蚀变矿化特征及深部成矿预测[J]. 地质找矿论丛, 25(1): 18-23.
- 林师整. 1982. 磁铁矿矿物化学、成因及演化的探讨[J]. 矿物学报, (3): 166-174.
- 刘亮明. 2011. 浅成岩体引发的流体超压与岩石破裂及其对成矿的制约[J]. 地学前缘, 18(5): 78-89.
- 罗钊生. 1991. 九瑞地区一种潜在的铜矿新类型-北山细脉浸染型铜矿床地质特征简介[J]. 矿产与地质, 5(6): 423.
- 毛景文, Holly S, 杜安道, 周涛发, 梅燕雄, 李永峰, 藏文栓, 李进文. 2004. 长江中下游地区铜金(钼)矿 Re-Os 年龄测定及其对成矿作用的指示[J]. 地质学报, 78(1): 121-131.
- 毛景文, 胡瑞中, 陈毓川, 王义天. 2006. 大规模成矿作用与大型矿集区(上册)[M]. 北京: 地质出版社. 1-533.
- 孟良义, 黄熏德, 黄恩帮, 张文学. 1982. 武山铜矿床硫同位素组成特

- 征[J]. 长春地质学院学报, 3: 83-90.
- 孟良义, 黄薰德, 黄恩帮; 张文学. 1983. 武山铜矿床的成矿温度[J]. 长春地质学院学报, 1: 27-32.
- 孟良义. 1997. 江西武山侵入型块状硫化物铜矿床的成矿特征[J]. 中国科学(D辑), 27(6): 509-513.
- 唐永成, 吴言昌, 储国正, 邢凤鸣, 王永敏, 曹奋扬, 常印佛. 1998. 安徽沿江地区铜多金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社. 1-351.
- 王文斌, 季绍新, 邢文臣, 巫怀仁, 周汉民. 1988. 一个典型的复成因矿床——江西武山铜矿[J]. 中国地质科学院南京地质矿产研究所刊, 9(1): 51-62.
- 王文斌, 李文达, 董平, 谢华光. 1994. 论长江中下游地区含铜黄铁矿型矿床成因[J]. 火山地质与矿产, 15(2): 25-34.
- 王忠玲. 1987. 武山铜矿床的地质特征及成因[J]. 地质与勘探, 7: 14-19.
- 徐国风, 邵洁涟. 1979. 磁铁矿的标型特征及其实际意义[J]. 地质与勘探, 3: 30-37.
- 徐克勤, 朱金初. 1978. 我国东南部几个断裂拗陷带中沉积(或火山沉积)热液叠加类铁铜矿床成因的探讨[J]. 福建地质, (4): 1-68.
- 徐克勤, 王鹤年, 周建平, 朱金初. 1996. 论华南喷流-沉积块状硫化物矿床[J]. 高校地质学报, 2(3): 241-256.
- 徐唐光. 2007. 江西武山铜矿床控矿因素及找矿方向[J]. 金属矿山, 375: 76-78.
- 岳文浙, 魏乃颐, 宋炜, 刘凤美. 1986. 江西九瑞地区晚石炭世威宁期沉积相及其对块状硫化物矿床的控制作用[J]. 中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊, 17(4): 19-41.
- 翟裕生, 姚书振, 林新多. 1992. 长江中下游地区铁, 铜等成矿规律研究[M]. 北京: 地质出版社. 1-235.
- 翟裕生, 王建平, 彭润民, 刘家军. 2009. 叠加成矿系统与多成因矿床研究[J]. 地学前缘, 16(6): 282-290.
- 赵劲松, 赵斌, 张重泽, 王冉. 2003. 大冶-城门山夕卡岩矿床石榴子石和辉石中熔融包裹体成分研究[J]. 地球化学, 32(6): 540-550.
- 赵劲松, 邱学林, 赵斌, 涂湘林, 虞珏, 芦铁山. 2007. 大冶-武山矿化夕卡岩的稀土元素地球化学研究[J]. 地球化学, 36(4): 400-412.
- 周涛发, 岳书仓. 2000. 长江中下游铜金矿床成矿流体系统的形成条件和演化机理[J]. 北京大学学报(自然科学版), 36(5): 697-707.