

湘南铜山岭矽卡岩铜铅锌矿床矿物组合分带特征及温压条件研究*

黄旭栋¹, 陆建军², 高剑峰³, 章荣清², SIZARET Stanislas⁴, 马东升², 王汝成²

(1 南京师范大学海洋科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 2 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 3 矿床地球化学国家重点实验室, 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550081;

4 Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, UMR 7327-CNRS/Université d'Orléans/BRGM, Orléans 45071, France)

摘要 湘南铜山岭矽卡岩铜铅锌矿床产于铜山岭岩体北东缘隐伏接触带及其外围地层中, 在成因上与铜山岭花岗闪长斑岩密切相关。铜山岭铜铅锌矿床具有独特的成矿分带, 从岩体向外依次发育近端内矽卡岩、近端外矽卡岩、硫化物-石英脉和远端矽卡岩矿体。根据穿切关系、交代结构和矿物组合等地质特征可以把铜山岭铜铅锌矿床划分为4个矿化蚀变阶段, 从早到晚依次为进变质矽卡岩、退变质矽卡岩、石英-硫化物和碳酸盐阶段, 其中石英-硫化物阶段为主成矿阶段。闪锌矿成分压力计研究表明, 近端内矽卡岩型团块状硫化物矿石中闪锌矿的形成压力为 $(3.1 \pm 1.0) \times 10^8$ Pa, 对应的成矿深度为6~12 km, 相当于中—上地壳水平, 说明铜山岭铜铅锌矿床形成于较大深度。近端内矽卡岩、近端外矽卡岩和远端矽卡岩中都存在两阶段绿泥石。绿泥石成分温度计研究表明, 3类矽卡岩中退变质矽卡岩阶段绿泥石的形成温度分别为345~388°C、296~376°C和296~338°C, 代表各类矽卡岩形成温度的下限; 石英-硫化物阶段绿泥石的形成温度分别为270~318°C、209~238°C和200~223°C, 代表各类矽卡岩矿体的成矿温度。3类矽卡岩的绿泥石温度表现出逐步降低的趋势, 指示近端内矽卡岩、近端外矽卡岩和远端矽卡岩矿体依次形成。

关键词 地质学; 矿物组合分带; 绿泥石; 闪锌矿; 温压条件; 矿床成因; 铜山岭

中图分类号: P618.41; P618.42; P618.43

文献标志码: A

Mineral assemblages, zonation and geothermobarometry of the Tongshanling Cu-Pb-Zn skarn deposit, southern Hunan

HUANG XuDong¹, LU JianJun², GAO JianFeng³, ZHANG RongQing², SIZARET Stanislas⁴, MA DongSheng² and WANG RuCheng²

(1 School of Marine Science and Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, Jiangsu, China; 2 State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China; 3 State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, Guizhou, China; 4 Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, UMR 7327-CNRS/Université d'Orléans/BRGM, Orléans 45071, France)

Abstract

The Tongshanling Cu-Pb-Zn skarn deposit in southern Hunan occurs in the northeastern concealed contact zone of the Tongshanling pluton and its peripheral carbonate strata. It is genetically intimately associated with the Tongshanling granodiorite porphyry. The Tongshanling Cu-Pb-Zn deposit exhibits a distinctive outward zonation of proximal endoskarn, proximal exoskarn, sulfide-quartz vein, and distal skarn orebodies from the contact zone.

* 本文得到国家自然科学基金项目(编号:41903039、42025301)、中国博士后科学基金项目(编号:2019M661792)、中国地质调查局地质调查项目(编号:12120113067300)和国家留学基金中法“蔡元培”交流合作项目联合资助

第一作者简介 黄旭栋,男,1991年生,博士,主要从事花岗岩成岩成矿作用研究。Email: xduang@nynu.edu.cn

收稿日期 2022-12-26; 改回日期 2023-05-22。孟秋熠编辑。

According to cross-cutting relationships, replacement textures, and mineral assemblages, the Tongshanling Cu-Pb-Zn deposit can be divided into four stages of alteration and mineralization, i.e., prograde skarn, retrograde skarn, quartz-sulfide, and carbonate stages in sequence, in which the quartz-sulfide stage is the main ore stage. Sphalerite compositional barometry manifests that, the sphalerite in the massive sulfide ore of proximal endoskarn formed under $(3.1 \pm 1.0) \times 10^8$ Pa, corresponding to a middle to upper crustal depth of 6~12 km, indicating that the Tongshanling Cu-Pb-Zn deposit was formed at a deep environment. There are two stages of chlorites in the proximal endoskarn, proximal exoskarn, and distal skarn. Chlorite compositional thermometry manifests that, for the three types of skarns, the chlorite of retrograde skarn stage formed at 345~388°C, 296~376°C, and 296~338°C, respectively, representing the lowest temperatures of skarn formation; and the chlorite of quartz-sulfide stage formed at 270~318°C, 209~238°C, and 200~223°C, respectively, representing the temperatures of mineralization. The three types of skarns display a declining trend of chlorite temperature, indicating that the proximal endoskarn, proximal exoskarn, and distal skarn orebodies were formed in sequence.

Key words: geology, mineral assemblages and zonation, chlorite, sphalerite, P-T conditions, ore genesis, Tongshanling

矽卡岩型矿床是许多金属元素(如Fe、Cu、Pb-Zn、W、Sn、Mo和Au)最主要的成矿类型之一,具有重要的经济价值和研究意义(Einaudi et al., 1981; Meinert et al., 2005; 赵一鸣等, 2012; Chang et al., 2019)。因此,矽卡岩矿床成因一直是地质学家高度关注的科学问题。分带性是矽卡岩矿床最突出的特征,其时空分带模型对指导找矿具有实际意义(Meinert, 1997)。温压条件的限定对理解矽卡岩成矿分带和成矿过程至关重要(Nicolescu et al., 1999; Timón et al., 2009),然而,基于矿物温压条件约束的分带在很多矿床还没有实现。

湘南铜山岭矿床位于钦杭成矿带西段,是在华南地区发现较早的一个矽卡岩型铜铅锌多金属矿床,分带明显。前人对铜山岭矿床的成岩成矿时代和花岗岩成因开展了大量研究(谭克仁, 1983; 王岳军等, 2001; Wang et al., 2003; 魏道芳等, 2007; Jiang et al., 2009; 全铁军等, 2013; 卢友月等, 2015; Zhao et al., 2016; 2017; 黄旭栋等, 2017; 王云峰等, 2017; Huang et al., 2018; Kong et al., 2018; Wu et al., 2021),但矿床地质研究相对薄弱,对矽卡岩成矿分带和成矿过程的关注明显不足。

本文在矿床地质野外调查和矿石结构显微观察的基础上,详细描述了铜山岭铜铅锌矿床的空间分带和矿物组合特征,划分了成矿阶段,并选择贯通性较好的绿泥石和闪锌矿进行了成矿温压研究,获得了与成矿密切相关的温压条件等重要信息,为进一步理解该矿床的成因提供了重要依据。

1 地质背景

钦杭成矿带在大地构造背景上属于扬子板块与华夏板块在新元古代碰撞拼贴形成的构造结合带,是全国21个重点成矿带之一,发育有一系列铜铅锌金银钨锡多金属矿床(杨明桂等, 1997; 毛景文等, 2011; 徐德明等, 2015; 周永章等, 2017)。湘南矿集区地处钦杭成矿带西段(图1a、b),分布有水口山、宝山、黄沙坪等铅锌矿床和瑶岗仙、柿竹园、新田岭、芙蓉、香花岭、魏家等钨锡矿床。这些矿床大多形成于中侏罗世—晚侏罗世,成岩成矿年龄主要集中在165~150 Ma,与花岗岩具有密切的成因联系(路远发等, 2006; Yuan et al., 2008; 朱金初等, 2009; 2011; 袁顺达等, 2012; 王志强等, 2014; Huang et al., 2015; Zhao et al., 2016; 2018; 黄旭栋等, 2017; Deng et al., 2019; Li et al., 2019)。

位于湘南道县、江永、江华三县交界处的铜山岭岩体侵入于泥盆纪和石炭纪碳酸盐岩地层中,出露面积约12 km²(图1c)。该岩体主要由花岗闪长斑岩组成,造岩矿物为斜长石(约45%)、钾长石(约22%)、石英(约20%)、黑云母(约10%)和角闪石(约3%),斑晶主要为钾长石和石英,其次为斜长石,黑云母和角闪石主要出现于基质中。副矿物包括锆石、磷灰石、榍石、褐帘石、金红石、硫化物和钛铁氧化物(以磁铁矿为主)。锆石U-Pb定年表明铜山岭花岗闪长斑岩形成于164~160 Ma(Jiang et al., 2009; Zhao et al., 2016; 2017; 黄旭栋等, 2017)。铜山岭铜

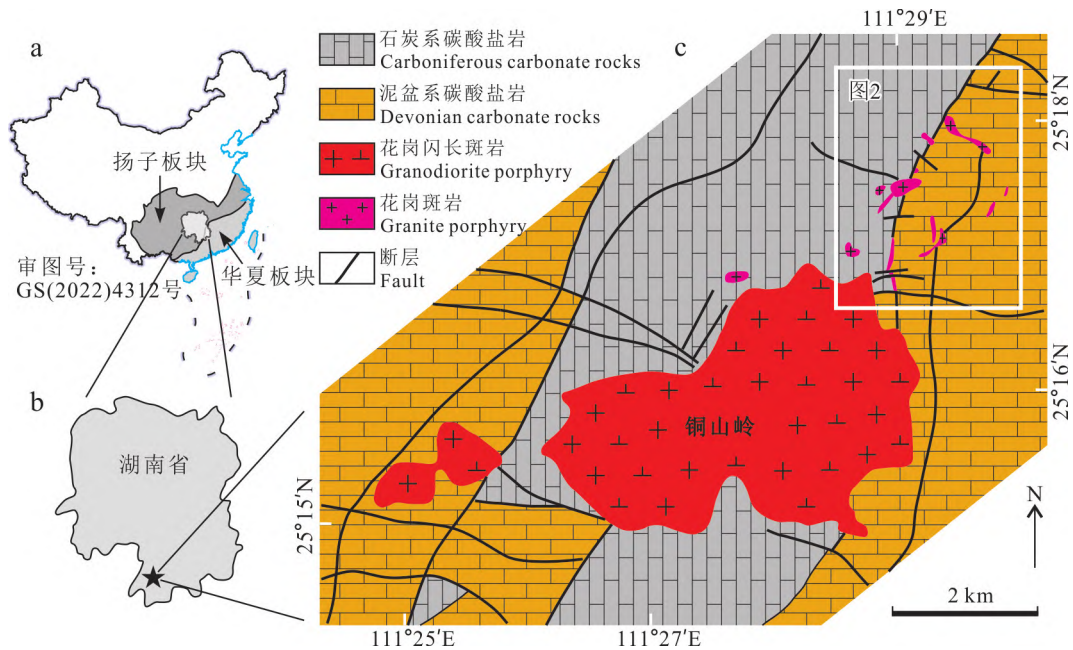


图1 湘南矿集区在钦杭成矿带的位置(a)、铜山岭岩体在湖南省的位置(b)及铜山岭地区地质简图(c)(据黄旭栋等, 2017修改)
Fig. 1 The location of the South Hunan ore-concentrated area in the Qinzhong-Hangzhou metallogenic belt (a) and the location of the Tongshanling pluton in Hunan Province (b) and simplified geological map of the Tongshanling area (c) (modified after Huang et al., 2017)

铅锌矿床产于铜山岭岩体北东缘隐伏接触带及其外围地层中(图1c, 图2, 图3a~c)。

2 矿区地质

铜山岭铜铅锌矿区出露的地层主要为泥盆系和石炭系碳酸盐岩(图1c), 包括中泥盆统棋梓桥组、上泥盆统余田桥组和锡矿山组、下石炭统大塘阶和上石炭统壶天群(图2), 其中棋梓桥组、余田桥组和锡矿山组为赋矿地层(图3a~c)。棋梓桥组由下段灰岩、碳质灰岩和泥质灰岩、中段白云岩夹白云质灰岩和上段灰岩夹泥质灰岩组成。余田桥组岩性为灰岩、白云质灰岩夹白云岩团块。锡矿山组由下段灰岩、白云质灰岩夹泥质灰岩、泥灰岩和上段粉砂岩、页岩、泥灰岩组成。这些地层发育南北向至北东向褶皱和北北东向、东西向断层(图2)。

矿区出露的岩浆岩主要为花岗闪长斑岩, 其次为花岗斑岩(图2)。花岗斑岩切穿花岗闪长斑岩和矽卡岩, 与矿化无关(黄旭栋等, 2017)。铜山岭铜铅锌矿区包括3个矿段, 从南西到北东依次为南风山、猫仔湾和背后山矿段(图2)。南风山和猫仔湾矿段地下坑道中可见花岗闪长斑岩与碳酸盐围岩的接触

带。花岗闪长斑岩普遍发生绿泥石化、绢云母化、硅化和碳酸盐化, 并发育浸染状硫化物矿化, 硫化物主要为磁黄铁矿, 其次为黄铜矿(图4a), 品位低, 不具有经济价值。

3 成矿分带与成矿特征

铜山岭铜铅锌矿床表现出独特的成矿分带, 从隐伏岩体接触带向外依次为近端内矽卡岩、近端外矽卡岩、硫化物-石英脉和远端矽卡岩矿体(图3a~c)。近端内矽卡岩和近端外矽卡岩矿体分布于南风山和猫仔湾矿段; 硫化物-石英脉矿体主要产于猫仔湾矿段, 少量出现于背后山矿段; 远端矽卡岩矿体主要发育在背后山矿段, 少量分布于猫仔湾矿段(图3a~c)。各类型矿体具有截然不同的几何形态、蚀变分带和矿物组合, 其特征分述如下:

近端内矽卡岩总体上呈面状分布于花岗闪长斑岩边缘(图3c), 单个矿体形态不规则, 通常呈囊状、团块状(图4b)。近端内矽卡岩具有块状构造, 分带不明显, 主要由石榴子石和辉石组成(图5a), 普遍以石榴子石为主, 局部以辉石为主。退变质矽卡岩矿物较少, 包括阳起石(图5b)、绿帘石和绿泥石。黄铜

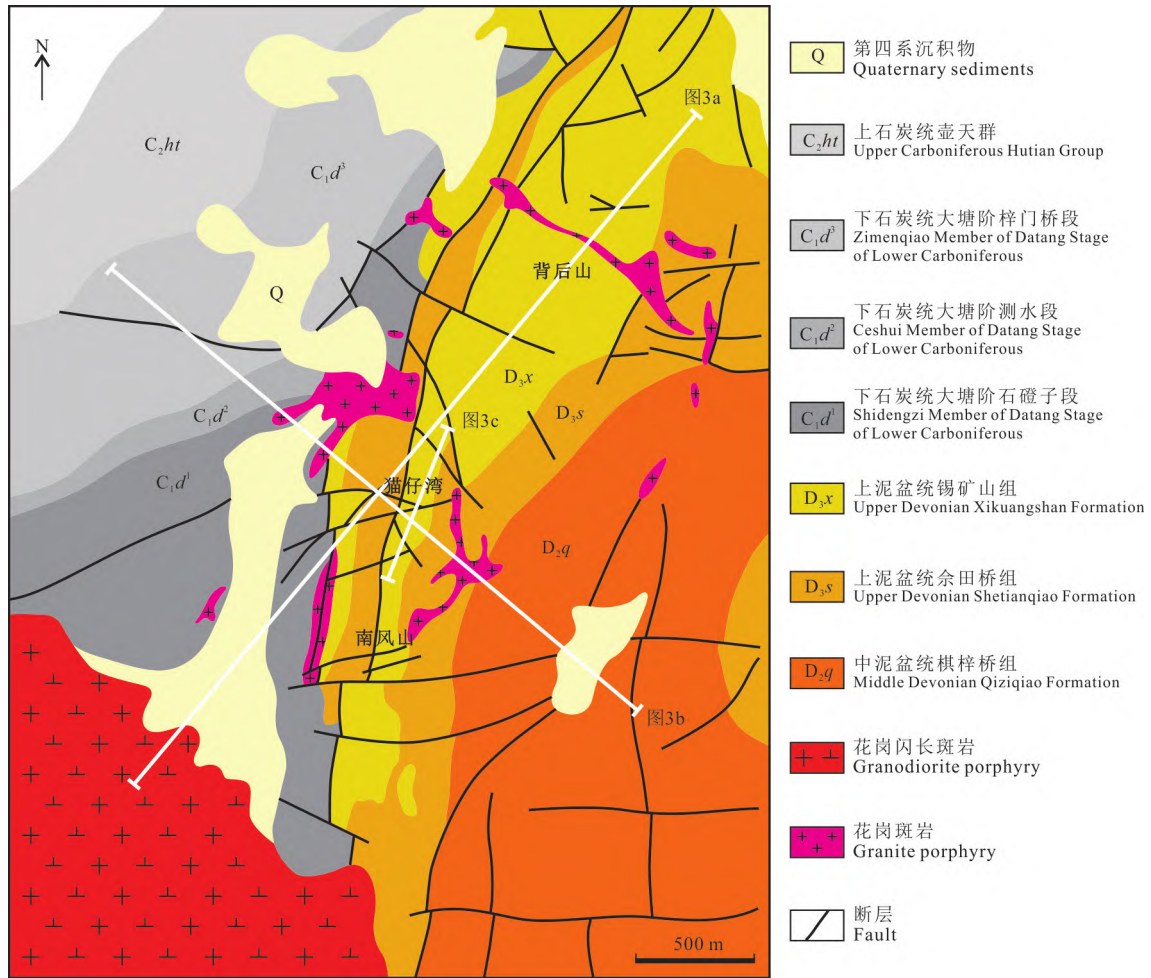


图 2 铜山岭铜铅锌矿床平面地质图(据湖南冶金二〇六勘探队, 1975 修改)

C_{2ht} : 白云岩; C_{1d^3} : 灰岩和白云质灰岩; C_{1d^2} : 页岩和粉砂岩; C_{1d^1} : 灰岩和泥质灰岩; D_{3x} : 泥质灰岩、灰岩和白云质灰岩; D_{3s} : 灰岩和白云质灰岩; D_{2q} : 灰岩、白云质灰岩和白云岩

Fig. 2 Planar geological map of the Tongshanling Cu-Pb-Zn deposit (modified after Team 206 of Hunan Metallurgical and Geological Exploration Company, 1975)

C_{2ht} : dolostone; C_{1d^3} : limestone and dolomitic limestone; C_{1d^2} : shale and siltstone; C_{1d^1} : limestone and argillaceous limestone; D_{3x} : argillaceous limestone, limestone, and dolomitic limestone; D_{3s} : limestone and dolomitic limestone; D_{2q} : limestone, dolomitic limestone, and dolostone

矿和磁黄铁矿为主要矿石矿物(图 5c), 大多与石英密切共生, 可构成硫化物-石英条带(图 4c), 有时呈不含石英的硫化物团块产出(图 4b)。闪锌矿、黄铁矿、白钨矿和辉钼矿零星出现。可见近端内矽卡岩被石英脉切穿(图 4d)。

近端外矽卡岩大多呈脉状产于棋梓桥组上段地层中(图 3c), 脉体宽度通常为几十厘米。外矽卡岩脉表现出明显分带, 脉壁为硅灰石, 内部为辉石(图 5d)和石榴子石, 脉芯常见晚阶段石英(图 4e)。退变质矽卡岩矿物较少, 包括阳起石(图 5e)、符山石、绿帘石、榍石和绿泥石。黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、磁黄

铁矿和黄铁矿为主要矿石矿物(图 5f、g), 一般呈浸染状产出, 有时形成团块状富矿石(图 4f)。白钨矿、辉钼矿和自然铋零星出现, 自然铋总是与方铅矿共生(图 5g)。近端外矽卡岩具有比近端内矽卡岩明显更高的辉石/石榴子石、黄铁矿/磁黄铁矿和(闪锌矿+方铅矿)/黄铜矿比值。可见近端外矽卡岩被石英脉切穿(图 4g)。

硫化物-石英脉主要分布于棋梓桥组上段中, 少量产于余田桥组中(图 3a~c), 脉体宽度通常为十几至几十厘米。靠近岩体的硫化物-石英脉周边的地层中偶尔可见矽卡岩化。硫化物-石英脉一般不具

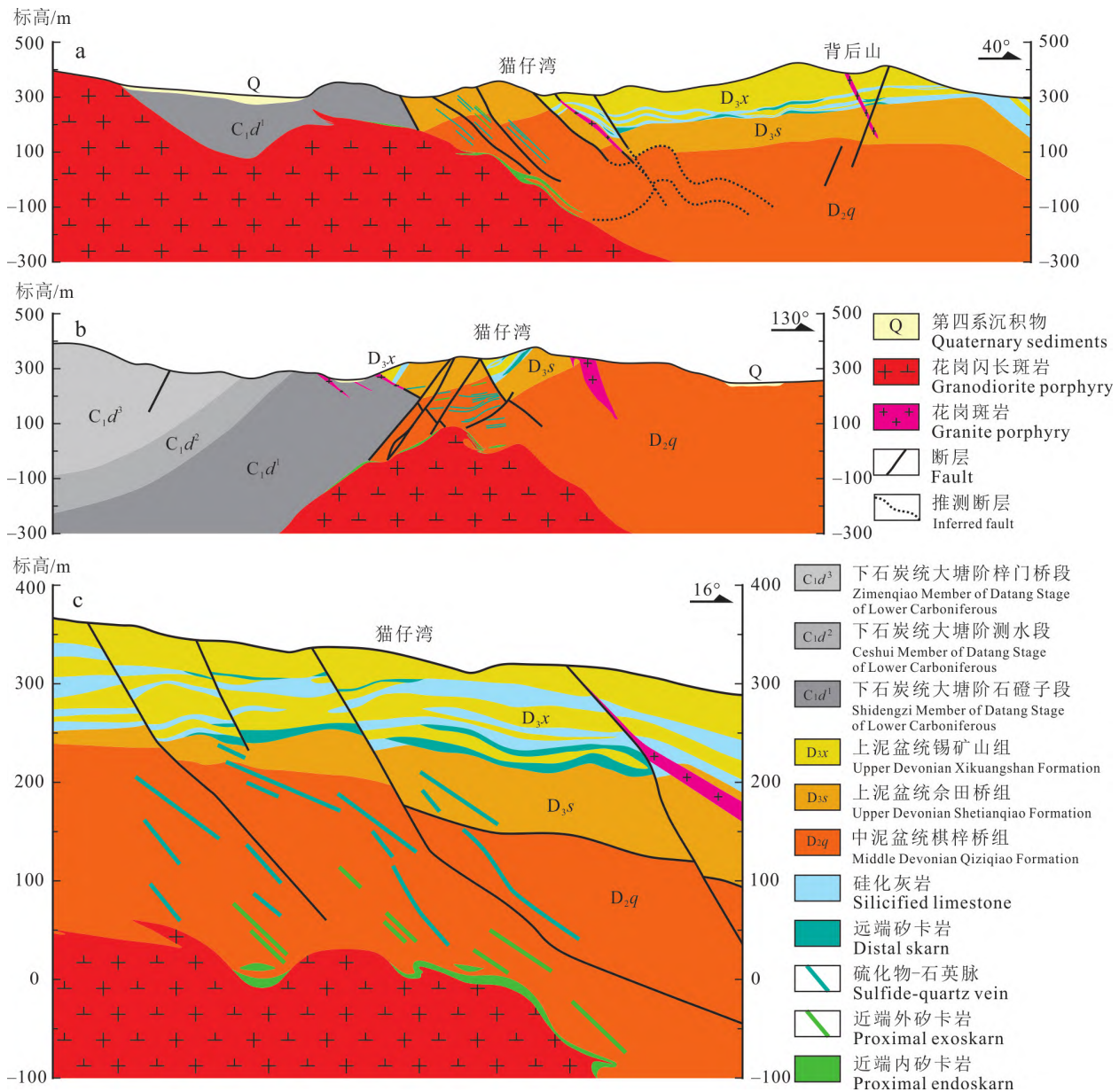


图3 铜山岭铜铅锌矿床北东向(a)、南东向(b)和北北东向(c)地质剖面图(剖面位置和地层岩性见图2,据湖南冶金二〇六勘探队,1975修改)

Fig. 3 NE-trending(a), SE-trending(b), and NNE-trending (c) geological cross sections through the Tongshanling Cu-Pb-Zn deposit (section lines and strata lithologies refer to Fig. 2, modified after Team 206 of Hunan Metallurgical and Geological Exploration Company, 1975)

有分带,有时硫化物沿脉壁更为富集(图4h)。矿石矿物主要为黄铜矿、闪锌矿、方铅矿和黄铁矿(图5h、i),其次为毒砂(图5h)、白钨矿、辉钼矿、辉铋矿(图5j)和自然铋,脉石矿物主要为石英。总体上,靠近岩体的硫化物-石英脉以铜矿化为主(图4i),具有较低的(闪锌矿+方铅矿)/黄铜矿比值,含有毒砂(图5h);而远离岩体的硫化物-石英脉以铜铅锌矿化为

特征(图4j),具有较高的(闪锌矿+方铅矿)/黄铜矿比值,不含毒砂(图5i)。此外,在花岗闪长斑岩中发现一条宽约二十厘米的铅锌硫化物-石英脉(图4k),矿物组合为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、毒砂和石英(图5k),可见晚阶段方解石切穿硫化物和石英(图4k)。

远端矽卡岩呈层状、似层状产于锡矿山组下段中(图3a、c),主要受泥质灰岩层位控制,其中可见残



图 4 铜山岭铜铅锌矿床各成矿类型野外照片

a. 蚀变花岗闪长斑岩中的浸染状硫化物矿化,硫化物主要为磁黄铁矿,其次为黄铜矿;b. 近端内矽卡岩中的团块状硫化物矿化,矽卡岩矿物主要为石榴子石,其次为辉石,矿石矿物主要为黄铜矿和磁黄铁矿;c. 近端内矽卡岩中的硫化物-石英条带;d. 石英脉切穿近端内矽卡岩;e. 近端

外矽卡岩脉的分带,脉壁为硅灰石,内部主要为辉石,其次为石榴子石,脉芯为晚阶段石英;f. 近端外矽卡岩矿体中的团块状铜铅锌矿石;g. 石英脉切穿近端外矽卡岩;h. 脉壁富集硫化物的硫化物-石英脉;i. 靠近岩体的铜硫化物-石英脉;j. 远离岩体的铜铅锌硫化物-石英脉;k. 蚀变花岗闪长斑岩中的铅锌硫化物-石英脉,晚阶段方解石切穿硫化物和石英;l. 远端矽卡岩中残留的泥质灰岩;m. 远端矽卡岩矿体中的团块状铜铅锌矿石;n. 硫化物-石英脉切穿远端矽卡岩;o. 离接触带不远的碳酸盐交代型铅锌硫化物脉

Cal—方解石;Ccp—黄铜矿;Po—磁黄铁矿;Qz—石英

Fig. 4 Field photographs showing different styles of mineralization at the Tongshanling Cu-Pb-Zn deposit

a. Disseminated sulfide mineralization in altered granodiorite porphyry, the sulfides are principally pyrrhotite and subordinately chalcopyrite; b. Massive sulfide mineralization in proximal endoskarn, the skarn minerals are principally garnet and subordinately pyroxene, the ore minerals are dominantly chalcopyrite and pyrrhotite; c. Sulfide-quartz bands in proximal endoskarn; d. Quartz vein cuts proximal endoskarn; e. Zonation of proximal exoskarn vein, the exterior is wollastonite, the interior is principally pyroxene and subordinately garnet, the core is later-formed quartz; f. Massive Cu-Pb-Zn ore in proximal exoskarn orebody; g. Quartz vein cuts proximal exoskarn; h. Sulfide-quartz vein with sulfide-rich walls; i. Cu sulfide-quartz vein close to the contact zone; j. Cu-Pb-Zn sulfide-quartz vein far from the contact zone; k. Pb-Zn sulfide-quartz vein in altered granodiorite porphyry, later-formed calcite cuts the sulfides and quartz; l. Residual argillaceous limestone in distal skarn; m. Massive Cu-Pb-Zn ore in distal skarn orebody; n. Sulfide-quartz vein cuts distal skarn; o. Carbonate replacement Pb-Zn sulfide vein not far from the contact zone

Cal—Calcite; Ccp—Chalcopyrite; Po—Pyrrhotite; Qz—Quartz

留的泥质灰岩团块(图4l)。单个矿体厚度可达数米,顶、底板通常为硅化灰岩。远端矽卡岩具有块状构造,分带不明显,矽卡岩矿物粒度明显小于近端矽卡岩(图5l)。矿石矿物主要为黄铜矿、闪锌矿、方铅矿(图5m)和黄铁矿,其次为磁黄铁矿、毒砂(图5n)、白钨矿、辉钼矿和自然铋;脉石矿物主要为石榴子石、辉石(图5l)、硅灰石、石英和方解石,其次为阳起石、符山石、榍石和绿泥石。硫化物一般呈浸染状产出,有时形成团块状富矿石(图4m)。相对于近端外矽卡岩,远端矽卡岩具有较低的辉石/石榴子石比值、较高的黄铁矿/磁黄铁矿比值和类似的(闪锌矿+方铅矿)/黄铜矿比值。可见远端矽卡岩被硫化物-石英脉切穿(图4n)。

此外,在离接触带不远的棋梓桥组上段中存在少量团块状或脉状碳酸盐交代型铅锌矿体(图4o),矿石矿物主要为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿和毒砂,脉石矿物主要为方解石(图5o)。

4 成矿阶段划分

基于对穿切关系、交代结构和矿物组合等地质特征的详细研究,在铜山岭铜铅锌矿床中识别出4个矿化蚀变阶段,从早到晚依次为进变质矽卡岩、退变质矽卡岩、石英-硫化物和碳酸盐阶段。矿物共生序列如图6所示,4个矿化阶段描述如下:

进变质矽卡岩阶段在花岗闪长斑岩和碳酸盐围岩中形成无水矽卡岩矿物(图6)。花岗闪长斑岩中主要形成石榴子石和辉石,石榴子石多于辉石(图4b、c,图5a);接触带附近的棋梓桥组上段中首先形

成硅灰石,然后形成辉石和石榴子石,辉石明显多于石榴子石(图4e、g),可见辉石交代硅灰石(图5d);外围的锡矿山组下段中形成石榴子石、辉石(图5l)和硅灰石,石榴子石多于辉石。

退变质矽卡岩阶段以各类矽卡岩中含水矽卡岩矿物的形成、花岗闪长斑岩中的绿泥石化和绢云母化以及花岗闪长斑岩和近端内矽卡岩中的磁黄铁矿与黄铜矿矿化为特征(图6)。近端内矽卡岩、近端外矽卡岩和远端矽卡岩中形成少量阳起石(图5b、e)、绿帘石、符山石、榍石和绿泥石,可见阳起石交代石榴子石(图5b)。花岗闪长斑岩中的绿泥石化主要表现为绿泥石交代黑云母,绢云母化主要表现为绢云母交代斜长石。蚀变花岗闪长斑岩中产生浸染状磁黄铁矿和次要的黄铜矿矿化(图4a)。近端内矽卡岩中产生团块状磁黄铁矿与黄铜矿矿化(图4b),硫化物交代阳起石(图5b),黄铜矿交代磁黄铁矿(图5c),白钨矿、辉钼矿、黄铁矿和闪锌矿零星产出。

石英-硫化物阶段是铜山岭铜铅锌矿床的主成矿阶段,形成各类矽卡岩中的石英和铁铜铅锌硫化物和不同类型的硫化物-石英脉,可以进一步划分为6个亚阶段(图6)。亚阶段1在近端内矽卡岩中形成磁黄铁矿-黄铜矿-石英矿体(图4c)。亚阶段2和3分别在近端外矽卡岩和远端矽卡岩中产生黄铜矿、闪锌矿和方铅矿矿化(图4f、m,图5f、g、m),方铅矿交代黄铜矿和闪锌矿(图5g、m),绿泥石、白钨矿、辉钼矿和自然铋零星产出,自然铋与方铅矿共生(图5g)。近端外矽卡岩不含毒砂,而远端矽卡岩含有毒砂(图5n)。亚阶段4~6形成硫化物-石英脉,可见(硫

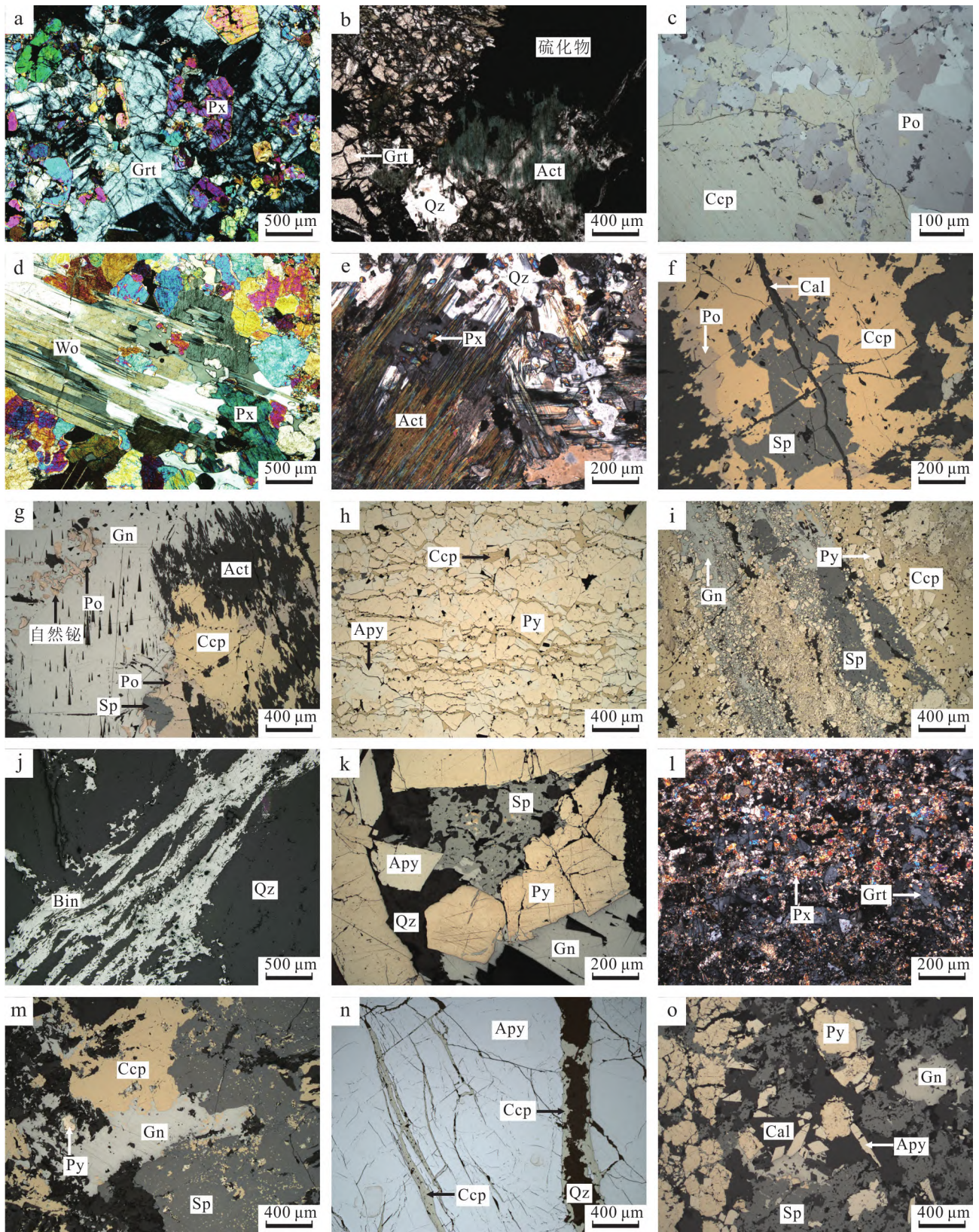


图 5 铜山岭铜铅锌矿床各成矿类型岩相学和矿相学显微照片

a. 近端内矽卡岩主要由石榴子石和辉石组成(正交透射光,CTL);b. 近端内矽卡岩中阳起石交代石榴子石而又被硫化物交代(单偏透射光,PTL);c. 近端内矽卡岩矿体的矿石矿物主要为黄铜矿和磁黄铁矿,磁黄铁矿表现出明显各向异性,黄铜矿交代磁黄铁矿(斜交反射光,CRL);

d. 近端外矽卡岩中的硅灰石和辉石,辉石交代硅灰石(CTL);e. 近端外矽卡岩中的阳起石(CTL);f. 近端外矽卡岩矿石中的黄铜矿、闪锌矿和磁黄铁矿,黄铜矿与闪锌矿共生而交代磁黄铁矿,晚阶段方解石切穿硫化物(单偏反射光,PRL);g. 近端外矽卡岩矿石中的黄铜矿、磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿和自然铋,黄铜矿和磁黄铁矿交代阳起石,方铅矿交代黄铜矿、磁黄铁矿和闪锌矿,自然铋与方铅矿共生(PRL);h. 靠近岩体的铜硫化物-石英脉中的黄铜矿、黄铁矿和毒砂,黄铜矿切穿黄铁矿和毒砂(PRL);i. 远离岩体的铜铅锌硫化物-石英脉中的黄铜矿、闪锌矿、方铅矿和黄铁矿,黄铜矿和闪锌矿交代黄铁矿,方铅矿交代黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿(PRL);j. 铜铅锌硫化物-石英脉中的辉铋矿(PRL);k. 花岗闪长斑岩中的铅锌硫化物-石英脉主要由闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、毒砂和石英组成(PRL);l. 远端矽卡岩中的石榴子石和辉石,矿物粒度明显小于近端矽卡岩(CTL);m. 远端矽卡岩矿石中的黄铜矿、闪锌矿和方铅矿,闪锌矿交代黄铜矿,方铅矿交代黄铜矿和闪锌矿(PRL);n. 远端矽卡岩矿石中毒砂被黄铜矿±石英细脉切穿(PRL);o. 碳酸盐交代型铅锌矿体的矿石矿物主要为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿和毒砂,脉石矿物主要为方解石(PRL)

Act—阳起石;Apy—毒砂;Bin—辉铋矿;Cal—方解石;Ccp—黄铜矿;Gn—方铅矿;Grt—石榴子石;Po—磁黄铁矿;Px—辉石;Py—黄铁矿;
Qz—石英;Sp—闪锌矿;Wo—硅灰石

Fig. 5 Petrographic and mineragraphic photomicrographs showing different styles of mineralization at the Tongshanling Cu-Pb-Zn deposit

a. Proximal endoskarn mainly consists of garnet and pyroxene (crossed-polarized transmitted light, CTL); b. Actinolite replaces garnet and then replaced by sulfides in proximal endoskarn (plane-polarized transmitted light, PTL); c. The ore minerals of proximal endoskarn orebody are dominantly chalcopyrite and pyrrhotite, the pyrrhotite displays obvious anisotropy, the chalcopyrite replaces the pyrrhotite (crossed-polarized reflected light, CRL); d. Wollastonite and pyroxene in proximal exoskarn, the pyroxene replaces the wollastonite (CTL); e. Actinolite in proximal exoskarn (CTL); f. Chalcopyrite, sphalerite, and pyrrhotite in proximal exoskarn ore, the chalcopyrite coexists with the sphalerite and replaces the pyrrhotite, later-formed calcite cuts the sulfides (plane-polarized reflected light, PRL); g. Chalcopyrite, pyrrhotite, sphalerite, galena, and native bismuth in proximal exoskarn ore, the chalcopyrite and pyrrhotite replace actinolite, the galena replaces the chalcopyrite, pyrrhotite, and sphalerite, the native bismuth coexists with the galena (PRL); h. Chalcopyrite, pyrite, and arsenopyrite in Cu sulfide-quartz vein close to the contact zone, the chalcopyrite cuts the pyrite and arsenopyrite (PRL); i. Chalcopyrite, sphalerite, galena, and pyrite in Cu-Pb-Zn sulfide-quartz vein far from the contact zone, the chalcopyrite and sphalerite replace the pyrite, the galena replaces the pyrite, chalcopyrite, and sphalerite (PRL); j. Bismuthinite in Cu-Pb-Zn sulfide-quartz vein (PRL); k. The Pb-Zn sulfide-quartz vein in granodiorite porphyry mainly consists of sphalerite, galena, pyrite, arsenopyrite, and quartz (PRL); l. Garnet and pyroxene in distal skarn, the mineral granularity is distinctly finer than that of proximal skarn (CTL); m. Chalcopyrite, sphalerite, and galena in distal skarn ore, the sphalerite replaces the chalcopyrite, the galena replaces the chalcopyrite and sphalerite (PRL); n. Arsenopyrite cut by chalcopyrite ± quartz veinlets in distal skarn ore (PRL); o. The ore minerals of carbonate replacement Pb-Zn orebody are dominantly sphalerite, galena, pyrite, and arsenopyrite, the gangue minerals are dominantly calcite (PRL)

Act—Actinolite; Apy—Arsenopyrite; Bin—Bismuthinite; Cal—Calcite; Ccp—Chalcopyrite; Gn—Galena; Grt—Garnet; Po—Pyrrhotite;
Px—Pyroxene; Py—Pyrite; Qz—Quartz; Sp—Sphalerite; Wo—Wollastonite

化物)-石英脉切穿近端内矽卡岩(图4d)、近端外矽卡岩(图4g)和远端矽卡岩(图4n)。亚阶段4在靠近岩体的地层中形成铜硫化物-石英脉(图4i),闪锌矿和方铅矿较少;亚阶段5在远离岩体的地层中形成铜铅锌硫化物-石英脉(图4j),黄铜矿、闪锌矿和方铅矿都较多;亚阶段6在蚀变花岗闪长斑岩中形成铅锌硫化物-石英脉(图4k),不含黄铜矿。铜硫化物-石英脉含有毒砂(图5h)、白钨矿、辉钼矿和自然铋;铜铅锌硫化物-石英脉不含毒砂和自然铋,含有白钨矿、辉钼矿和辉铋矿(图5i、j);铅锌硫化物-石英脉含有毒砂(图5k),不含白钨矿、辉钼矿、辉铋矿和自然铋。

碳酸盐阶段形成碳酸盐交代型铅锌矿体和成矿后方解石(图6)。离接触带不远的地层中形成团块状或脉状碳酸盐交代型铅锌矿体(图4o),矿物组合为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、毒砂和方解石(图

5o)。可见成矿后方解石切穿硫化物和石英(图4k,图5f)。

5 样品和分析方法

本次矿物成分温压计研究共使用含绿泥石样品8件和含闪锌矿样品1件,含绿泥石样品包括花岗闪长斑岩(TSL58)、近端内矽卡岩(T1513、T1516)、近端外矽卡岩(TSL97、TSL133)和远端矽卡岩(TSL86、TSL111、TSL144),含闪锌矿样品(TSL122)为近端内矽卡岩型团块状硫化物矿石,所有样品均来自铜山岭铜铅锌矿区地下坑道。首先将样品制成光薄片,通过显微镜观察绿泥石和闪锌矿的岩相学特征,识别其形成阶段,然后利用电子探针分析绿泥石和闪锌矿的成分。

绿泥石和闪锌矿成分分析在法国奥尔良地球科

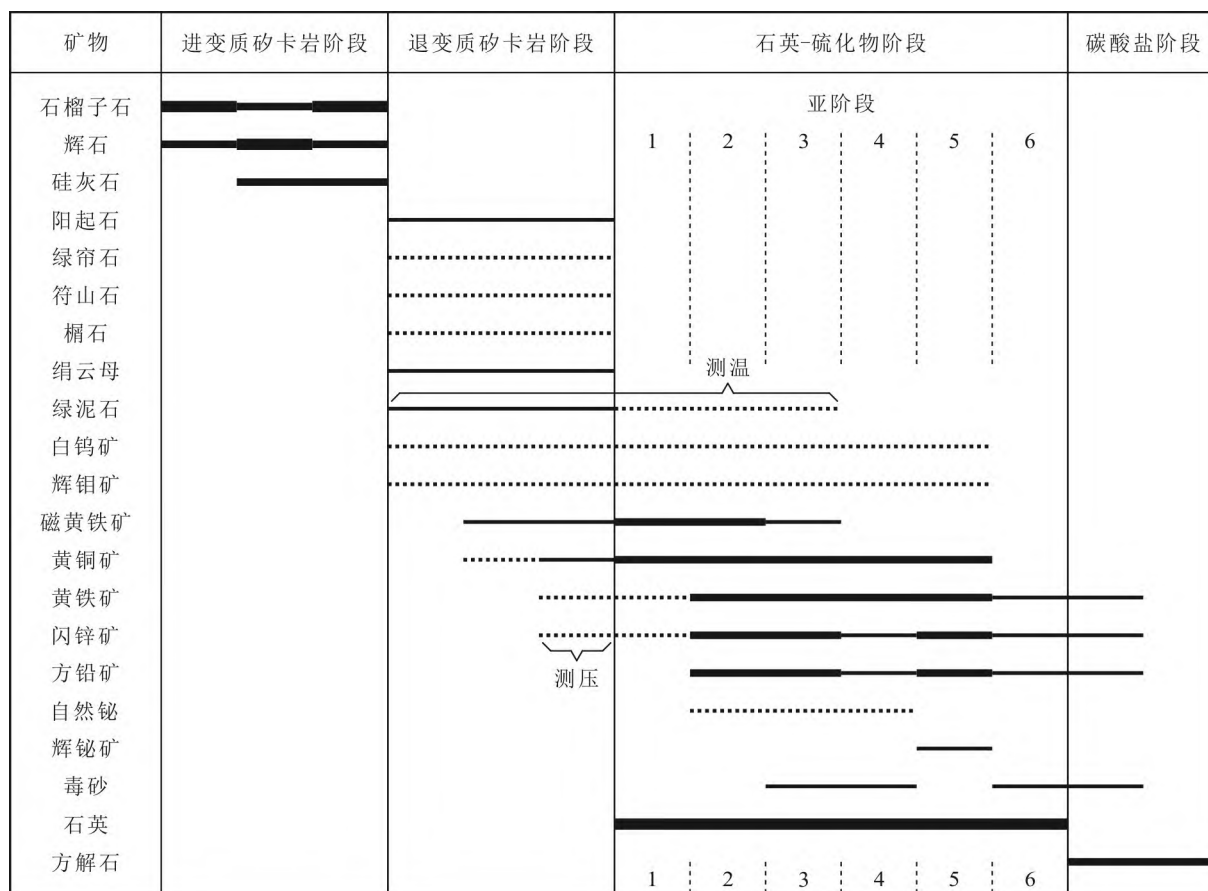


图 6 铜山岭铜铅锌矿床矿物共生序列

线的粗细代表相对多少,虚线代表零星出现

Fig. 6 Mineral paragenetic sequence of the Tongshanling Cu-Pb-Zn deposit

The thickness of line denotes relative abundance, the dotted line denotes sporadic occurrence

学研究所(Institut des Sciences de la Terre d'Orléans)完成。所用仪器为CAMECA SXFive型电子探针,工作条件包括加速电压15 kV、射束电流10 nA和束斑直径1 μm。绿泥石的分析元素为Si、Ti、Al、Fe、Mn、Mg、Ca、Na、K、F和Cl,闪锌矿的分析元素包括S、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Ag、Cd、Pb和Bi,每个元素的峰位和背景测量时间分别为10 s和5 s。绿泥石的标样包括天然矿物钠长石(SiKα、NaKα)、钙铁榴石(CaKα)、正长石(KKα)、黄玉(FKα)、钒铅矿(ClKα)和人工合成物质MnTiO₃(TiKα、MnKα)、Al₂O₃(AlKα)、Fe₂O₃(FeKα)、MgO(MgKα)。闪锌矿的标样为天然矿物闪锌矿(SKα、ZnKα)、磁黄铁矿(FeKα)、黄铜矿(CuKα)、方铅矿(PbMα)和金属锰(MnKα)、钴(CoKα)、镍(NiKα)、银(AgLa)、镉(CdLa)、铋(BiMα)。分析数据由ZAF程序进行统一校正。

6 绿泥石成分温度计

在花岗闪长斑岩中,绿泥石主要以交代黑云母的形式存在,并保留黑云母假象(图7a)。考虑到硫化物-石英脉切穿蚀变(绿泥石化和绢云母化)的花岗闪长斑岩(图4k),这些绿泥石应该形成于退变质矽卡岩阶段。近端内矽卡岩、近端外矽卡岩和远端矽卡岩中存在两类绿泥石,一类绿泥石交代石榴子石,多呈浸染状产于石榴子石中,不与石英共生(图7b、d、f、g);另一类绿泥石与石英共生,常呈填隙状产出(图7c、h)。在近端外矽卡岩中可见绿泥石沿环带交代石榴子石(图7e),内部环带的绿泥石包含较多残留的石榴子石,不与石英共生,属于第一类绿泥石;而外部环带的绿泥石中残留的石榴子石较少,并与石英共生,属于第二类绿泥石。根据绿泥石的产

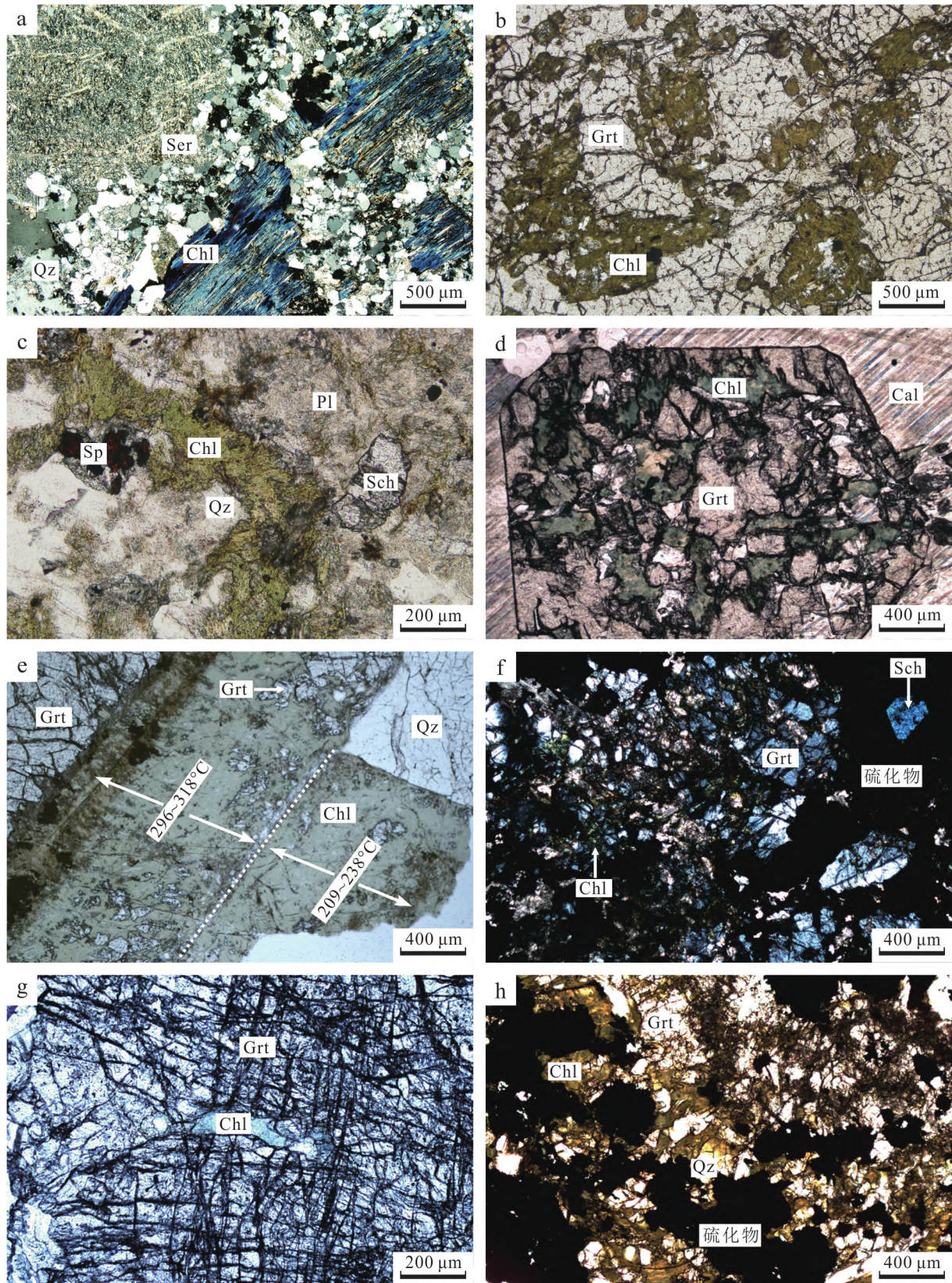


图7 铜山岭铜铅锌矿床不同类型绿泥石岩相学显微照片

a. 花岗闪长斑岩中绿泥石交代黑云母并保留其假象,绿泥石呈现出独特的靛蓝色干涉色(TSL58,CTL);b. 近端内砂卡岩中绿泥石呈浸染状交代石榴子石(T1516,PTL);c. 近端内砂卡岩中与石英共生的填隙状绿泥石(T1513,PTL);d. 近端外砂卡岩中绿泥石呈浸染状交代石榴子石

(TSL97, PTL); e. 近端外矽卡岩中绿泥石沿环交代石榴子石, 内部环带的绿泥石包含较多残留的石榴子石, 形成温度(据 Cathelineau, 1988 计算)较高; 外部环带的绿泥石中残留的石榴子石较少, 形成温度较低(TSL133, PTL); f. 远端矽卡岩中绿泥石呈浸染状交代石榴子石(TSL144, CTL); g. 远端矽卡岩中绿泥石交代石榴子石(TSL86, PTL); h. 远端矽卡岩中与石英共生的填隙状绿泥石(TSL111, PTL)
Cal—方解石; Chl—绿泥石; Grt—石榴子石; Pl—斜长石; Qz—石英; Sch—白钨矿; Ser—绢云母; Sp—闪锌矿

Fig. 7 Petrographic photomicrographs showing different types of chlorite in the Tongshanling Cu-Pb-Zn deposit

a. Chlorite replaces biotite and maintains its pseudomorph in granodiorite porphyry, the chlorite exhibits distinctive indigo-blue interference color (TSL58, CTL); b. Disseminated chlorite replaces garnet in proximal endoskarn (T1516, PTL); c. Interstitial chlorite coexists with quartz in proximal endoskarn (T1513, PTL); d. Disseminated chlorite replaces garnet in proximal exoskarn (TSL97, PTL); e. Chlorite replaces garnet along its zonal bands in proximal exoskarn, the chlorite in inner zone contains more residual garnet and was formed at higher temperature (calculated after Cathelineau, 1988); while the chlorite in outer zone contains less residual garnet and was formed at lower temperature (TSL133, PTL); f. Disseminated chlorite replaces garnet in distal skarn (TSL144, CTL); g. Chlorite replaces garnet in distal skarn (TSL86, PTL); h. Interstitial chlorite coexists with quartz in distal skarn (TSL111, PTL)

Cal—Calcite; Chl—Chlorite; Grt—Garnet; Pl—Plagioclase; Qz—Quartz; Sch—Scheelite; Ser—Sericitite; Sp—Sphalerite

状及其与石英的共生关系认为两类绿泥石分别形成于退变质矽卡岩阶段和石英-硫化物阶段。

绿泥石电子探针分析数据和晶体化学式计算结果见表 1。根据 Hey (1954) 的绿泥石 Si-Fe 分类方案(图 8a), 近端内矽卡岩中的退变质矽卡岩阶段绿泥石($Chl_N II$)属于铁绿泥石, 花岗闪长斑岩、近端外矽卡岩和远端矽卡岩中的退变质矽卡岩阶段绿泥石(分别简称为 $Chl_G II$ 、 $Chl_X II$ 和 $Chl_D II$)主要落于蠕绿泥石、铁镁绿泥石和密绿泥石的交界区域, 部分 $Chl_X II$ 落入蠕绿泥石区域中, 部分 $Chl_D II$ 落入密绿泥石区域中; 近端内矽卡岩中的石英-硫化物阶段绿泥石($Chl_N III$)属于铁镁绿泥石, 近端外矽卡岩和远端矽卡岩中的石英-硫化物阶段绿泥石(分别简称为 $Chl_X III$ 和 $Chl_D III$)落于铁镁绿泥石区域的右侧边界及其附近。在 Wiewióra 等(1990)的绿泥石 R^{2+} -Si 分类图(图 8b)中, $Chl_G II$ 、 $Chl_N II$ 、 $Chl_X II$ 、 $Chl_D II$ 和 $Chl_N III$ 落于蠕绿泥石和鲕绿泥石端员之间, 而 $Chl_X III$ 和 $Chl_D III$ 具有相对较多的八面体空位, 靠近鲕绿泥石端员, 所有绿泥石均属于三八面体绿泥石。在 Zane 等(1998)的绿泥石八面体位置(Al+□)-Mg-Fe 分类图(图 8c)中, 所有绿泥石均落于类型 I 三八面体绿泥石区域中, 其中 $Chl_G II$ 、 $Chl_N II$ 、 $Chl_X II$ 、 $Chl_N III$ 、 $Chl_X III$ 和 $Chl_D III$ 为 Fe 绿泥石, 而 $Chl_D II$ 主要为 Mg 绿泥石, 部分为 Fe 绿泥石。

利用 Kranidiotis 等(1987)、Cathelineau(1988)和 Jowett(1991)的绿泥石成分温度计对不同类型绿泥石的形成温度进行了计算, 结果列于表 1。3 个温度计的计算结果(分别以 T_1 、 T_2 和 T_3 表示)基本一致, 差值大多在 11~24°C 之间, 最大不超过 50°C(表 1)。以 T_2 为例, $Chl_G II$ 的形成温度为 317~340°C; $Chl_N II$ 形成温度较高, 为 345~388°C; 而 $Chl_D II$ 形成温度较

低, 为 296~338°C; 部分 $Chl_X II$ 形成温度较高(341~376°C), 与 $Chl_N II$ 类似; 而部分 $Chl_X II$ 形成温度较低(296~318°C), 与 $Chl_D II$ 类似(表 1, 图 8d)。石英-硫化物阶段的绿泥石比退变质矽卡岩阶段的绿泥石形成温度更低, $Chl_N III$ 、 $Chl_X III$ 和 $Chl_D III$ 的形成温度分别为 270~318°C、209~238°C 和 200~223°C(表 1, 图 8d)。绿泥石的 Mn 含量与形成温度之间存在负相关性(图 8d)。

7 闪锌矿成分压力计

闪锌矿成分压力计的应用通常需要满足以下几个条件: ① 闪锌矿与磁黄铁矿、黄铁矿同时形成, 达到平衡; ② 磁黄铁矿为六方磁黄铁矿; ③ 闪锌矿形成温度在 300~650°C 范围内, 1 bar 时可延至 254°C, 5×10^8 Pa 时可延至 290°C; ④ 闪锌矿不具有黄铜矿病毒结构(黄铜矿呈细小斑点状或乳滴状散布于闪锌矿中); ⑤ 闪锌矿中 FeS 摩尔含量比较稳定(王大伟等, 1988)。铜山岭铜铅锌矿床中各种类型的矿石都含闪锌矿, 然而, 硫化物-石英脉和碳酸盐交代型矿石不含磁黄铁矿, 近端外矽卡岩和远端矽卡岩矿石中闪锌矿交代磁黄铁矿和黄铁矿, 都不能用于闪锌矿成分压力计研究。近端内矽卡岩型团块状硫化物矿石中闪锌矿和黄铁矿呈稀疏浸染状产出, 可见闪锌矿与磁黄铁矿相互接触, 有清晰的共生边界, 无明显先后关系(图 9a)。虽然未见闪锌矿与黄铁矿的共生关系, 但是可见黄铜矿交代磁黄铁矿和黄铁矿(图 9b), 因此推测黄铁矿可能与磁黄铁矿、闪锌矿同时形成。如上所述, 该类矿石形成于退变质矽卡岩阶段, $Chl_N II$ 的形成温度(T_2)为 345~388°C(表 1, 图 8d), 大致可以代表闪锌矿的形成温度, 符合应用闪

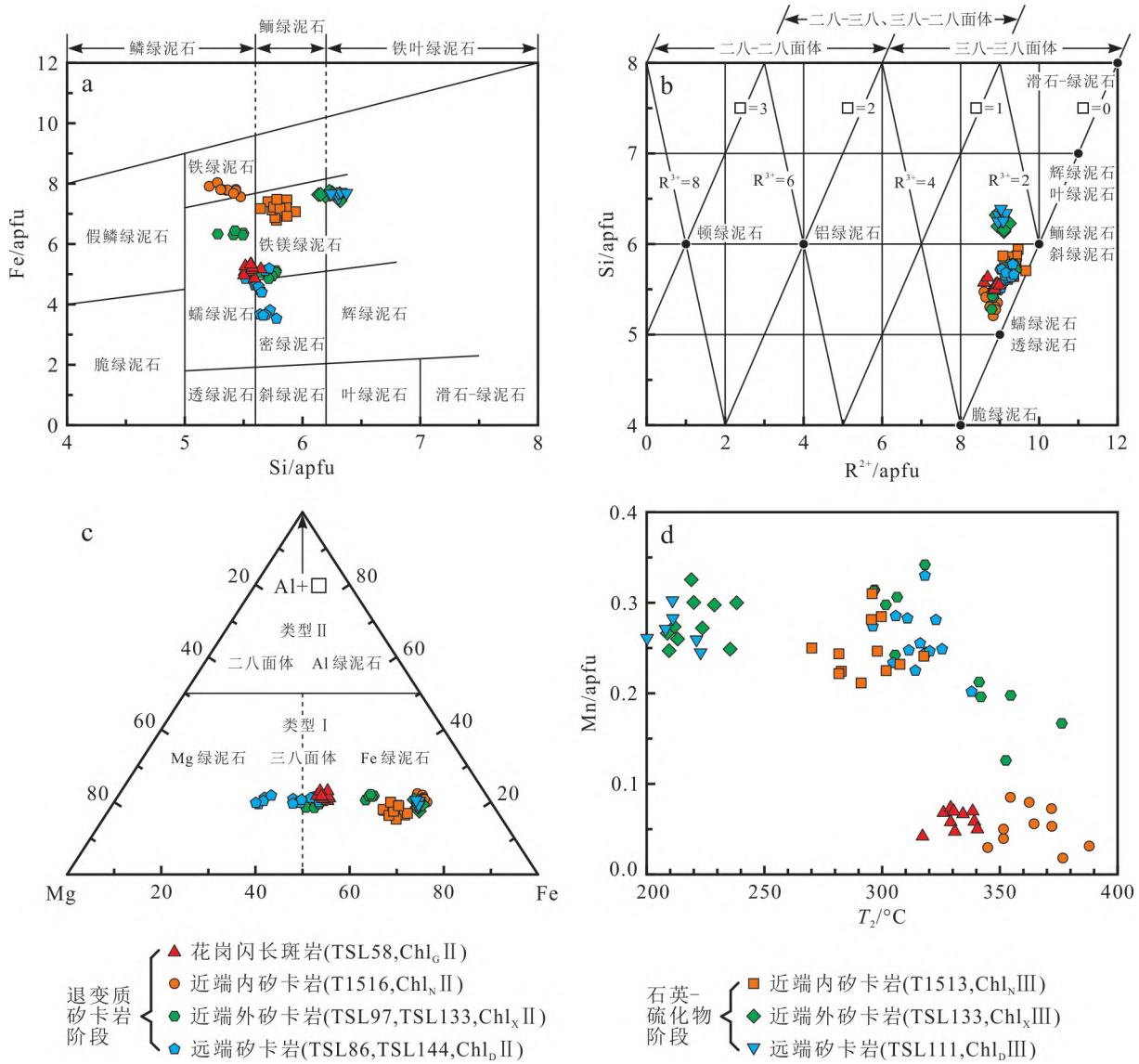


图8 铜山岭铜铅锌矿床不同类型绿泥石的成分和温度计算结果

a. 绿泥石 Si-Fe 分类图(底图据 Hey, 1954; apfu: 单位化学式原子数); b. 绿泥石 R^{2+} -Si 分类图(底图据 Wiewióra et al., 1990); c. 绿泥石八面体位置(Al+□)-Mg-Fe 分类图(底图据 Zane et al., 1998); d. Mn 含量- T_2 (据 Cathelineau, 1988 计算)图解; 绿泥石类型缩写中下标 G、N、X 和 D 分别代表花岗闪长斑岩、近端内砂卡岩、近端外砂卡岩和远端砂卡岩, 罗马数字 II 和 III 分别代表退变质砂卡岩阶段和石英-硫化物阶段

Fig. 8 Compositions and calculated temperatures for different types of chlorite in the Tongshanling Cu-Pb-Zn deposit

a. Classification diagram for chlorite based on Si and Fe contents (according to Hey, 1954; apfu: atoms per formula unit); b. Classification diagram for chlorite based on R^{2+} and Si contents (according to Wiewióra et al., 1990); c. Classification diagram for chlorite based on octahedral Al+□, Mg, and Fe contents (according to Zane et al., 1998); d. Plot of Mn contents versus T_2 (calculated after Cathelineau, 1988); In the abbreviations of chlorite types, the subscripts G, N, X, and D represent granodiorite porphyry, proximal endoskarn, proximal exoskarn, and distal skarn and the Roman numerals II and III denote retrograde skarn and quartz-sulfide stages, respectively

锌矿成分压力计的温度条件。在 254°C 以上, 磁黄铁矿主要以六方磁黄铁矿形式存在 (Kissin et al., 1982; 顾连兴等, 1995; 任康达等, 2021), 样品中的磁黄铁矿即表现出高温六方磁黄铁矿的三晶嵌接结构 (图 9c, 顾连兴等, 1990; 郭维民等, 2010), 应为六方

磁黄铁矿。

闪锌矿电子探针分析结果列于表 2。近端内砂卡岩型团块状硫化物矿石中的闪锌矿具有黄铜矿病毒结构 (图 9a, d), 并且 Fe 含量变化明显 (8.94%~11.11%, 图 10a)。Hutchison 等 (1981) 认为含大量细

表 1 铜山岭铜铅锌矿床不同类型绿泥石电子探针分析结果 (w(B)/%)
Table 1 Electron microprobe analyses on different types of chlorite (w(B)/%) in the Tongshanling Cu-Pb-Zn deposit

组分	花冈闪长斑岩 TSL58 Ch ₆ II										近端内矽卡岩 T1513 Ch ₁₃ III									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	25.75	25.65	25.98	26.16	25.56	26.45	25.64	26.19	25.89	26.05	24.79	25.23	26.76	26.09	25.40	25.70	24.82	24.91	25.57	26.13
TiO ₂	0.12	0.14	0.14	0.16	0.13	0.09	0.13	0.19	0.19	1.73	0.06	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.04	0.00	0.08	0.00
Al ₂ O ₃	19.19	19.12	19.53	19.52	19.74	19.78	20.03	19.98	20.07	18.85	15.13	16.77	16.75	16.59	15.83	15.65	14.54	15.22	16.74	16.56
FeO	29.73	28.95	29.92	29.17	29.37	29.19	27.92	29.00	28.80	27.31	38.33	38.33	37.72	38.55	38.11	37.76	37.72	38.60	37.94	37.28
MnO	0.27	0.32	0.39	0.42	0.39	0.24	0.28	0.38	0.33	0.38	1.43	1.27	1.19	1.12	1.48	1.16	1.22	1.20	1.18	1.32
MgO	12.74	12.78	12.52	13.16	12.44	12.38	13.38	13.27	13.14	12.60	6.50	7.79	7.69	7.16	7.50	7.03	6.71	7.82	7.15	8.50
CaO	0.01	0.01	0.00	0.00	0.08	0.07	0.03	0.01	0.04	0.37	0.52	0.27	0.49	0.32	0.39	0.47	0.42	0.43	0.39	0.37
Na ₂ O	0.01	0.01	0.02	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.13	0.06	0.04	0.06	0.09	0.10	0.04	0.11	0.02	0.02
K ₂ O	0.05	0.03	0.03	0.00	0.03	0.04	0.02	0.03	0.00	0.09	0.03	0.00	0.00	0.03	0.00	0.15	0.00	0.02	0.05	0.00
F	0.06	0.07	0.15	0.06	0.14	0.25	0.19	0.09	0.11	0.12	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Cl	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00
总和	87.93	87.08	88.68	88.69	87.92	88.52	87.66	89.17	88.61	87.55	86.92	89.73	90.71	89.93	88.80	88.02	85.51	88.32	89.15	90.18
基于 28 个 O 计算的离子数																				
T_Si	5.558	5.572	5.563	5.571	5.513	5.645	5.501	5.539	5.509	5.590	5.781	5.642	5.867	5.808	5.755	5.860	5.866	5.705	5.741	5.765
T_IVAl	2.442	2.428	2.437	2.429	2.487	2.355	2.499	2.461	2.491	2.410	2.219	2.358	2.133	2.192	2.245	2.140	2.134	2.295	2.259	2.235
ΣT	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
M_IVAl	2.439	2.467	2.491	2.470	2.533	2.620	2.568	2.519	2.542	2.357	1.939	2.063	2.195	2.160	1.981	2.066	1.916	1.814	2.170	2.070
M_Ti	0.019	0.024	0.022	0.026	0.022	0.014	0.021	0.030	0.031	0.280	0.010	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.006	0.000	0.013	0.000
M_Mg	4.100	4.140	3.998	4.177	4.001	3.938	4.279	4.184	4.169	4.030	2.259	2.598	2.512	2.374	2.531	2.389	2.364	2.670	2.392	2.795
M_Fe	5.366	5.258	5.359	5.197	5.298	5.210	5.010	5.129	5.124	4.901	7.474	7.168	6.916	7.175	7.221	7.199	7.457	7.393	7.124	6.879
M_Mn	0.049	0.059	0.071	0.075	0.071	0.043	0.051	0.068	0.060	0.070	0.281	0.241	0.222	0.212	0.285	0.224	0.244	0.232	0.225	0.246
M_Ca	0.001	0.003	0.001	0.000	0.019	0.016	0.007	0.002	0.010	0.085	0.131	0.064	0.115	0.077	0.095	0.114	0.106	0.105	0.094	0.087
M_Na	0.004	0.003	0.007	0.016	0.014	0.012	0.012	0.011	0.016	0.022	0.060	0.027	0.017	0.025	0.039	0.046	0.020	0.049	0.010	0.008
M_K	0.013	0.009	0.009	0.000	0.009	0.011	0.004	0.008	0.000	0.026	0.008	0.000	0.000	0.008	0.000	0.045	0.000	0.005	0.015	0.000
ΣM	11.991	11.963	11.958	11.961	11.967	11.864	11.952	11.951	11.952	11.771	12.162	12.161	11.977	12.032	12.152	12.083	12.113	12.268	12.043	12.085
OH	15.958	15.951	15.896	15.963	15.899	15.833	15.872	15.938	5.925	15.921	16.000	15.995	15.962	16.000	16.000	16.000	16.000	15.996	15.984	16.000
F	0.042	0.049	0.104	0.037	0.098	0.167	0.126	0.062	0.075	0.079	0.000	0.000	0.032	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.000
Cl	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.009	0.000
Fe/(Fe+Mg)	0.57	0.56	0.57	0.55	0.57	0.57	0.54	0.55	0.55	0.55	0.77	0.73	0.73	0.75	0.74	0.75	0.76	0.73	0.75	0.71
T ₁ /°C	319	317	319	317	324	310	323	320	323	314	310	322	299	306	311	301	301	316	313	308
T ₂ /°C	331	329	330	329	338	317	340	334	339	326	295	318	281	291	300	283	282	307	302	298
T ₃ /°C	338	336	338	336	345	324	346	341	346	333	309	330	294	304	312	296	295	320	315	310

续表 1-1
Continued Table 1-1

组分	近端内砂卡岩												近端外砂卡岩																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
	T1513 Ch _N III						T1516 Ch _N II						TSL97 Ch _N II						TSL133 Ch _N II																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
SiO ₂	26.02	26.44	23.81	23.50	23.72	24.33	22.91	23.76	23.46	23.00	23.61	24.21	25.20	24.83	25.24	24.86	26.57	27.07	26.75	0.06	0.02	0.11	0.03	0.00	0.09	0.00	0.01	0.00	0.12	0.04	0.08	0.01	0.04	0.01	0.04	0.00	0.06	0.00	16.36	14.96	18.79	18.79	19.26	19.22	19.80	18.79	19.32	19.40	19.24	19.09	20.79	19.52	19.99	19.26	19.85	18.51	17.68	17.19	36.58	37.64	40.91	40.87	41.16	40.17	41.61	40.66	41.38	42.70	40.43	40.03	34.70	34.87	34.54	34.57	35.30	27.46	28.69	28.04	1.65	1.31	0.21	0.29	0.42	0.16	0.16	0.26	0.38	0.10	0.27	0.44	0.90	1.15	1.07	1.06	0.68	1.33	1.73	1.72	8.43	8.24	4.89	5.49	4.99	5.16	4.91	4.94	5.12	4.90	4.82	4.73	8.92	8.87	9.13	9.61	8.75	13.36	13.49	13.91	0.40	0.37	0.04	0.06	0.06	0.13	0.07	0.08	0.17	0.03	0.04	0.12	0.13	0.01	0.00	0.02	0.16	0.16	0.17	0.12	0.03	0.00	0.03	0.02	0.05	0.14	0.04	0.07	0.00	0.01	0.02	0.00	0.04	0.00	0.00	0.02	0.09	0.02	0.01	0.04	0.02	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.05	0.01	0.03	0.01	0.08	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.05	0.00	0.09	0.07	0.00	0.00	0.05	0.14	0.27	0.19	0.08	0.00	0.11	0.04	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.17	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.04	0.01	0.00	89.62	89.00	88.80	89.13	89.80	89.67	89.74	88.66	89.86	90.84	88.00	88.13	89.71	89.67	89.57	89.79	89.75	87.55	88.91	88.03																																																																																																																																											
T_Si	5.779	5.938	5.432	5.351	5.364	5.473	5.206	5.432	5.305	5.275	5.304	5.414	5.496	5.413	5.491	5.426	5.718	5.774	5.773	2.221	2.062	2.568	2.649	2.636	2.527	2.794	2.568	2.695	2.725	2.696	2.586	2.504	2.587	2.509	2.282	2.226	2.227	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	2.060	1.900	2.484	2.394	2.498	2.568	2.508	2.493	2.454	2.415	2.534	2.571	2.618	2.516	2.551	2.430	2.532	2.415	2.221	2.144	0.010	0.004	0.018	0.005	0.000	0.016	0.000	0.002	0.000	0.020	0.006	0.014	0.001	0.007	0.002	0.000	0.007	0.000	0.009	0.000	2.792	2.760	1.661	1.864	1.683	1.729	1.664	1.684	1.725	1.642	1.657	1.618	2.898	2.886	2.967	3.115	2.847	4.286	4.291	4.475	6.792	7.071	7.805	7.781	7.786	7.558	7.908	7.773	7.825	8.028	7.799	7.675	6.327	6.362	6.299	6.289	6.443	4.943	5.118	5.060	0.310	0.250	0.040	0.056	0.080	0.030	0.031	0.050	0.073	0.018	0.053	0.085	0.167	0.212	0.198	0.196	0.126	0.242	0.313	0.314	0.096	0.090	0.011	0.015	0.013	0.032	0.018	0.019	0.040	0.008	0.009	0.030	0.031	0.003	0.000	0.005	0.037	0.037	0.038	0.028	0.015	0.000	0.011	0.010	0.020	0.061	0.016	0.030	0.002	0.005	0.009	0.000	0.016	0.000	0.000	0.007	0.038	0.006	0.005	0.016	0.006	0.006	0.000	0.006	0.000	0.000	0.013	0.002	0.008	0.004	0.024	0.000	0.002	0.002	0.000	0.000	0.007	0.015	0.000	0.023	12.081	12.081	12.030	12.131	12.080	11.994	12.158	12.053	12.127	12.140	12.091	11.993	12.060	11.988	12.017	12.042	12.037	11.944	11.995	12.060	15.947	16.000	15.997	15.960	15.903	15.808	15.863	15.943	16.000	15.919	15.966	15.979	16.000	15.999	16.000	15.996	16.000	15.954	15.998	15.886	0.052	0.000	0.000	0.035	0.097	0.192	0.137	0.057	0.000	0.081	0.028	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.031	0.000	0.114	0.001	0.000	0.003	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000	0.000	0.001	0.000	0.004	0.000	0.015	0.002	0.000	0.71	0.72	0.82	0.81	0.82	0.81	0.83	0.82	0.82	0.83	0.82	0.83	0.69	0.69	0.68	0.67	0.69	0.54	0.54	0.53	306	290	351	359	358	346	375	351	364	368	365	353	357	334	343	334	342	300	294	293	296	270	351	364	362	345	388	352	372	377	372	354	376	341	355	342	353	305	296	297	308	283	366	379	377	360	403	366	387	392	387	369	387	352	365	352	363	312	303	303

基于28个O计算的离子数

续表 1-2
Continued Table 1-2

组分	远端矽卡岩																			
	TSL133 Ch _X II								TSL133 Ch _X III											
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	1	2	3	4			
SiO ₂	26.89	26.00	26.08	26.84	27.37	27.27	26.52	26.89	27.57	26.94	27.43	26.85	26.89	27.40	27.95	27.10	27.35	25.76	27.27	27.72
TiO ₂	0.00	0.00	0.06	0.06	0.05	0.00	0.04	0.01	0.00	0.01	0.05	0.04	0.02	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	18.28	17.13	17.96	14.41	13.92	14.00	14.29	13.49	13.66	13.63	13.97	14.32	13.77	19.25	18.52	19.22	19.32	19.70	18.94	13.44
FeO	27.66	26.39	27.90	39.28	39.24	40.19	39.45	39.98	40.00	39.10	38.59	39.86	39.38	21.82	20.46	21.14	21.10	27.14	20.96	39.75
MnO	1.65	1.65	1.87	1.52	1.40	1.55	1.53	1.39	1.27	1.31	1.37	1.28	1.65	1.32	1.57	1.87	1.61	1.12	1.28	1.33
MgO	13.65	14.29	13.72	5.13	5.23	5.08	5.49	5.59	5.39	5.19	5.46	5.64	5.05	17.26	19.03	18.09	17.94	13.90	18.87	5.32
CaO	0.11	0.28	0.12	0.24	0.37	0.35	0.16	0.28	0.34	0.33	0.31	0.23	0.28	0.05	0.03	0.16	0.04	0.06	0.04	0.27
Na ₂ O	0.02	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.02	0.02	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
K ₂ O	0.03	0.03	0.00	0.01	0.00	0.02	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03
F	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.16	0.03	0.14	0.00	0.08	0.17	0.14
Cl	0.02	0.02	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.03	0.00	0.01	0.01	0.01	0.03	0.00	0.00
总和	88.31	85.85	87.72	87.61	87.59	88.46	87.65	87.63	88.26	86.55	87.21	88.25	87.12	87.30	87.61	87.73	87.39	87.80	87.55	88.00
基于 28 个 O 计算的离子数																				
T _{-Si}	5.742	5.712	5.639	6.195	6.301	6.250	6.136	6.227	6.315	6.292	6.319	6.154	6.256	5.724	5.777	5.639	5.686	5.516	5.664	6.372
T _{-IVAl}	2.258	2.288	2.361	1.805	1.699	1.750	1.864	1.773	1.685	1.708	1.681	1.846	1.744	2.276	2.223	2.361	2.314	2.484	2.336	1.628
ΣT	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
M _{-VIAl}	2.343	2.149	2.216	2.116	2.076	2.031	2.033	1.910	2.003	2.043	2.111	2.021	2.031	2.462	2.287	2.351	2.420	2.485	2.300	2.014
M _{-Ti}	0.000	0.000	0.009	0.010	0.009	0.000	0.008	0.002	0.001	0.002	0.009	0.007	0.003	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
M _{-Mg}	4.344	4.682	4.422	1.766	1.796	1.735	1.892	1.931	1.839	1.807	1.875	1.926	1.750	5.374	5.862	5.611	5.561	4.435	5.841	1.823
M _{-Fe}	4.939	4.851	5.045	7.584	7.555	7.703	7.633	7.744	7.663	7.637	7.433	7.640	7.662	3.811	3.536	3.677	3.669	4.860	3.640	7.641
M _{-Mn}	0.298	0.306	0.342	0.298	0.274	0.300	0.300	0.272	0.247	0.260	0.266	0.249	0.326	0.234	0.274	0.330	0.283	0.202	0.226	0.260
M _{-Ca}	0.025	0.065	0.027	0.059	0.092	0.086	0.039	0.070	0.083	0.082	0.076	0.057	0.070	0.011	0.007	0.035	0.009	0.014	0.008	0.066
M _{-Na}	0.010	0.025	0.003	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.004	0.000	0.012	0.010	0.011	0.000	0.002	0.000	0.008	0.000	0.001	0.000
M _{-K}	0.008	0.009	0.000	0.004	0.000	0.007	0.005	0.000	0.007	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000	0.001	0.004	0.006	0.007
ΣM	11.967	12.087	12.064	11.837	11.804	11.863	11.910	11.929	11.847	11.831	11.782	11.910	11.863	11.899	11.968	12.004	11.951	12.000	12.022	11.811
OH	15.995	15.994	16.000	15.922	15.995	15.999	15.892	16.000	16.000	15.980	16.000	15.996	15.990	15.896	15.977	15.900	15.998	15.938	15.886	15.897
F	0.000	0.000	0.000	0.072	0.000	0.000	0.103	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000	0.104	0.021	0.095	0.000	0.051	0.114	0.103
Cl	0.005	0.006	0.000	0.006	0.005	0.001	0.005	0.000	0.000	0.010	0.000	0.004	0.010	0.000	0.002	0.005	0.002	0.011	0.000	0.000
Fe/(Fe+Mg)	0.53	0.51	0.53	0.81	0.81	0.82	0.80	0.80	0.81	0.81	0.80	0.80	0.81	0.41	0.38	0.40	0.40	0.52	0.38	0.81
T ₁ /°C	297	298	308	270	258	264	275	265	256	259	255	273	263	290	282	298	293	320	294	250
T ₂ /°C	302	306	318	229	212	220	238	224	209	213	209	235	219	305	296	318	311	338	314	200
T ₃ /°C	308	312	324	245	228	236	254	239	225	229	224	251	235	307	297	320	312	344	315	216

续表 1-3

Continued Table 1-3

组分	远端砂卡岩											
	TSL111 ChI _D III					TSL144 ChI _D II						
	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	26.84	26.90	27.80	27.38	27.24	26.66	27.00	26.94	26.65	27.38	27.73	27.61
TiO ₂	0.03	0.07	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	13.75	14.14	13.50	13.59	13.87	19.50	19.01	19.23	18.48	19.48	19.77	18.82
FeO	39.18	39.28	40.33	39.68	38.67	26.42	25.71	26.68	28.69	26.76	25.86	30.05
MnO	1.31	1.24	1.40	1.44	1.54	1.40	1.39	1.60	1.37	1.42	1.48	1.63
MgO	5.49	5.18	5.65	5.46	5.36	14.98	15.97	15.30	13.47	15.60	16.07	13.37
CaO	0.27	0.29	0.27	0.23	0.29	0.00	0.01	0.06	0.11	0.16	0.11	0.24
Na ₂ O	0.01	0.03	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.05	0.01	0.05
K ₂ O	0.00	0.00	0.02	0.04	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.02	0.02	0.04
F	0.00	0.00	0.11	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
总和	86.89	87.15	89.09	87.88	86.99	88.97	89.10	89.85	88.80	90.87	91.05	91.82
基于28个O计算的离子数												
T_Si	6.242	6.231	6.324	6.304	6.305	5.594	5.637	5.610	5.682	5.627	5.652	5.716
T _{IV} Al	1.758	1.769	1.676	1.696	1.695	2.406	2.363	2.390	2.318	2.373	2.348	2.284
ΣT	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
M _{VI} Al	2.012	2.092	1.942	1.991	2.088	2.418	2.315	2.329	2.325	2.344	2.400	2.308
M_Ti	0.006	0.013	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
M_Mg	1.902	1.789	1.917	1.872	1.850	4.686	4.972	4.751	4.281	4.778	4.882	4.126
M_Fe	7.620	7.610	7.671	7.642	7.487	4.637	4.489	4.647	5.115	4.599	4.408	5.202
M_Mn	0.258	0.244	0.270	0.281	0.301	0.249	0.245	0.281	0.248	0.247	0.255	0.286
M_Ca	0.067	0.072	0.065	0.057	0.072	0.001	0.001	0.013	0.025	0.035	0.024	0.052
M_Na	0.005	0.012	0.000	0.005	0.000	0.006	0.004	0.000	0.002	0.018	0.006	0.019
M_K	0.001	0.000	0.006	0.010	0.000	0.000	0.000	0.007	0.003	0.004	0.004	0.010
ΣM	11.871	11.832	11.871	11.858	11.800	11.997	12.026	12.030	11.999	12.025	11.979	12.003
OH	15.995	15.994	15.917	15.967	15.998	16.000	16.000	16.000	15.996	16.000	16.000	15.998
F	0.000	0.000	0.081	0.031	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cl	0.005	0.006	0.002	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.002
Fe/(Fe+Mg)	0.80	0.81	0.80	0.80	0.80	0.50	0.47	0.49	0.54	0.49	0.47	0.56
T ₁ /°C	264	266	255	257	257	310	304	308	304	306	302	301
T ₂ /°C	221	223	208	211	211	325	319	323	311	320	316	306
T ₃ /°C	237	239	224	227	227	330	323	328	318	325	320	313

注:绿泥石类型缩写中下标G、N、X和D分别代表花岗闪长斑岩、近端内砂卡岩、近端外砂卡岩和远端砂卡岩,罗马数字II和III分别代表退变质砂卡岩阶段和石英-硫化物阶段;绿泥石的一般化学式为 $M_{12}T_8O_{20}(OH, F, Cl)_{16}[(R_x^{2+}R_y^{3+}\square_{12-x-y})_x^{VI}(Si_zR_{8-z}^{3+})_y^{IV}O_{20}(OH, F, Cl)_{16}]_6$;OH基于 $OH+F+Cl=16$ 计算; $T_1/°C=106\{^{IV}Al+0.7[Fe/(Fe+Mg)]\}+18$ (Kranidiotis et al., 1987); $T_2/°C=321.98(^{IV}Al/2) - 61.92$ (Cathelineau, 1988); $T_3/°C=318.5\{^{IV}Al/2+0.1[Fe/(Fe+Mg)]\}-68.7$ (Jowett, 1991)。

小斑点状或乳滴状黄铜矿的闪锌矿可能是原先闪锌矿和黄铜矿交生的产物或经历了黄铜矿出溶,其中Fe含量不均匀,不宜用于压力计研究。实验研究发现闪锌矿中通过出溶作用形成的黄铜矿非常有限 (Wiggins et al., 1980; Hutchison et al., 1981; Kojima

et al., 1985),与实际观察不符,所以通常认为黄铜矿病毒结构是含Cu±Fe流体交代闪锌矿的结果 (Barton, 1978; Barton et al., 1987; Kojima et al., 1987; Eldridge et al., 1988; Bortnikov et al., 1991)。样品中黄铜矿形成明显较晚(图9b),闪锌矿中的黄铜矿病毒

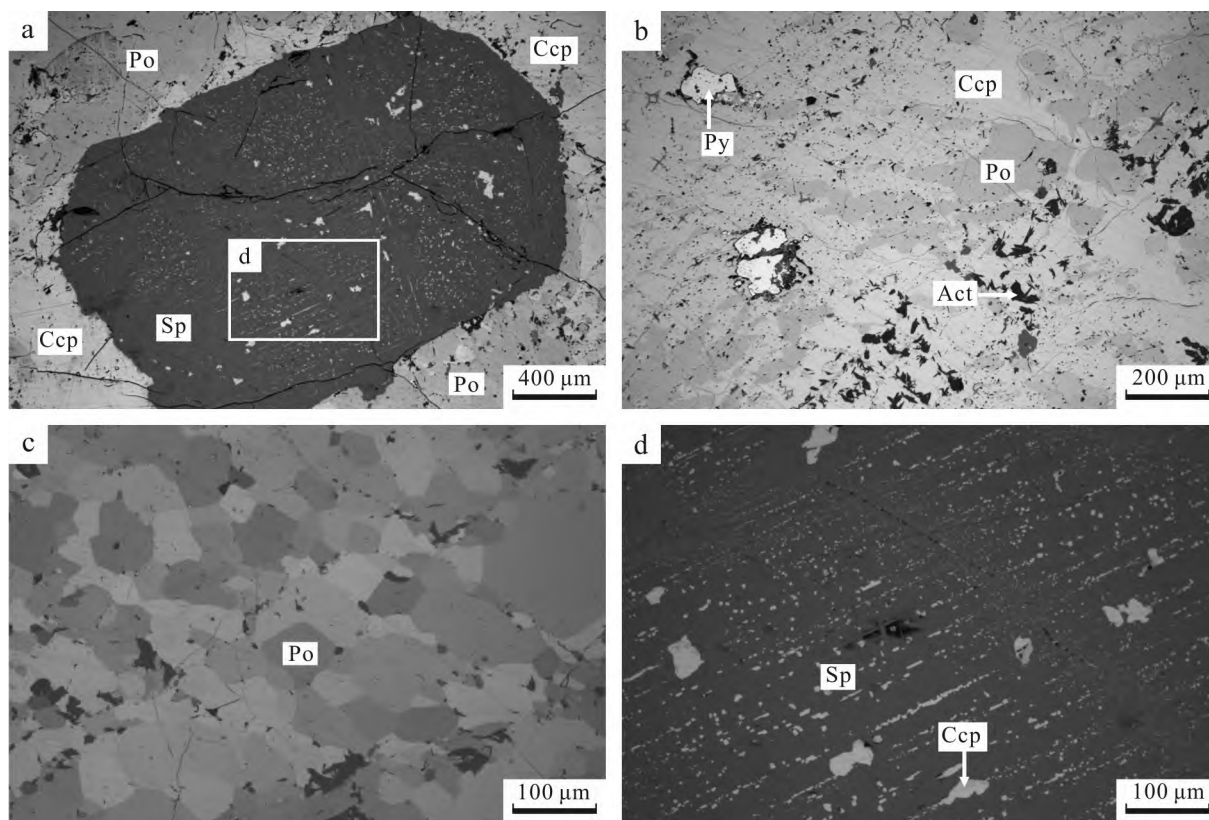


图9 铜山岭铜铅锌矿床近端内矽卡岩型团块状硫化物矿石矿相学显微照片

a. 闪锌矿与磁黄铁矿共生,边界清晰,无明显先后关系(PRL);b. 黄铜矿交代磁黄铁矿和黄铁矿(PRL);c. 高温六方磁黄铁矿的三晶嵌接结构(CRL);d. 闪锌矿中的黄铜矿病毒结构(PRL)

Act—阳起石;Ccp—黄铜矿;Po—磁黄铁矿;Py—黄铁矿;Sp—闪锌矿

Fig. 9 Mineragraphic photomicrographs of the massive sulfide ore in proximal endoskarn from the Tongshanling Cu-Pb-Zn deposit
a. Sphalerite coexists with pyrrhotite, they were formed concurrently and show clear contact boundary (PRL); b. Chalcopyrite replaces pyrrhotite and pyrite (PRL); c. Triple-junction texture of high-temperature hexagonal pyrrhotite (CRL); d. Chalcopyrite disease in sphalerite (PRL)

Act—Actinolite; Ccp—Chalcopyrite; Po—Pyrrhotite; Py—Pyrite; Sp—Sphalerite

结构很可能是黄铜矿交代闪锌矿的产物。值得注意的是,闪锌矿的Fe含量与Cu含量之间存在明显正相关性(图10a),指示含Cu、Fe流体交代闪锌矿时带入了部分Fe。因此,需要扣除黄铜矿交代闪锌矿时带入了的Fe才能获得与磁黄铁矿、黄铁矿平衡的闪锌矿的Fe含量($w(\text{Fe}_{\text{校正}})/\% = w(\text{Fe})/\% - 0.3964 \times w(\text{Cu})/\%$,图10a)。校正之后的闪锌矿 $w(\text{Fe})$ 变化较小(8.46%~9.86%,表2),相应的 $x(\text{FeS}_{\text{校正}})$ 为15.58%~17.95%(图10b)。利用Lusk等(1978)和Hutchison等(1981)的闪锌矿成分压力计进行了计算,结果列于表2。2个压力计的计算结果分别以 P_1 和 P_2 表示,两者一致,都变化于 $2.0\sim 4.0 \times 10^8 \text{Pa}$ 范围内,平均值均为 $3.1 \times 10^8 \text{Pa}$,峰值也均为 $3.1 \times 10^8 \text{Pa}$ (图10c、d)。本文获得的闪锌矿形成压力($(3.1 \pm 1.0) \times 10^8 \text{Pa}$)与我们之前通

过花岗闪长斑岩中普通角闪石的全铝压力计制约的岩浆侵位压力($(3.0 \pm 0.4) \times 10^8 \text{Pa}$, Huang et al., 2018)一致,表明闪锌矿成分压力计的计算结果是可靠的。

8 矿床成因探讨

Huang等(2014)和卢友月等(2015)利用辉钼矿Re-Os定年分别获得铜山岭铜铅锌矿床的成矿年龄为 $(161.8 \pm 1.7) \text{Ma}$ 和 $(161 \pm 1) \text{Ma}$,与铜山岭岩体的形成年龄($164\sim 160 \text{Ma}$, 锆石U-Pb定年, Jiang et al., 2009; Zhao et al., 2016; 2017; 黄旭栋等, 2017)一致,指示铜山岭铜铅锌矿床在成因上与铜山岭花岗闪长斑岩密切相关。蔡应雄等(2015)对铜山岭铜铅锌矿床开展了硫化物S、Pb同位素研究, $\delta^{34}\text{S}$ 值变

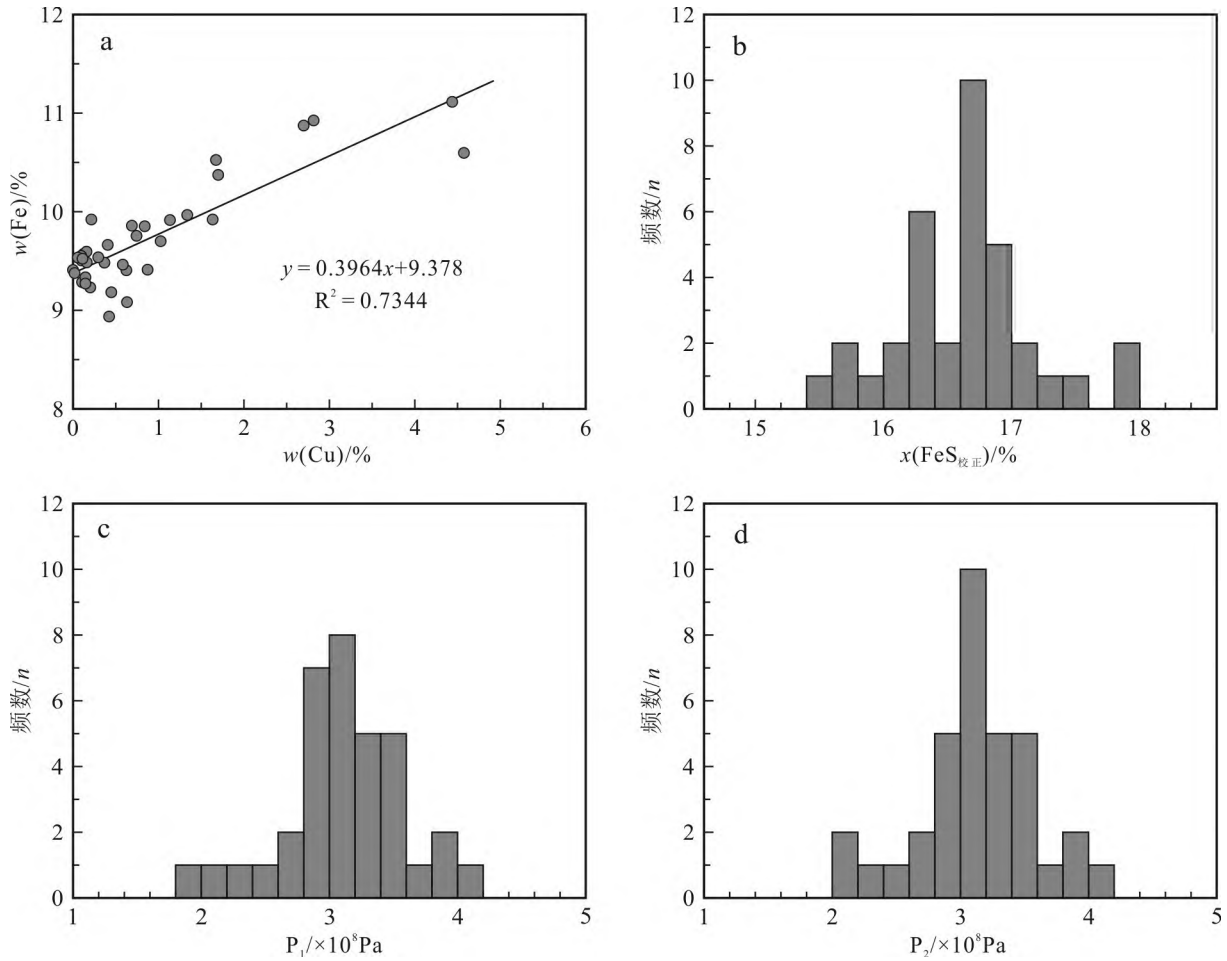


图10 铜山岭铜铅锌矿床近端内矽卡岩型团块状硫化物矿石中闪锌矿的成分和压力计算结果

a. Fe-Cu含量图解; b. $\text{FeS}_{\text{校正}}$ 摩尔含量频率分布直方图; c. P_1 (据Lusk et al., 1978计算)频率分布直方图; d. P_2 (据Hutchison et al., 1981计算)频率分布直方图

Fig. 10 Compositions and calculated pressures for the sphalerite in the massive sulfide ore of proximal endoskarn from the Tongshanling Cu-Pb-Zn deposit

a. Plot of Fe versus Cu contents; b. Frequency distribution histogram of $\text{FeS}_{\text{校正}}$ molar contents; c. Frequency distribution histogram of P_1 (calculated after Lusk et al., 1978); d. Frequency distribution histogram of P_2 (calculated after Hutchison et al., 1981)

化于-1.9‰~5.7‰,平均值为2.6‰,具有岩浆硫特征,矿石与花岗岩的Pb同位素组成一致,这些特征都表明成矿物质主要来自铜山岭花岗闪长斑岩。Liu等(2022)获得硫化物-石英脉中白钨矿的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为5.1‰~5.5‰,对应流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为5.0‰~5.4‰,具有岩浆水特征,指示成矿流体也主要来自铜山岭花岗闪长斑岩。

考虑到铜山岭铜铅锌矿床各类型矿体之间的深度差距不超过400 m(图3a~c),近端内矽卡岩型团块状硫化物矿石中闪锌矿的形成压力($(3.1\pm 1.0)\times 10^8$ Pa,图10c、d)大致可以代表整个矿床的形成压力。以3 km/ 10^8 Pa的静岩压力梯度计算(Van der

Pluijm et al., 2004),成矿深度为6~12 km,相当于中—上地壳水平,说明铜山岭铜铅锌矿床形成于较大深度。浅部形成的矽卡岩通常发育大量角闪石、绿帘石等退变质含水矽卡岩矿物;而深部形成的矽卡岩往往以石榴子石、辉石等高温无水矽卡岩矿物为主(Meinert et al., 2005)。铜山岭铜铅锌矿床中进变质矽卡岩矿物大量发育,而退变质矽卡岩矿物较少(图6),同样反映其成矿深度较大。地壳深部的围岩渗透性较低(Ingebritsen et al., 1999),岩浆热液流体需要借助构造裂隙等流体通道才能大量往外迁移(Cox, 2005)。所以,铜山岭铜铅锌矿床的外接触带矿体除了远端矽卡岩以外都呈脉状产出,包括近端

表 2 铜山岭铜铅锌矿床近端内矽卡岩型团块状硫化物矿石中闪锌矿的电子探针分析结果(w(B)/%)

组分	TSL122																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Zn	55.33	55.76	55.48	55.70	55.35	56.30	55.72	54.84	55.15	54.52	55.37	54.42	55.54	55.58	55.64	55.64	50.15	55.55	56.08	55.58
Fe	9.66	9.60	9.46	9.57	9.41	9.48	9.18	9.92	9.54	9.92	9.29	9.86	9.51	9.23	9.08	8.94	10.60	9.55	9.41	9.27
Cu	0.41	0.16	0.58	0.13	0.63	0.37	0.45	0.22	0.30	1.14	0.11	0.69	0.10	0.20	0.63	0.42	4.58	0.10	0.00	0.15
Cd	2.05	2.14	1.94	1.96	1.94	1.94	2.08	2.05	1.99	1.85	1.87	1.84	1.85	2.02	1.92	2.03	1.96	1.94	1.83	1.75
Mn	0.08	0.07	0.10	0.10	0.07	0.20	0.15	0.12	0.15	0.12	0.12	0.14	0.15	0.14	0.09	0.15	0.04	0.12	0.09	0.16
Co	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ni	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.00	0.02	0.01
Pb	0.07	0.04	0.00	0.05	0.08	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.09	0.04	0.00	0.06	0.00	0.00	0.06	0.02	0.21	0.10
Bi	0.00	0.04	0.14	0.02	0.14	0.00	0.16	0.14	0.00	0.26	0.06	0.00	0.23	0.00	0.00	0.16	0.26	0.05	0.14	0.00
Ag	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
S	33.47	33.03	33.45	33.61	32.90	33.53	33.35	33.28	33.32	33.46	33.17	33.37	33.85	33.23	33.26	33.16	33.46	33.15	33.52	33.44
总量	101.09	100.84	101.15	101.14	100.52	101.82	101.10	100.68	100.49	101.27	100.10	100.36	101.23	100.46	100.64	100.52	101.13	100.48	101.32	100.46
Fe _{校正}	9.50	9.53	9.23	9.52	9.16	9.34	9.01	9.84	9.42	9.47	9.24	9.58	9.47	9.15	8.83	8.77	8.78	9.51	9.41	9.21
基于 1 个 S 计算的原子数																				
Zn	0.811	0.828	0.813	0.813	0.825	0.823	0.819	0.808	0.812	0.799	0.818	0.800	0.805	0.820	0.820	0.823	0.735	0.822	0.820	0.815
Fe	0.166	0.167	0.162	0.164	0.164	0.162	0.158	0.171	0.164	0.170	0.161	0.170	0.161	0.159	0.157	0.155	0.182	0.165	0.161	0.159
Cu	0.006	0.002	0.009	0.002	0.010	0.006	0.007	0.003	0.004	0.017	0.002	0.010	0.001	0.003	0.010	0.006	0.069	0.001	0.000	0.002
Cd	0.017	0.018	0.016	0.017	0.017	0.016	0.018	0.018	0.017	0.016	0.016	0.016	0.016	0.017	0.016	0.017	0.017	0.017	0.016	0.015
Mn	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001	0.003	0.003	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.003	0.002	0.002	0.003	0.001	0.002	0.002	0.003
Co	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	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	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Pb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Bi	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000
Ag	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Σ	1.001	1.016	1.003	0.998	1.018	1.010	1.006	1.003	1.000	1.005	0.999	0.998	0.987	1.001	1.005	1.005	1.005	1.007	1.001	0.994
Fe _{校正}	0.163	0.166	0.158	0.163	0.160	0.160	0.155	0.170	0.162	0.162	0.160	0.165	0.161	0.158	0.152	0.152	0.151	0.165	0.161	0.158
α(Fe _{校正})/%	16.74	16.68	16.31	16.68	16.23	16.26	15.91	17.35	16.67	16.89	16.35	17.09	16.64	16.16	15.67	15.58	17.01	16.70	16.42	16.25
P ₁ /×10 ⁸ Pa	3.0	3.0	3.4	3.0	3.4	3.4	3.7	2.5	3.0	2.9	3.3	2.7	3.1	3.5	3.9	4.0	2.7	3.0	3.3	3.4
P ₂ /×10 ⁸ Pa	3.0	3.1	3.4	3.1	3.4	3.4	3.7	2.5	3.1	2.9	3.3	2.7	3.1	3.5	3.9	4.0	2.8	3.0	3.3	3.4

注: α(Fe_{校正})/%=u(Fe)/%-0.3964×u(Cu)/%; P₁/×10⁸Pa=26.18-1.903[α(Fe_{校正})/%+0.0309[α(Fe_{校正})/%]² (Lusk et al., 1978); P₂/×10⁸Pa=42.30-32.10×log[α(Fe_{校正})/%] (Hutchison et al., 1981)。

续表 2

Continued Table 2

组分	TSL122														
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
Zn	56.00	50.06	54.83	55.50	53.51	52.95	54.63	54.35	53.96	55.34	54.39	55.16	55.12	55.06	53.32
Fe	9.49	11.11	9.85	9.33	10.37	10.52	9.70	9.76	9.92	9.52	9.97	9.41	9.53	9.38	9.67
Cu	0.16	4.44	0.84	0.15	1.70	1.67	1.03	0.74	1.64	0.11	1.34	0.87	0.06	0.02	3.05
Cd	1.87	1.60	1.83	1.88	1.78	1.79	1.94	2.09	1.78	1.82	1.86	1.80	1.78	1.95	2.12
Mn	0.13	0.14	0.20	0.11	0.14	0.12	0.08	0.13	0.17	0.16	0.12	0.14	0.13	0.07	0.09
Co	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ni	0.01	0.00	0.00	0.04	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.03	0.00	0.10	0.02	0.01	0.00	0.16	0.09
Bi	0.02	0.16	0.00	0.00	0.00	0.18	0.00	0.23	0.19	0.12	0.00	0.00	0.00	0.04	0.14
Ag	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	33.07	33.40	34.16	33.22	33.16	33.56	33.58	33.07	33.19	33.45	33.12	33.83	33.50	33.41	33.24
总量	100.79	100.91	101.71	100.23	100.66	100.85	101.09	100.41	100.86	100.62	100.82	101.22	100.12	100.09	101.72
Fe _{校正}	9.42	9.35	9.52	9.28	9.70	9.86	9.29	9.46	9.27	9.48	9.44	9.07	9.51	9.37	8.46
基于1个S计算的原子数															
Zn	0.830	0.735	0.787	0.819	0.791	0.774	0.798	0.806	0.797	0.811	0.805	0.800	0.807	0.808	0.786
Fe	0.165	0.191	0.166	0.161	0.180	0.180	0.166	0.169	0.172	0.163	0.173	0.160	0.163	0.161	0.167
Cu	0.002	0.067	0.012	0.002	0.026	0.025	0.015	0.011	0.025	0.002	0.020	0.013	0.001	0.000	0.046
Cd	0.016	0.014	0.015	0.016	0.015	0.015	0.016	0.018	0.015	0.016	0.016	0.015	0.015	0.017	0.018
Mn	0.002	0.002	0.003	0.002	0.003	0.002	0.001	0.002	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002
Co	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ni	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Pb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Bi	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Ag	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Σ	1.015	1.010	0.983	1.001	1.015	0.998	0.996	1.007	1.013	0.996	1.016	0.990	0.988	0.988	1.020
Fe _{校正}	0.164	0.161	0.160	0.160	0.168	0.169	0.159	0.164	0.160	0.163	0.164	0.154	0.163	0.161	0.146
x(FeS _{校正})/%	16.45	17.95	16.89	16.36	17.51	17.90	16.61	16.93	16.75	16.70	16.88	16.14	16.81	16.61	15.67
P ₁ /×10 ⁸ Pa	3.2	2.0	2.9	3.3	2.3	2.0	3.1	2.8	3.0	3.0	2.9	3.5	2.9	3.1	3.9
P ₂ /×10 ⁸ Pa	3.3	2.0	2.9	3.3	2.4	2.1	3.1	2.9	3.0	3.0	2.9	3.5	3.0	3.1	3.9

外矽卡岩和硫化物-石英脉(图 3a~c)。层状远端矽卡岩很可能是成矿流体通过早先存在的区域断层向外迁移然后沿着锡矿山组下段地层中的层间断裂顺层交代泥质灰岩而形成(图 3a、c, 龙汉春, 1983)。

Huang (2018) 利用含碳物质拉曼光谱温度计 (Beyssac et al., 2002) 测定近端内矽卡岩、近端外矽卡岩和远端矽卡岩附近围岩的峰期变质温度分别为 618~624°C、595~619°C 和 461~515°C, 可以代表各类矽卡岩形成温度的上限。本文获得的退变质矽卡岩阶段绿泥石形成温度可以代表各类矽卡岩形成温度的下限, Chl_N II、Chl_X II 和 Chl_D II 的形成温度(T_2)分别为 345~388°C、296~376°C 和 296~338°C (表 1, 图 8d)。因此, 近端内矽卡岩、近端外矽卡岩和远端矽

卡岩的形成温度范围分别约为 390~620°C、380~610°C 和 340~500°C, 表现出依次降低的规律。石英-硫化物阶段绿泥石的形成温度可以代表各类矽卡岩矿体的成矿温度, Chl_N III、Chl_X III 和 Chl_D III 的形成温度(T_2)分别为 270~318°C、209~238°C 和 200~223°C (表 1, 图 8d), 也具有逐步降低的趋势。以上温度变化规律指示, 各类矽卡岩矿体的形成顺序依次为近端内矽卡岩、近端外矽卡岩和远端矽卡岩矿体。

根据成矿阶段(图 6), 结合以上讨论, 铜山岭铜铅锌矿床的形成过程可以总结如下: 花岗闪长质岩浆侵位导致碳酸盐围岩发生接触热变质。岩浆中出溶的含矿热液流体首先在岩体边缘与花岗闪长斑岩反应, 形成近端内矽卡岩, 沿构造裂隙往外迁移的岩

浆热液流体与灰岩反应形成脉状的近端外矽卡岩,部分流体通过区域断层迁移较远,然后沿着锡矿山组下段中的层间断裂顺层交代泥质灰岩而形成远端矽卡岩。随着温度降低和更多流体加入,各类矽卡岩发生退变质蚀变,形成少量阳起石、绿帘石、符山石、绿泥石等含水矽卡岩矿物,花岗闪长斑岩中的黑云母和斜长石与流体反应分别形成绿泥石和绢云母。随后硫化物开始沉淀,首先在蚀变花岗闪长斑岩中形成浸染状磁黄铁矿,然后在近端内矽卡岩中产生少量团块状磁黄铁矿与黄铜矿矿化。随着温度进一步降低,石英开始大量沉淀,近端内矽卡岩中形成磁黄铁矿-黄铜矿-石英矿体,接着近端外矽卡岩中产生铜铅锌矿化,随后远端矽卡岩中产生铜铅锌矿化。由于黄铜矿在流体中的溶解度低于闪锌矿和方铅矿(Large, 1992),所以随着温度降低,黄铜矿首先沉淀,而闪锌矿和方铅矿沉淀较晚。从近端内矽卡岩到近端外矽卡岩再到远端矽卡岩矿体(亚阶段 1~3),黄铁矿/磁黄铁矿比值逐步升高(图 6),反映成矿流体温度逐步降低或硫逸度逐步升高(Toulmin et al., 1964)。随着温度降低,绿泥石 Mn 含量升高(图 8d),可能反映了围岩组分贡献增多。沿构造裂隙往外迁移的岩浆热液流体在靠近岩体的地层中形成铜硫化物-石英脉,接着在远离岩体的地层中形成铜铅锌硫化物-石英脉。从铜硫化物-石英脉到铜铅锌硫化物-石英脉,铋矿物由自然铋转变为辉铋矿,毒砂消失,反映流体温度降低或硫逸度升高(Kretschmar et al., 1976; Voudouris et al., 2013)。随后成矿流体在蚀变花岗闪长斑岩中沿构造裂隙形成少量铅锌硫化物-石英脉,在外围地层中形成少量碳酸盐交代型铅锌矿体。最后形成成矿后方解石。

9 结 论

(1) 铜山岭铜铅锌矿床从隐伏岩体接触带向外依次发育近端内矽卡岩、近端外矽卡岩、硫化物-石英脉和远端矽卡岩矿体,包括 4 个矿化蚀变阶段,从早到晚依次为进变质矽卡岩、退变质矽卡岩、石英-硫化物和碳酸盐阶段,成矿主要发生在石英-硫化物阶段。

(2) 闪锌矿成分压力计研究表明,铜山岭铜铅锌矿床形成于中—上地壳水平,成矿深度为 6~12 km。绿泥石成分温度计研究表明,近端内矽卡岩、近端外矽卡岩和远端矽卡岩的形成温度下限分别为 345~

388℃、296~376℃和 296~338℃,成矿温度分别为 270~318℃、209~238℃和 200~223℃。3 类矽卡岩矿体的形成顺序依次为近端内矽卡岩、近端外矽卡岩和远端矽卡岩矿体。

致 谢 感谢匿名审稿专家对本文提出宝贵的修改意见。湖南锦艺矿业有限公司邢根生总工程师和周朴彩工程师在野外考察、样品采集和资料收集过程中给予了大力支持和帮助,法国奥尔良地球科学研究所 Ida Di Carlo 工程师为绿泥石和闪锌矿电子探针成分分析提供了技术协助,在此一并表示感谢。

References

- Barton P B. 1978. Some ore textures involving sphalerite from the Furutobe mine, Akita Prefecture, Japan[J]. *Mining Geology*, 28(4): 293-300.
- Barton P B and Bethke P M. 1987. Chalcopyrite disease in sphalerite: Pathology and epidemiology[J]. *American Mineralogist*, 72(5-6): 451-467.
- Beysse O, Goffé B, Chopin C and Rouzaud J N. 2002. Raman spectra of carbonaceous material in metasediments: A new geothermometer[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 20(9): 859-871.
- Bortnikov N S, Genkin A D, Dobrovol'skaya M G, Muravitskaya G N and Filimonova A A. 1991. The nature of chalcopyrite inclusions in sphalerite: Exsolution, coprecipitation, or "disease"[J]? *Econ. Geol.*, 86(5): 1070-1082.
- Cai Y X, Tan J J, Yang H M, Lu S S, Duan R C, Qiu X F, Cheng S B and Yang X L. 2015. The origin of ore-forming material in the Tongshanling Cu-polymetallic ore field in Hunan Province: Constraints from S-Pb-C isotopes[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(10): 1792-1803(in Chinese with English abstract).
- Cathelineau M. 1988. Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature[J]. *Clay Minerals*, 23(4): 471-485.
- Chang Z S, Shu Q H and Meinert L D. 2019. Skarn deposits of China[A]. In: Chang Z S and Goldfarb R J, eds. *Mineral Deposits of China*[C]. Littleton: Society of Economic Geologists, Special Publication. 22: 189-234.
- Cox S F. 2005. Coupling between deformation, fluid pressures, and fluid flow in ore-producing hydrothermal systems at depth in the crust[A]. In: Hedenquist J W, Thompson J F H, Goldfarb R J and Richards J P, eds. *Econ. Geol. 100th Anniversary Volume*[C]. Littleton: Society of Economic Geologists. 39-75.
- Deng X D, Luo T, Li J W and Hu Z C. 2019. Direct dating of hydrothermal tungsten mineralization using in situ wolframite U-Pb chronology by laser ablation ICP-MS[J]. *Chemical Geology*, 515: 94-104.

- Einaudi M T, Meinert L D and Newberry R J. 1981. Skarn deposits[A]. In: Skinner B J, ed. *Econ. Geol. 75th Anniversary Volume*[C]. Littleton: Society of Economic Geologists. 317-391.
- Eldridge C S, Bourcier W L, Ohmoto H and Barnes H L. 1988. Hydrothermal inoculation and incubation of the chalcopyrite disease in sphalerite[J]. *Econ. Geol.*, 83(5): 978-989.
- Gu L X and Zheng S J. 1990. Melnikovite in the South China type massive sulfide deposits and its annealing[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 9(4): 351-356(in Chinese with English abstract).
- Gu L X, Yin L and Vokes F M. 1995. Intergrowths of hexagonal and monoclinic pyrrhotites and their genesis from massive sulphide deposits of Norway[J]. *Geological Journal of China Universities*, 1(1): 80-92(in Chinese with English abstract).
- Guo W M, Lu J J, Zhang R Q and Xu Z W. 2010. Ore textures and genetic significance of pyrrhotite from Dongguashan ore deposit in Tongling area, Anhui Province[J]. *Mineral Deposits*, 29(3): 405-414(in Chinese with English abstract).
- Hey M H. 1954. A new review of the chlorites[J]. *Mineralogical Magazine*, 30: 277-292.
- Huang J C, Peng J T, Yang J H, Zhang B L and Xu C X. 2015. Precise zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating of the Shuikoushan granodiorite-related Pb-Zn mineralization, southern Hunan, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 71: 305-317.
- Huang X D and Lu J J. 2014. Geological characteristics and Re-Os geochronology of Tongshanling polymetallic ore field, South Hunan, China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 88(Supp. 2): 1626-1629.
- Huang X D, Lu J J, Sizaret S, Wang R C, Ma D S, Zhang R Q, Zhao X and Wu J W. 2017. Petrogenetic differences between the Middle-Late Jurassic Cu-Pb-Zn-bearing and W-bearing granites in the Nanling Range, South China: A case study of the Tongshanling and Weijia deposits in southern Hunan Province[J]. *Science China Earth Sciences*, 60(7): 1220-1236.
- Huang X D, Lu J J, Sizaret S, Wang R C, Wu J W and Ma D S. 2018. Reworked restite enclave: Petrographic and mineralogical constraints from the Tongshanling intrusion, Nanling Range, South China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 166: 1-18.
- Huang X D. 2018. Middle-Late Jurassic Cu-Pb-Zn-bearing and W-bearing granitoids and their skarn mineralization in the Nanling Range, South China: The Tongshanling and Weijia deposits[D]. Supervisors: Lu J J and Sizaret S. Nanjing: Nanjing University. 330.
- Hutchison M N and Scott S D. 1981. Sphalerite geobarometry in the Cu-Fe-Zn-S system[J]. *Econ. Geol.*, 76(1): 143-153.
- Ingebritsen S E and Manning C E. 1999. Geological implications of a permeability-depth curve for the continental crust[J]. *Geology*, 27(12): 1107-1110.
- Jiang Y H, Jiang S Y, Dai B Z, Liao S Y, Zhao K D and Ling H F. 2009. Middle to Late Jurassic felsic and mafic magmatism in southern Hunan Province, Southeast China: Implications for a continental arc to rifting[J]. *Lithos*, 107(3-4): 185-204.
- Jowett E C. 1991. Fitting iron and magnesium into the hydrothermal chlorite geothermometer[J]. *GAC/MAC/SEG Joint Annual Meeting (Toronto, May 27-29, 1991)*, Program with Abstracts, 16: A62.
- Kissin S A and Scott S D. 1982. Phase relations involving pyrrhotite below 350°C[J]. *Econ. Geol.*, 77(7): 1739-1754.
- Kojima S and Sugaki A. 1985. Phase relations in the Cu-Fe-Zn-S system between 500° and 300°C under hydrothermal conditions[J]. *Econ. Geol.*, 80(1): 158-171.
- Kojima S and Sugaki A. 1987. An experimental study on chalcopyritization of sphalerite induced by hydrothermally metasomatic reactions[J]. *Mining Geology*, 37(6): 373-380.
- Kong H, Li H, Wu Q H, Xi X S, Dick J M and Gabo-Ratio J A S. 2018. Co-development of Jurassic I-type and A-type granites in southern Hunan, South China: Dual control by plate subduction and intra-plate mantle upwelling[J]. *Geochemistry*, 78(4): 500-520.
- Kranidiotis P and MacLean W H. 1987. Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec[J]. *Econ. Geol.*, 82(7): 1898-1911.
- Kretschmar U and Scott S D. 1976. Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their application[J]. *Canadian Mineralogist*, 14(3): 364-386.
- Large R R. 1992. Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits: Features, styles, and genetic models[J]. *Econ. Geol.*, 87(3): 471-510.
- Li D F, Tan C Y, Miao F Y, Liu Q F, Zhang Y and Sun X M. 2019. Initiation of Zn-Pb mineralization in the Pingbao Pb-Zn skarn district, South China: Constraints from U-Pb dating of grossular-rich garnet[J]. *Ore Geology Reviews*, 107: 587-599.
- Liu B, Kong H, Wu Q H, Chen S F, Li H, Xi X S, Wu J H and Jiang H. 2022. Origin and evolution of W mineralization in the Tongshanling Cu-polymetallic ore field, South China: Constraints from scheelite microstructure, geochemistry, and Nd-O isotope evidence[J]. *Ore Geology Reviews*, 143: 104764.
- Long H C. 1983. Genetic characteristics and material sources of polymetallic deposit in Tongshanling[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 7(3): 198-208(in Chinese with English abstract).
- Lu Y F, Ma L Y, Qu W J, Mei Y P and Chen X Q. 2006. U-Pb and Re-Os isotope geochronology of Baoshan Cu-Mo polymetallic deposit in Hunan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2483-2492(in Chinese with English abstract).
- Lu Y Y, Fu J M, Cheng S B, Liu S S, Li C B, Zhang L G and Ma L Y. 2015. Rock-forming and ore-forming ages of Tongshanling copper polymetallic ore-field in southern Hunan Province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(6): 1061-1071(in Chinese with English abstract).
- Lusk J and Ford C E. 1978. Experimental extension of the sphalerite geobarometer to 10 kbar[J]. *American Mineralogist*, 63(5-6): 516-519.
- Mao J W, Chen M H, Yuan S D and Guo C L. 2011. Geological characteristics of the Qinhang (or Shihang) metallogenic belt in South China and spatial-temporal distribution regularity of mineral de-

- posits[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 636-658(in Chinese with English abstract).
- Meinert L D, Dipple G M and Nicolescu S. 2005. World skarn deposits[A]. In: Hedenquist J W, Thompson J F H, Goldfarb R J and Richards J P, eds. *Econ. Geol. 100th Anniversary Volume*[C]. Littleton: Society of Economic Geologists. 299-336.
- Meinert L D. 1997. Application of skarn deposit zonation models to mineral exploration[J]. *Exploration and Mining Geology*, 6(2): 185-208.
- Nicolescu S and Cornell D H. 1999. P-T conditions during skarn formation in the Ocna de Fier ore district, Romania[J]. *Mineralium Depositiona*, 34(8): 730-742.
- Quan T J, Wang G, Zhong J L, Fei L D, Kong H, Liu S J, Zhao Z Q and Guo B Y. 2013. Petrogenesis of granodiorites in Tongshanling deposit of Hunan Province: Constraints from petrogeochemistry, zircon U-Pb chronology and Hf isotope[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 33(1): 43-52(in Chinese with English abstract).
- Ren K D, Zhang D Y, Ye L X, Meng X, Yi H, Huang J L, Wan S W and Zhou T F. 2021. Metallogenic zonation of Gaojiabang tungsten polymetallic deposit in Jiangnan tungsten ore belt and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 40(2): 369-383(in Chinese with English abstract).
- Tan K R. 1983. Geochemical characteristics and mineralization of Tongshanling granodiorite, Hunan[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 7(1): 66-80(in Chinese with English abstract).
- Team 206 of Hunan Metallurgical and Geological Exploration Company. 1975. Report on geological exploration of the Cu-Pb-Zn deposit in the eastern Tongshanling area, Jiangyong County, Hunan Province[R]. Unpublished Report. 53p(in Chinese).
- Timón S M, Moro M C and Cembranos M L. 2009. Mineralogical and physiochemical evolution of the Los Santos scheelite skarn, Salamanca, NW Spain[J]. *Econ. Geol.*, 104(7): 961-995.
- Toulmin P and Barton P B. 1964. A thermodynamic study of pyrite and pyrrhotite[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 28(5): 641-671.
- Van der Pluijm B A and Marshak S. 2004. *Earth Structure: An Introduction to Structural Geology and Tectonics*[M]. 2nd ed. New York: W. W. Norton & Company. 656p.
- Voudouris P C, Spry P G, Mavrogenatos C, Sakellaris G-A, Bristol S K, Melfos V and Fornadel A P. 2013. Bismuthinite derivatives, lillianite homologues, and bismuth sulfotellurides as indicators of gold mineralization in the Stanos shear-zone related deposit, Chalkidiki, northern Greece[J]. *Canadian Mineralogist*, 51(1): 119-142.
- Wang D W and Scott S D. 1988. Theory of sphalerite geobarometry and its application[J]. *Geological Review*, 34(3): 277-281(in Chinese).
- Wang Y F, Yang H M, Zhang L G, Lu S S, Yang Z F, Qiu X F and Liu C P. 2017. Metallogenic epoch and ore-forming material source of the Tongshanling Pb-Zn polymetallic deposit in southeastern Hunan Province: Evidence from Sm-Nd isochron age and Pb isotope[J]. *Geological Bulletin of China*, 36(5): 875-884(in Chinese with English abstract).
- Wang Y J, Fan W M, Guo F, Li H M and Liang X Q. 2002. U-Pb dating of Early Mesozoic granodioritic intrusions in southeastern Hunan Province, South China and its petrogenetic implications[J]. *Science China Earth Sciences*, 45(3): 280-288.
- Wang Y J, Fan W M and Guo F. 2003. Geochemistry of Early Mesozoic potassium-rich diorites-granodiorites in southeastern Hunan Province, South China: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Geochemical Journal*, 37(4): 427-448.
- Wang Z Q, Chen B and Ma X H. 2014. In situ LA-ICP-MS U-Pb age and geochemical data of cassiterite of the Furong tin deposit, the Nanling Range: Implications for the origin and evolution of the ore-forming fluid[J]. *Chinese Science Bulletin*, 59(25): 2505-2519 (in Chinese with English abstract).
- Wei D F, Bao Z Y and Fu J M. 2007. Geochemical characteristics and zircon SHRIMP U-Pb dating of the Tongshanling granite in Hunan Province, South China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 31(4): 482-489(in Chinese with English abstract).
- Wiewióra A and Weiss Z. 1990. Crystallochemical classifications of phyllosilicates based on the unified system of projection of chemical composition: II. the chlorite group[J]. *Clay Minerals*, 25(1): 83-92.
- Wiggins L B and Craig J R. 1980. Reconnaissance of the Cu-Fe-Zn-S system: Sphalerite phase relationships[J]. *Econ. Geol.*, 75(5): 742-751.
- Wu J H, Kong H, Li H, Algeo T J, Yonezu K, Liu B, Wu Q H, Zhu D P and Jiang H. 2021. Multiple metal sources of coupled Cu-Sn deposits: Insights from the Tongshanling polymetallic deposit in the Nanling Range, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 139: 104521.
- Xu D M, Lin Z Y, Luo X Q, Zhang K, Zhang X H and Huang H. 2015. Metallogenetic series of major metallic deposits in the Qin Zhou-Hangzhou metallogenic belt[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(2): 7-24(in Chinese with English abstract).
- Yang M G and Yang Y W. 1997. Characteristics of geology and metallization in the Qin Zhou-Hangzhou paleoplate juncture[J]. *South China Geology*, 13(3): 52-59(in Chinese with English abstract).
- Yuan S D, Peng J T, Hu R Z, Li H M, Shen N P and Zhang D L. 2008. A precise U-Pb age on cassiterite from the Xianghualing tin-polymetallic deposit (Hunan, South China)[J]. *Mineralium Depositiona*, 43(4): 375-382.
- Yuan S D, Zhang D L, Shuang Y, Du A D and Qu W J. 2012. Re-Os dating of molybdenite from the Xintianling giant tungsten-molybdenum deposit in southern Hunan Province, China and its geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1): 27-38(in Chinese with English abstract).
- Zane A and Weiss Z. 1998. A procedure for classifying rock-forming chlorites based on microprobe data[J]. *Rendiconti Lincei*, 9(1): 51-56.
- Zhao P L, Yuan S D, Mao J W, Santosh M and Zhang D L. 2017. Zircon U-Pb and Hf-O isotopes trace the architecture of polymetallic deposits: A case study of the Jurassic ore-forming porphyries in

- the Qin-Hang metallogenic belt, China[J]. *Lithos*, 292-293: 132-145.
- Zhao P L, Yuan S D, Mao J W, Santosh M, Li C and Hou K J. 2016. Geochronological and petrogeochemical constraints on the skarn deposits in Tongshanling ore district, southern Hunan Province: Implications for Jurassic Cu and W metallogenic events in South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 78: 120-137.
- Zhao P L, Yuan S D, Mao J W, Yuan Y B, Zhao H J, Zhang D L and Shuang Y. 2018. Constraints on the timing and genetic link of the large-scale accumulation of proximal W-Sn-Mo-Bi and distal Pb-Zn-Ag mineralization of the world-class Dongpo orefield, Nanling Range, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 95: 1140-1160.
- Zhao Y M, Lin W W, Bi C S, Li D X and Jiang C J. 2012. Skarn deposits of China[M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House. 411p(in Chinese with English abstract).
- Zhou Y Z, Li X Y, Zheng Y, Shen W J, He J G, Yu P P, Niu J and Zeng C Y. 2017. Geological settings and metallogenesis of Qinzhou Bay-Hangzhou Bay orogenic juncture belt, South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(3): 667-681(in Chinese with English abstract).
- Zhu J C, Wang R C, Lu J J, Zhang H, Zhang W L, Xie L and Zhang R Q. 2011. Fractionation, evolution, petrogenesis and mineralization of Laiziling granite pluton, southern Hunan Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 17(3): 381-392(in Chinese with English abstract).
- Zhu J C, Wang R C, Zhang P H, Xie C F, Zhang W L, Zhao K D, Xie L, Yang C, Che X D, Yu A P and Wang L B. 2009. Zircon U-Pb geochronological framework of Qitianling granite batholith, middle part of Nanling Range, South China[J]. *Science China Earth Sciences*, 52(9): 1279-1294.
- 附中文参考文献**
- 蔡应雄, 谭娟娟, 杨红梅, 卢山松, 段瑞春, 邱啸飞, 程顺波, 杨小莉. 2015. 湘南铜山岭铜多金属矿床成矿物质来源的S、Pb、C同位素约束[J]. *地质学报*, 89(10): 1792-1803.
- 顾连兴, 郑素娟. 1990. 华南型块状硫化物矿床中的胶黄铁矿及其退火作用[J]. *岩石矿物学杂志*, 9(4): 351-356.
- 顾连兴, 尹琳, Vokes F M. 1995. 挪威块状硫化物矿床中单斜与六方磁黄铁矿的共生及其成因[J]. *高校地质学报*, 1(1): 80-92.
- 郭维民, 陆建军, 章荣清, 徐兆文. 2010. 安徽铜陵冬瓜山矿床中磁黄铁矿矿石结构特征及其成因意义[J]. *矿床地质*, 29(3): 405-414.
- 湖南冶金二〇六勘探队. 1975. 湖南江永县铜山岭东区铜铅锌矿地质勘探报告[R]. 内部报告. 53页.
- 黄旭栋, 陆建军, Sizaret S, 王汝成, 马东升, 章荣清, 赵旭, 吴劲薇. 2017. 南岭中-晚侏罗世含铜铅锌与含钨花岗岩的成因差异: 以湘南铜山岭和魏家矿床为例[J]. *中国科学: 地球科学*, 47(7): 766-782.
- 龙汉春. 1983. 铜山岭多金属矿床的成因特点和矿质来源[J]. *大地构造与成矿学*, 7(3): 198-208.
- 卢友月, 付建明, 程顺波, 刘树生, 黎传标, 张利国, 马丽艳. 2015. 湘南铜山岭铜多金属矿田成岩成矿作用年代学研究[J]. *大地构造与成矿学*, 39(6): 1061-1071.
- 路远发, 马丽艳, 屈文俊, 梅玉萍, 陈希清. 2006. 湖南宝山铜-钨多金属矿床成岩成矿的U-Pb和Re-Os同位素定年研究[J]. *岩石学报*, 22(10): 2483-2492.
- 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 郭春丽. 2011. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J]. *地质学报*, 85(5): 636-658.
- 全铁军, 王高, 钟江临, 费利东, 孔华, 刘仕杰, 赵志强, 郭碧莹. 2013. 湖南铜山岭矿区花岗岩闪长岩岩石成因: 岩石地球化学、U-Pb年代学及Hf同位素制约[J]. *矿物岩石*, 33(1): 43-52.
- 任康达, 张达玉, 叶龙翔, 孟翔, 易洪, 黄家龙, 万书文, 周涛发. 2021. 江南钨矿带高家垌钨多金属矿床矿化分带特征及其指示意义[J]. *矿床地质*, 40(2): 369-383.
- 谭克仁. 1983. 湖南铜山岭花岗岩闪长斑岩地球化学特征及其成矿作用[J]. *大地构造与成矿学*, 7(1): 66-80.
- 王大伟, Scott S D. 1988. 闪锌矿地质压力计原理及其应用[J]. *地质论评*, 34(3): 277-281.
- 王岳军, 范蔚茗, 郭锋, 李惠民, 梁新权. 2001. 湘东南中生代花岗岩闪长岩锆石U-Pb法定年及其成因指示[J]. *中国科学: 地球科学*, 31(9): 745-751.
- 王云峰, 杨红梅, 张利国, 卢山松, 杨泽飞, 邱啸飞, 刘重芃. 2017. 湘东南铜山岭铅锌多金属矿床成矿时代与成矿物质来源—Sm-Nd等时线年龄和Pb同位素证据[J]. *地质通报*, 36(5): 875-884.
- 王志强, 陈斌, 马星华. 2014. 南岭芙蓉钨矿田锡石原位LA-ICP-MS U-Pb年代学及地球化学研究: 对成矿流体来源和演化的意义[J]. *科学通报*, 59(25): 2505-2519.
- 魏道芳, 鲍征宇, 付建明. 2007. 湖南铜山岭花岗岩体的地球化学特征及锆石SHRIMP定年[J]. *大地构造与成矿学*, 31(4): 482-489.
- 徐德明, 蒯志永, 骆学全, 张鲲, 张雪辉, 黄皓. 2015. 钦—杭成矿带主要金属矿床成矿系列[J]. *地学前缘*, 22(2): 7-24.
- 杨明桂, 杨勇文. 1997. 钦—杭古板块结合带与成矿带的主要特征[J]. *华南地质*, 13(3): 52-59.
- 袁顺达, 张东亮, 双燕, 杜安道, 屈文俊. 2012. 湘南新田岭大型钨钼矿床辉钨矿Re-Os同位素测年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 28(1): 27-38.
- 赵一鸣, 林文蔚, 毕承思, 李大新, 蒋崇俊. 2012. 中国矽卡岩矿床[M]. 第二版. 北京: 地质出版社. 411页.
- 周永章, 李兴远, 郑义, 沈文杰, 何俊国, 虞鹏鹏, 牛佳, 曾长育. 2017. 钦杭结合带成矿地质背景及成矿规律[J]. *岩石学报*, 33(3): 667-681.
- 朱金初, 王汝成, 张佩华, 谢才富, 张文兰, 赵葵东, 谢磊, 杨策, 车旭东, 于阿朋, 王禄彬. 2009. 南岭中段骑田岭花岗岩基的锆石U-Pb年代学格架[J]. *中国科学: 地球科学*, 39(8): 1112-1127.
- 朱金初, 王汝成, 陆建军, 张辉, 张文兰, 谢磊, 章荣清. 2011. 湘南癞子岭花岗岩体分异演化和成岩成矿[J]. *高校地质学报*, 17(3): 381-392.