

文章编号: 0258-7106(2012)02-0216-13

# 湖南东坡柴山-蛇形坪一带铅锌矿床 流体包裹体研究\*

吴胜华<sup>1,2</sup>, 刘澜明<sup>3</sup>, 尹冰<sup>3</sup>, 郭春丽<sup>1</sup>, 李铁钢<sup>2</sup>, 乐国良<sup>1</sup>, 刘晓菲<sup>2</sup>

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2 中国地质大学, 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 3 湖南柿竹园有色金属有限责任公司, 湖南 郴州 423037)

**摘要** 东坡柴山-蛇形坪一带铅锌矿床位于千里山岩体西南侧的远接触带上, 由脉状、柱状和席状的铅锌矿体组成, 在矿体周围明显发生碳酸盐化和硅化作用。该带矿床中闪锌矿、萤石、石英和方解石内流体包裹体类型主要包括富液相包裹体、富气相包裹体和含子矿物包裹体, 其流体包裹体的均一温度范围为 140~395℃。在 350℃、240~260℃ 和 200~220℃ 处分别出现峰值, 反映该期热液流体在形成脉状、柱状铅锌矿体过程中可能包含了不同的捕获事件, 其中方解石内出现的气体包裹体同与其共生的液体包裹体的均一温度相近, 两者均一温度范围主要集中在 268~395℃, 峰值为 350℃。液相包裹体  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  范围为 9%~11%, 表明流体发生过气液相分离的沸腾作用; 闪锌矿、萤石、石英和方解石中流体包裹体  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  范围为 0~23%, 峰值 9%~10%。流体包裹体的均一温度和盐度特征与岩浆热液流体演化到裂隙阶段静水压力条件下的流体相近。闪锌矿中流体包裹体内存在方解石和白云石子矿物, 表明铅锌矿的成矿作用发生在富集碳酸盐的热液流体中。千里山花岗岩体晚期释放的流体沿着不同的通道上升, 当它冷却到低于 400℃, 这些地区产生了脆性裂隙, 流体沿着裂隙继续上升, 并且发生沸腾作用, 因此, 温度在 340~400℃ 时,  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  为 7% 左右的流体分成了  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  约 10% 的液相流体和  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  约 0.02% 的气相流体, 由于温度和压力的迅速降低, 成矿物质沿着裂隙和空洞沉淀成矿, 形成了东坡矿区的脉状、柱状和席状的铅锌矿体。

**关键词** 地球化学; 流体包裹体; 沸腾; 岩浆热液; 铅锌矿床; 柴山-蛇形坪; 东坡

中图分类号 P618.42; P618.43

文献标志码 A

## Fluid inclusion study of Pb-Zn deposits in Chaishan-Shexingping area of Dongpo, Hunan Province

WU ShengHua<sup>1,2</sup>, LIU LanMing<sup>3</sup>, YIN Bing<sup>3</sup>, GUO ChunLi<sup>1</sup>, LI TieGang<sup>2</sup>,  
YUE GuoLiang<sup>1</sup> and LIU XiaoFei<sup>2</sup>

(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3 Hunan Shizhuyuan Nonferrous Metals Liability Co. Ltd., Chenzhou 423037, Hunan, China)

### Abstract

The Chaishan-Shexingping Pb-Zn deposits of Dongpo are located in the distal areas of southeast Qianlishan intrusions and comprise Pb-Zn veinlike, columnar and sheet ore bodies, which have been apparently subjected to

\* 本文得到国土资源部公益性行业科研专项经费项目“我国典型金属矿科学基地研究(编号: 200911007-11)”、国家重点基础研究发展规划项目(编号: 2007CB411405)和国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室开放基金(ZS1112)的联合资助

第一作者简介 吴胜华, 男, 1982年生, 博士研究生, 研究实习员, 主要从事矿床学和矿床地球化学方面研究。Email: shenghuage@sina.com

收稿日期 2011-05-17; 改回日期 2012-02-26。秦思婷编辑。

the alteration of carbonation and silicification. The fluid inclusions in sphalerite, fluorite, quartz and calcite of the Chaishan-Shexingping Pb-Zn deposits of Dongpo are composed of liquid-rich, gas-rich and daughter mineral-bearing inclusions. The homogenization temperatures of fluid inclusions in these minerals range from 140°C to 395°C, with peaks being 350°C, 240~260°C and 200~220°C, respectively, corresponding to various capture events of hydrothermal fluids in the formation processes of Pb-Zn veins and columns. The homogenization temperatures of gas-rich and liquid-rich inclusions in calcite are roughly similar, both concentrated between 268°C and 395°C with the peak being 350°C, and the salinities  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  of the coexistent liquid inclusions range from 9% to 11%, confirming boiling and separation of gas and liquid phases. The salinities  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  of fluid inclusions in these minerals range from 0 to 23%, with the clear peaks between 9% and 10%. The homogenization temperatures and salinities of fluid inclusions are consistent with those of magmatic-hydrothermal fluids at the evolution stage of cracks and hydrostatic pressure. There are some daughter minerals, like calcite and dolomite, in fluid inclusions in sphalerite, reflecting Pb-Zn mineralization in the carbonate-rich hydrothermal fluids. The late fluids released by Qianlishan granite migrated upward along different paths, and when they were cooled below the temperature of 400 °C, brittle fractures would occur, and the fluids along the fractures continued ascending, so fluid boiling occurred. The fluids with temperatures between 340°C and 400°C and salinities  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  of 7% would separate into liquid fluids with salinities of about 10% and gas fluids with salinities  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  of about 0.02%, and due to the decrease of temperature and pressure, the materials for mineralization deposited along cracks and voids, forming Pb-Zn veins, sheets and columns in Dongpo area.

**Key words:** geochemistry, fluid inclusions, boiling, magmatic hydrothermal fluids, Pb-Zn deposits, Chaishan-Shexingping, Dongpo

东坡柴山-蛇形坪一带铅锌矿床位于湖南省郴州市东约 15 km 处,其北部是千里山花岗岩体(图 1)。在千里山花岗岩体的近接触带,产出了世界级的云英岩型和矽卡岩型 W-Sn-Mo-Bi 等多金属矿床,在其外围远接触带发育一批 Pb-Zn-Ag 矿床。东坡柴山-蛇形坪一带铅锌矿床主要由柴山、百步窿、横山岭和蛇形坪地区的铅锌矿床组成。

许多学者对世界上不同地区的离岩体近接触带云英岩或矽卡岩中 W、Mo、Cu、Au、Fe、Mn 等多金属矿体和远接触带 Pb、Zn、Ag 矿脉组成的复杂的成岩成矿分带系统进行了研究,并对从近接触带矽卡岩矿体到远接触带脉状矿体的转换过程进行了剖析(Megaw et al., 1988; Meinert, 1987; Bussell et al., 1990; Gunnesch et al., 1994; Meinert et al., 1997; Baker et al., 2004; Samson et al., 2008)。在南、北美洲和其他地区的矿床中,这样的转换现象很知名,如美国的 Groundhog 矿床中近接触带矽卡岩和远接触带席状、脉状 Pb-Zn 矿体的转换(Meinert, 1987)、墨西哥东北部的 La Paz 矿床中近接触带矽卡岩(Cu-Au)矿体和远接触带脉状 Ag-Pb-Zn 矿体的转换(Gunnesch et al., 1994)、洪都拉斯的 El Mochito 矿床中近接触带矽卡岩和远接触带席状、烟囱状 Pb-Zn

矿体的转换(Samson et al., 2008)、秘鲁中部的 Uchucchacua 矿床中近接触带 Fe-Mn 质矽卡岩和远接触带脉状 Ag-Mn-Pb-Zn 矿体的转换(Bussell et al., 1990)。前人对柿竹园地区近接触带云英岩型、矽卡岩型 W、Sn、Mo、Bi 等多金属矿床的物质来源、形成演化及矿床成因进行了细致的论述(王昌烈等, 1987; 毛景文等, 1994; 1996; 毛景文, 1997; Mao et al., 1995; Lu et al., 2003),也有学者对远接触带脉状、柱状、席状的 Pb、Zn 和 Ag 矿体的成矿规律、预测找矿靶区进行了总结(蔡新华等, 2006)。笔者基于对东坡柴山、百步窿、横山岭和蛇形坪地区铅锌矿中闪锌矿、萤石、石英和方解石内流体包裹体的分析,揭示了其成矿过程。

## 1 地质特征

湖南东坡柴山-蛇形坪一带铅锌矿床位于华南褶皱系湘南凹陷槽中,地表出露震旦系下统泗州山组灰色变质砂岩,中泥盆统跳马涧组砂岩,棋梓桥组白云质灰岩,上泥盆统余田桥组泥灰岩、泥质条带灰岩、碳质条带灰岩,锡矿山组白云质灰岩(毛景文等, 1996; 刘悟辉等, 2006)。震旦系下统泗州山组灰色

变质砂岩分布在图1东侧,主要由浅变质细粒石英砂岩夹灰绿色板岩、砂质板岩、碳质板岩组成,该组地层中产有枞树板大型铅锌银矿床(张怡军,1998);中泥盆统跳马涧组砂岩主要分布在图1北部

和西北部;中泥盆统棋梓桥组白云质灰岩和上泥盆统余田桥组泥灰岩、泥质条带灰岩、碳质条带灰岩(是与岩体接触的主要载矿围岩);以及上泥盆统锡矿山组白云质灰岩主要分布在图1南部。

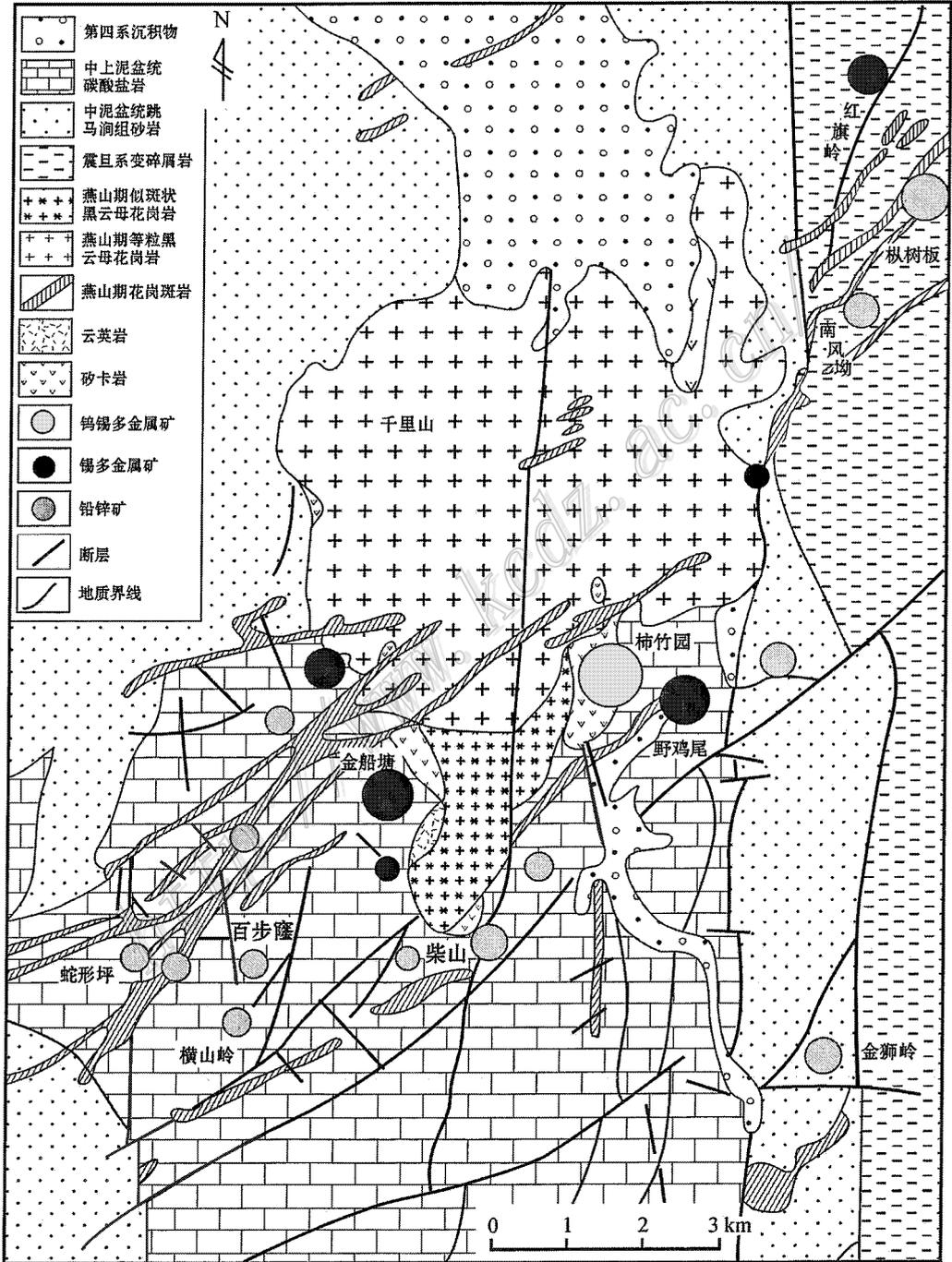


图1 东坡矿区地质图(毛景文等,2011)

Fig. 1 Geological map of the Dongpo ore district (after Mao et al., 2011)

湖南东坡矿区位于华南陆块内,在湖南-江西早古生代隆起和湖南-广西晚古生代凹陷的边部,是南岭大规模钨锡多金属成矿作用的典型地区(毛景文等,1996,2007)。矿区同时处于 NE 向茶陵-临武深大断裂边部,该断裂系统控制了该地区的主要区域构造,并与负的重力异常相关,可以联系到地表下的一个大的岩基(饶家荣等,1993)。该矿区位于东坡-月枚复式向斜北端,发育有一系列的次一级褶皱和断层,并与区域上主控断层走向一致。泥盆纪余田桥组灰岩在向斜核部,棋梓桥组白云质灰岩形成褶皱的东翼。矿区发育 40 条主要断层,走向为 SN 向、NW 向和 NE 向,其中 NE 向和 N 向断层最主要,控制了千里山花岗岩体侵位的主控构造和矿区的网脉状裂隙系统。强烈矿化作用大部分发生在主要断层交汇处的褶皱和裂隙中(Lu et al.,2003)。

矿区内主要出露千里山花岗岩体,呈岩株状产出,出露面积约 10 km<sup>2</sup>,多期岩体叠加,构成复式岩体(王昌烈等,1987)。岩体产出的大地构造背景为中国华南早燕山期(主要为侏罗纪)花岗岩省内西北部(Li et al.,2004),该花岗岩省广泛发育岩浆作用,形成了一个近 600 km 的火山-侵入杂岩体带(Jiang et al.,2006)。千里山花岗岩体侵入到泥盆系砂岩与碳酸盐岩地层中(图 1)。千里山岩体主体相可以分为 2 期:第一期为似斑状黑云母花岗岩,石英斑晶粒度 1~3 cm,出露在千里山花岗岩体南侧,面积为 1.2 km<sup>2</sup>;第二期为等粒黑云母花岗岩,出露面积为 8.4 km<sup>2</sup>。另外,矿区内还广泛发育 NE 向花岗斑岩脉(图 1)。钨多金属矿床形成于千里山岩体与泥盆系灰岩和震旦系变质砂岩的近接触带和远接触带上,野外关系表明这些矿床在时间和空间上与千里山岩体的侵入活动有关。

## 2 围岩蚀变与脉状、柱状和席状的铅锌矿体

东坡矿区的铅锌矿床位于柿竹园西南侧,主要由柴山、百步窿、横山岭和蛇形坪地区的铅锌矿床组成(图 1)。在离岩体近接触带发育云英岩、矽卡岩和大理岩蚀变,主要伴生 W、Mo、Bi、Sn 矿和大理岩化灰岩中的一些浸染状和细脉状的 Pb-Zn 矿(图 2),该类蚀变主要发生在柴山地区,千里山岩体的南端似斑状黑云母花岗岩的最南侧(图 1),比柿竹园和金船塘地区的蚀变作用规模小,但是蚀变作用和矿化分

带同样明显(图 2)。在离岩体远接触带的方解石和石英脉,伴生有脉状、柱状和席状的 Pb-Zn 矿(图 3、4),主要分布在柴山以西到横山岭、百步窿和蛇形坪一带。

### 2.1 云英岩

东坡山地区云英岩化主要包括块状云英岩和网脉状云英岩。块状云英岩与似斑状黑云母花岗岩紧密接触(图 2),具块状构造,烟灰色,主要由石英、白云母、黄玉、萤石和长石组成,还有少量硫化物,如黄铁矿、辉钼矿和黄铜矿等;网脉状云英岩离花岗岩体更远,在矽卡岩和大理岩蚀变带的内外侧均有发育,其中含黄铁矿、白钨矿、辉钼矿和萤石等。

### 2.2 矽卡岩

东坡山地区矽卡岩蚀变主要包括块状矽卡岩、条带状矽卡岩、网脉状矽卡岩和退化蚀变岩。块状矽卡岩与似斑状黑云母花岗岩紧密接触(图 2),主要由石榴子石、辉石、符山石和硅灰石组成,石榴子石与辉石呈嵌晶结构,其中石榴子石呈粗晶深褐色,自形,个别具环带结构,辉石为透辉石,浅绿色,长柱状,放射状符山石和硅灰石充填在石榴子石与辉石间,有时可见无色透明的萤石。条带状矽卡岩紧接块状矽卡岩,主要包括石榴子石硅灰石条带、硅灰石符山石条带、石榴子石硅灰石符山石条带等,并有少量浸染状硫化物沉淀(如辉钼矿)和软变形(揉褶皱)。对于条带状结构和矿物组合的成因存在多种解释(Brock,1972;Lu et al.,1992;Guy,1993;陈骏等,1994),如沉积岩原始层理发生热接触变质作用形成(Lu et al.,1992),Brock(1972)认为低反应速率和扩散作用导致此类岩石的形成;陈骏等(1994)也提出柿竹园地区符山石和硅灰石条带与余田桥组泥质条带状灰岩有关,并认为是热接触变质作用形成。Guy(1993)则认为条带状矽卡岩形成在振荡环境下厘米尺度的范围内,在变质条件下,流体对碳酸盐岩的交代,表现为不同矿物(矿物组合)争夺相同空间区域而形成的自主结构,为地球化学耗散结构。网脉状矽卡岩主要发育在大理岩中(图 2),脉长几十米到上百米不等,宽度 10~50 cm,主要由粗晶石榴子石、符山石和白色透明萤石组成,还伴生有白钨矿、辉钼矿和锡石等矿物。退化蚀变岩,主要发育在矽卡岩蚀变带的外侧,表现为原生矽卡岩的退化蚀变作用或沿张裂隙及晚期云英岩脉旁的矽卡岩发生退化蚀变作用,形成退化蚀变岩。一种退化蚀变岩为矽卡岩退化蚀变成绿泥石、绿帘石、黄铁

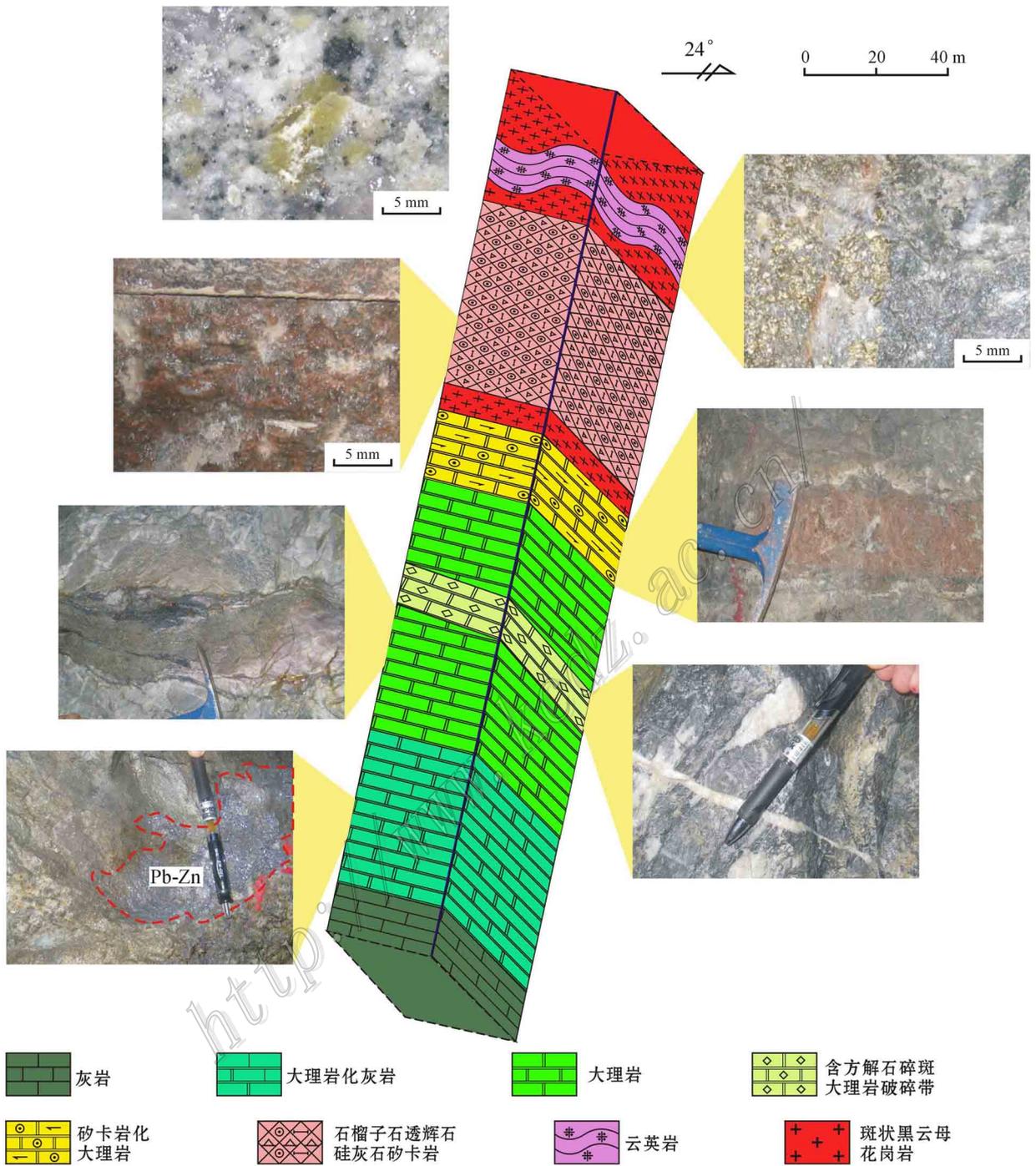


图 2 东坡柴山离花岗岩体近接触带蚀变作用

Fig. 2 Proximal alteration near granite in Chaishan area of Dongpo

矿和石英等矿物组成的岩石；一种退化蚀变岩为砂卡岩的后期钾长石脉蚀变，钾长石脉的边部发育后期蚀变的绿泥石。

### 2.3 大理岩化

东坡山地区大理岩化主要发生在砂卡岩蚀变外

侧(图 2)，其内常发育石英、方解石细脉。细脉中，常见锡石矿化，铜矿化次之。锡石粒度细小，0.01~0.14 mm 不等，集中在 0.02~0.07 mm；黄铜矿粒度一般为 0.1~0.2 mm。大理岩化灰岩在周围发育(图 2)，表现为灰岩局部发育大理岩化，同时伴

随着浸染状、团块状和细脉状的铅锌矿化(图 2),这类铅锌矿的规模与西侧远接触带柴山、横山岭、百步窿和蛇形坪地区的脉状、柱状和席状铅锌矿体规模(图 3、4)相差较大,为离岩体最近的铅锌矿化作用。

#### 2.4 脉状、柱状和席状的铅锌矿体

脉状、柱状和席状的铅锌矿体主要发育在柴山、横山岭、百步窿和蛇形坪地区,与云英岩、矽卡岩和大理岩少见明显的接触关系。以脉状铅锌矿体为主,走向 NE 向,与 NE 向的花岗斑岩脉走向相似,与花岗斑岩的接触面界线清楚(图 3b、4d、e、f)。局部表现花岗斑岩明显切割铅锌矿脉体且其内发育铅锌矿捕虏体(图 3a、b),部分地区出现花岗斑岩延伸到铅锌矿体中(图 3c、d),铅锌矿开采后,在与花岗斑岩的接触面发育类似断层构造的摩擦镜面和擦痕(图 4e)。脉状铅锌矿以方铅矿为主,含一定量的闪锌矿,还有黄铁矿、磁黄铁矿、方解石、萤石、石榴子石和辉石,脉状铅锌矿围岩碳酸盐岩中发生碳酸盐化、绢云母化和硅化。柱状铅锌矿体开采后形成柱状空洞(图 4c),直径在几十米,高度可达一百多米。在脉

状、柱状铅锌矿的周围常发育席状(图 4a)、浸染状的铅锌矿(图 4b)。席状铅锌矿由半透明的闪锌矿薄层外壳和方铅矿厚实内核组成,表明方铅矿含量远大于闪锌矿。浸染状方铅矿主要发育在方解石脉内或其周围(图 4b),粒度 2~5 mm,立方体状,三组解理。闪锌矿为棕黄色,半透明,短柱状。

### 3 流体包裹体研究

#### 3.1 测试分析方法

流体包裹体测试分析在中国地质科学院矿产资源研究所流体包裹体与成矿模拟实验室完成。激光拉曼光谱仪为英国 Renishaw 公司生产的 Renishaw-2000 型激光拉曼光谱仪,激光功率 20 mW,激发波长 514 nm,激光最小束斑 1  $\mu\text{m}$ ,光谱分辨率为 1~2  $\text{cm}^{-1}$ 。显微冷热台为英国 Linkam 生产的 THMSG-600 冷/热台,温度控制范围为 -196~600 $^{\circ}\text{C}$ ,冷热台在 -120~-70 $^{\circ}\text{C}$  温度区间的测定精度为  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、-70~100 $^{\circ}\text{C}$  区间为  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ,100~500 $^{\circ}\text{C}$  区间为  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。样品最大镜域直径 1 cm。

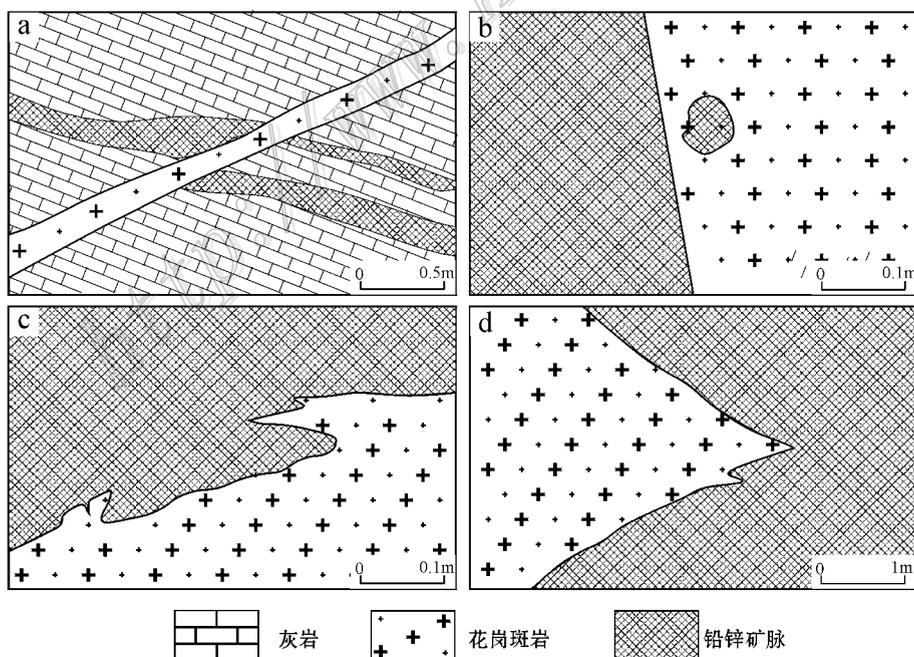


图 3 东坡矿区离花岗岩体远接触带脉状铅锌矿与花岗斑岩的接触关系(据杨昌明,1986)

a. 花岗斑岩切割铅锌矿脉体;b. 花岗斑岩内发育铅锌矿捕虏体;c、d. 花岗斑岩延伸到铅锌矿体中

Fig. 3 Relationship of distal Zn-Pb ore bodies to granite porphyry in Dongpo area(after Yang, 1986)

a. Pb-Zn veins cut by granite porphyry ; b. Granite porphyry extending into Pb-Zn veins ; c. Granite porphyry extending into Pb-Zn veins ; d. Granite porphyry extending into Pb-Zn veins

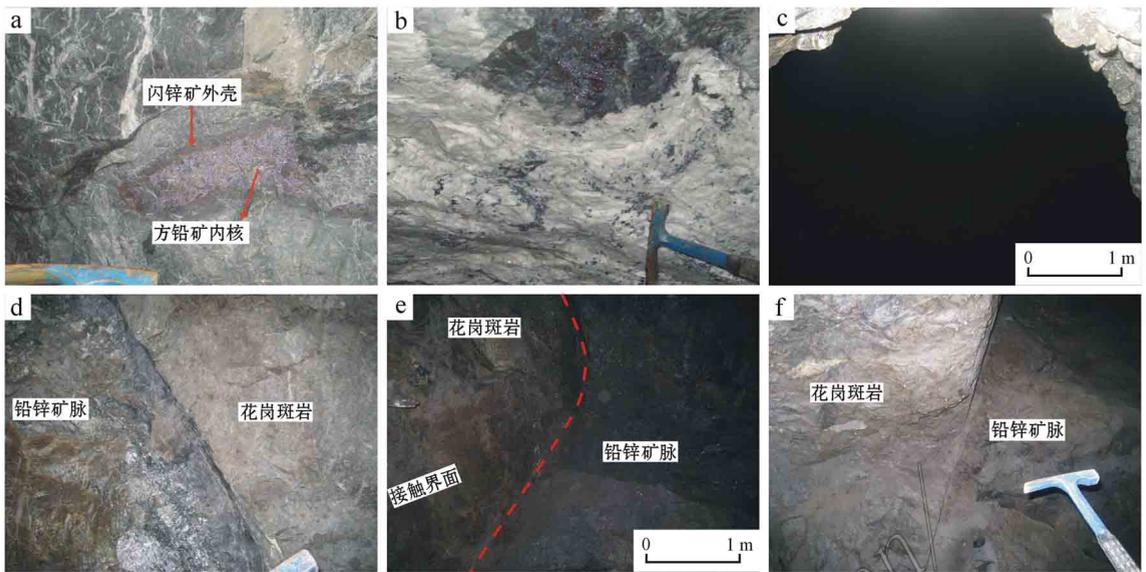


图4 铅锌矿体与矿石的形态特征

a. 席状的铅锌矿体前端由薄层状闪锌矿的外壳和厚实的方铅矿内核组成; b. 纯白色方解石脉中发育浸染状方铅矿和闪锌矿; c. 柱状的铅锌矿体被开采后留下的空洞,直径在几十米,高度可达一百多米; d. 铅锌矿体与花岗斑岩中明显的截然的接触关系; e. 开采后的铅锌矿与花岗斑岩的接触界面发育类似断层构造的摩擦镜面和擦痕; f. 铅锌矿与花岗斑岩呈明显的接触关系

Fig. 4 Underground photographs in the Chaishan-Shexingping Zn-Pb deposits of Dongpo area

a. The front of Pb-Zn sheet ore body, composed of thin sphalerite shell and thick galena core; b. Development of disseminated galena and sphalerite in pure white calcite vein; c. Empty hole after mining for Pb-Zn column, tens of meters in diameter and up to one hundred meters in height; d. The relationship between Pb-Zn vein and granite porphyry; e. The left contact interface between mined Pb-Zn vein and granite porphyry, like friction and scratches of fault structures; f. The relationship between Pb-Zn vein and granite porphyry

通过上述分析方法,将测得的矿物流体包裹体中盐水溶液包裹体冰点数据对应卢焕章等(2004)给出的流体包裹体冷冻法冰点与盐度关系表,查得各矿物流体包裹体的盐度值;根据徐培苍等(1996)给出的主要气相和液相拉曼光谱特征峰值判断各矿物中流体包裹体的气相和液相组分。

### 3.2 流体包裹体类型

本次研究对离岩体远接触带(柴山、横山岭、百步窿和蛇形坪地区)的脉状、柱状、浸染状矿体中矿石矿物与脉石矿物内的流体包裹体进行了研究,包括闪锌矿、萤石、方解石和石英,鉴定出3类流体包裹体(室温条件下)。

(I) 两相  $H_2O$  溶液包裹体。这类包裹体又可分为2类,一类为液相  $H_2O$  所占体积比例大于50%,气相分数为5%~45%(室温 25°C 条件下,下文同此),在闪锌矿、萤石、方解石和石英中均有分布,占流体包裹体类型的大部分,呈群体或串珠状分布,形状多为椭圆状,长条状或不规则状,气液相多为无色(图 5c、e、h);另一类为气相  $H_2O$  所占体积比

例大于50%,气相分数多数大于60%,个别高达90%,分布在方解石中,呈群体分布,形状多为椭圆状和长条状,气液相多为无色(图 5j)。

(II) 含  $CH_4$  的流体包裹体。这类流体包裹体液相  $H_2O$  所占体积比例大于50%,气相分数为5%~15%,气相主要由  $CH_4$  组成(图 5b、g、i),在闪锌矿、萤石和石英中都有分布,含量少,零星分布。

(III) 含子矿物流体包裹体。这类包裹体主要出现在闪锌矿和萤石中,气相分数5%~20%,由气相、液相和子矿物组成,常见子矿物为方解石和白云石(根据下文拉曼分析得知),子矿物体积占5%~10%(图 5a、d、f)。

### 3.3 均一温度与盐度

测定的闪锌矿均来自方解石脉,与方铅矿共生,呈脉状或浸染状分布,棕红色或黑褐色,半透明或全透明,测试结果见表1。测定的闪锌矿中流体包裹体的均一温度范围为140~283°C,峰值分别为220°C和260°C(图6);盐水包裹体的  $\omega(NaCl_{eq})$  范围为3.71%~19.53%,峰值分布在4%和10%(图6);

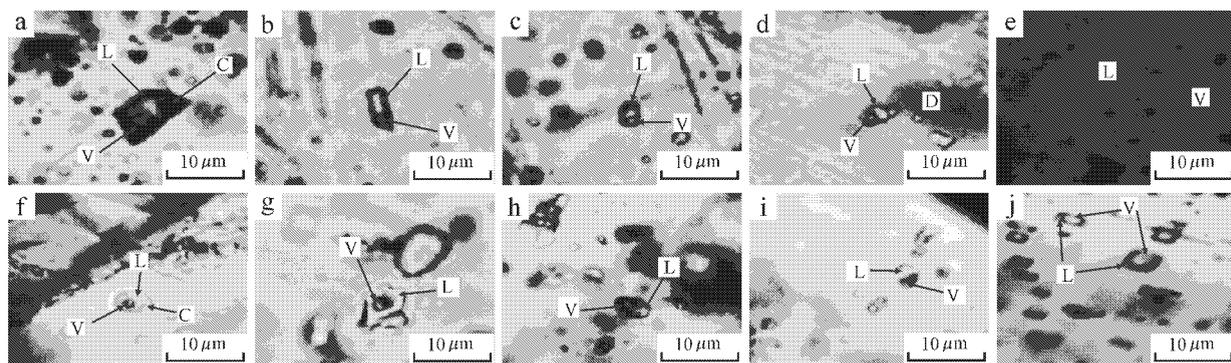


图 5 东坡柴山-蛇形坪一带铅锌矿中流体包裹体

a. 闪锌矿中含方解石子矿物包裹体；b. 闪锌矿中气相含 CH<sub>4</sub> 包裹体；c. 闪锌矿中盐水包裹体；d. 闪锌矿中含白云石子矿物包裹体；e. 萤石中盐水包裹体；f. 萤石中含方解石子矿物包裹体；g. 萤石中气相含 CH<sub>4</sub> 包裹体；h. 石英中盐水包裹体；i. 石英中气相含 CH<sub>4</sub> 包裹体；j. 方解石中富气相和富液相水共存包裹体。C—方解石；D—白云石；L—液相；V—气相

Fig. 5 Fluid inclusions in the Chaishan-Shexingping Zn-Pb deposits of Dongpo area

a. Calcite-bearing daughter mineral inclusions in sphalerite ; b. Gas phase containing CH<sub>4</sub> inclusions in sphalerite ; c. NaCl-H<sub>2</sub>O inclusions in sphalerite ; d. Dolomite-bearing daughter mineral inclusions in sphalerite ; e. NaCl-H<sub>2</sub>O inclusions in fluorite ; f. Calcite-bearing daughter mineral inclusions in fluorite ; g. Gas phase containing CH<sub>4</sub> inclusions in fluorite ; h. NaCl-H<sub>2</sub>O inclusions in quartz ; i. Gas phase containing CH<sub>4</sub> inclusions in quartz ; j. Gas-rich and liquid-rich inclusions in calcite. C—Calcite ; D—Dolomite ; L—Liquid ; V—Vapor

表 1 典型样品中流体包裹体特征及显微测温结果

Table 1 Fluid inclusion characteristics and homogenization temperatures of typical samples

样号	名称	个数	大小/ $\mu\text{m}$	气相分数/%	$t_{m-ice}/^{\circ}\text{C}$	$t_h/^{\circ}\text{C}$	$\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})\%$
10cs-51	闪锌矿	4	3~6	5	-2.7~-10.1	275~283	4.49~14.04
10cs-57	闪锌矿	9	3~20	5	-3.0~-12.7	153~271	4.96~16.62
10cs-58	闪锌矿	35	3~17	5~25	-2.2~-16.1	140~283	3.71~19.53
10cs-19	萤石	4	5~16	5~25	-4.2	299~360	6.74
10sxp-20	萤石	17	5~25	5~35	-7.0~-13.1	239~362	10.49~16.99
10sxp-21	萤石	34	5~31	5~40	-3.6~-11.7	187~344	5.86~15.67
10cs-12	石英	13	5~20	10~20	-0.1~-2.8	178~234	0.18~4.65
10cs-51	方解石	2	4	15~25	-3.3~-7.5	294~323	5.41~11.10
10cs-54	方解石	25	3~15	10~90	-5.8~-6.3	143~395	8.95~9.60
10cs-55	方解石	18	4~8	5~10	-16.2~-20.9	163~267	19.60~22.98
10sxp-4	方解石	7	5~10	5~15	-15.8~-16.2	172~295	19.29~19.60
10sxp-10	方解石	4	3~5	10	-2.4~-3.0	256~265	4.03~4.96
10sxp-15	方解石	13	5~15	5~10	-3.3~-8.3	223~298	5.41~12.05
10hsl-2	方解石	2	3~8	5~10	-4.2~-4.9	242~243	6.74~7.73
10hsl-11	方解石	11	3~10	5~70	-4.3~-13.4	168~389	6.88~17.26
10bbl-4	方解石	12	3~7	5~10	-0.6~-3.2	159~256	1.05~5.26

含有方解石和白云石子矿物的流体包裹体加热到 400℃ 时,子矿物未发生融化。

测定的萤石来自块状或脉状铅锌矿石,与方铅矿和闪锌矿共生,呈浸染状分布在矿石中。萤石流体包裹体的均一温度范围为 187.1~362.1℃,峰值集中在 350℃;流体包裹体的  $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  范围为 5.86%~16.99%,峰值集中在 10%(图 6);含方解石子矿物的流体包裹体加热到 400℃ 时,子矿物未融

化。

测定的石英来自石英脉,石英脉内发育铅锌矿。石英中流体包裹体的均一温度范围为 178.0~234.0℃,峰值分布在 190~200℃(图 6); $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  范围为 0.18%~4.65%,峰值不显著(图 6)。

测定的方解石来自方解石脉和脉状铅锌矿中的浸染状方解石,其流体包裹体的均一温度范围为 142.5~395.2℃,主峰值不显著,在 160℃、210℃、

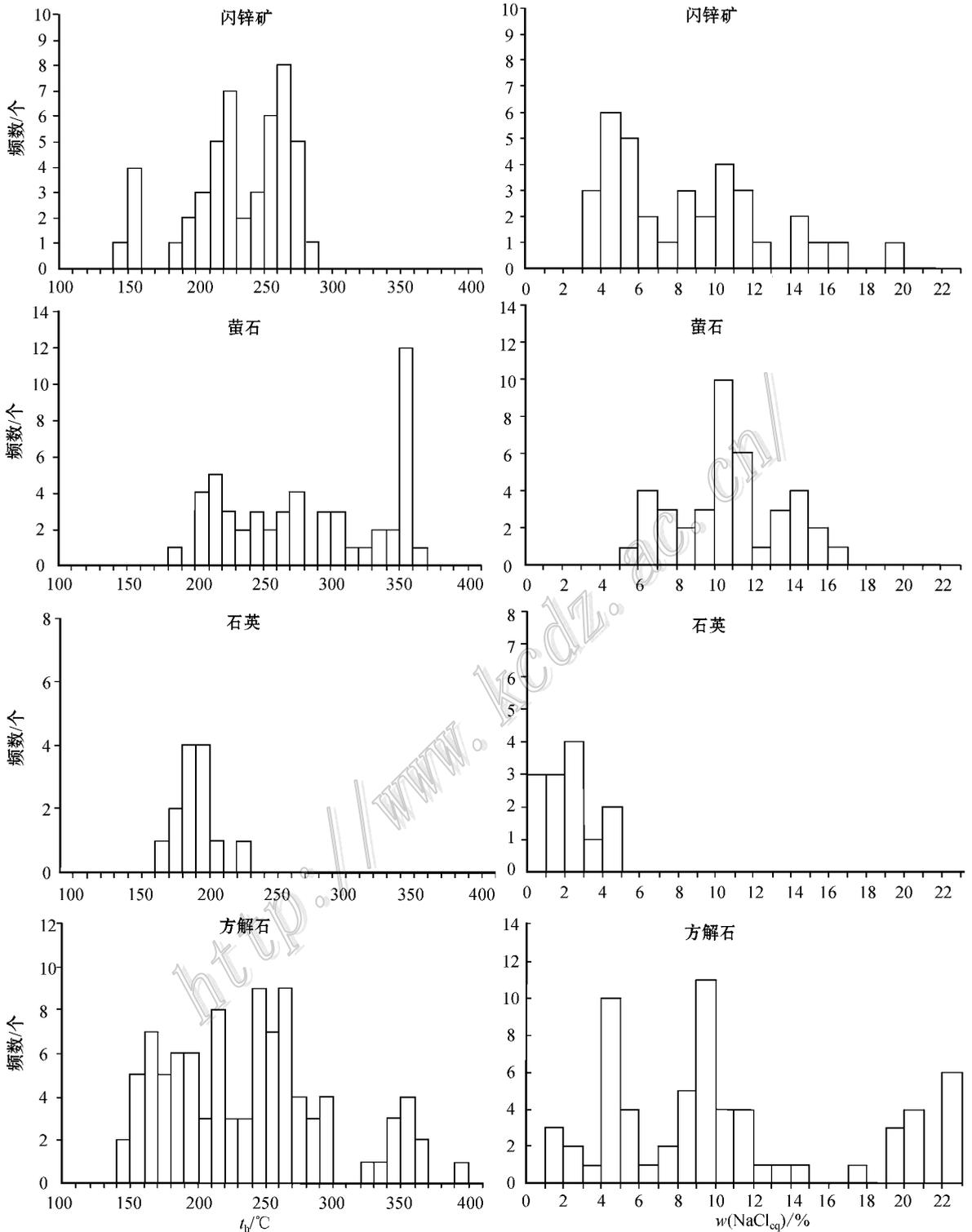


图6 均一温度与盐度直方图

Fig. 6 Histogram of homogenization temperatures and their corresponding salinities

240~260°C 和 350°C 都显示了不明显的峰(图6)。方解石中出现的气体包裹体同与其共生的液体包裹体的均一温度相近,两者均一温度范围主要集中在

268~395°C, 峰值为 350°C, 液相的流体包裹体的盐度值范围为 9%~11%; 测定的流体包裹体  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  范围为 1.05%~22.98%, 三个峰值分别为

4%、9%和 22%(图 6),其中的 22% 处峰值代表了一批方解石中相对高盐度的流体包裹体。

### 3.4 拉曼分析

分别对闪锌矿、萤石、石英和方解石中有代表性的流体包裹体进行了激光拉曼分析。结果表明,除了闪锌矿、萤石、石英和方解石主矿物峰外,在闪锌矿流体包裹体中测定有子矿物  $\text{CaCO}_3$  和  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 、液相  $\text{H}_2\text{O}$  和气相  $\text{CH}_4$  的拉曼特征峰值(图 7);在萤石流体包裹体中测定有子矿物  $\text{CaCO}_3$ 、液相  $\text{H}_2\text{O}$  和气相  $\text{CH}_4$  的拉曼特征峰值(图 8、9);在石英流体包裹体中测定有液相  $\text{H}_2\text{O}$  和气相  $\text{CH}_4$  的拉曼特征峰值(图 10);在方解石流体包裹体中测定有子矿物  $\text{ZnS}$  和液相  $\text{H}_2\text{O}$  的拉曼特征峰值(图 11)。

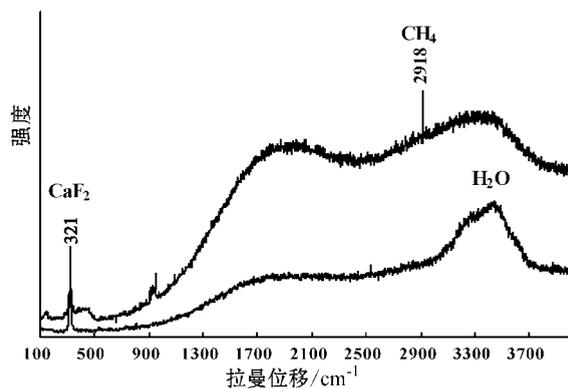


图 9 萤石中流体包裹体拉曼光谱特征  
Fig. 9 Raman spectra for fluid inclusions in fluorite

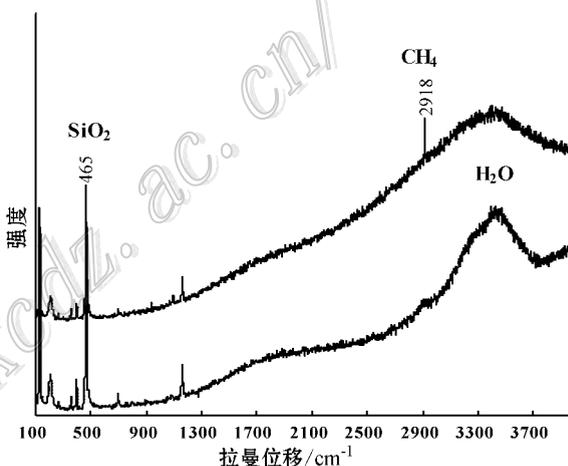


图 10 石英中流体包裹体拉曼光谱特征  
Fig. 10 Raman spectra for fluid inclusions in quartz

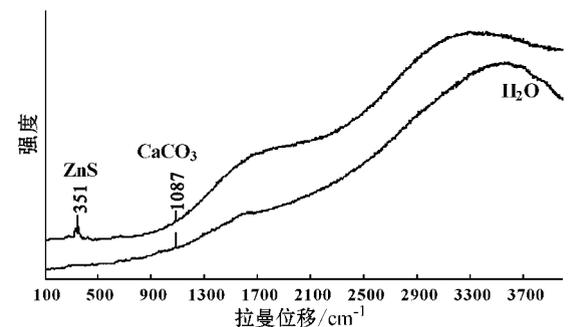


图 11 方解石中流体包裹体拉曼光谱特征  
Fig. 11 Raman spectra for fluid inclusions in calcite

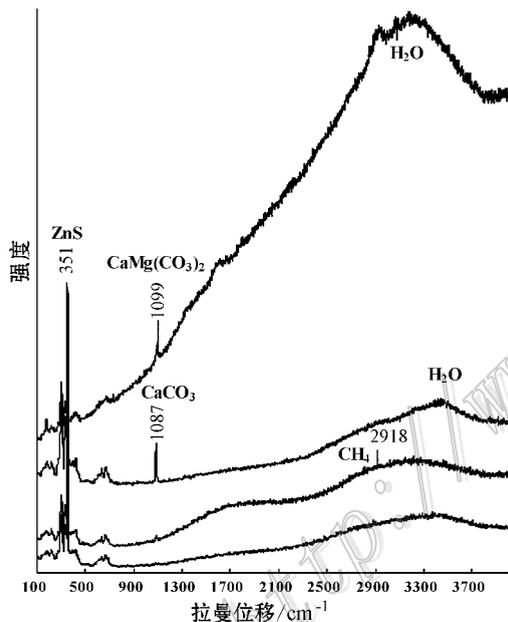


图 7 闪锌矿中流体包裹体拉曼光谱特征  
Fig. 7 Raman spectra for fluid inclusions in sphalerite

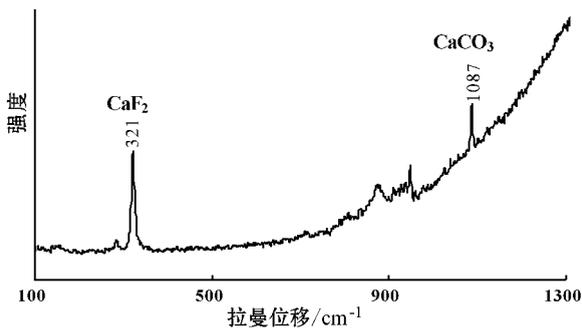


图 8 萤石中流体包裹体拉曼光谱特征  
Fig. 8 Raman spectra for fluid inclusions in fluorite

## 4 讨论

通过显微冷热台分析,测定的闪锌矿、萤石、石英和方解石均一温度变化较大,140~395℃的均一温度范围表明流体经历了一个降温的过程,在350℃、

250℃和200℃左右都出现波峰,表明这期热液流体在形成脉状、柱状铅锌矿体过程中可能包含了不同的捕获事件。其中,萤石均一温度的峰值为350℃,与方解石中共存的气、液相包裹体的均一温度峰值(350℃)一致,大致代表该类成矿流体的成矿初始温度;方解石气相包裹体与液相包裹体共存在同一矿物颗粒中,通过岩相学观察,发现为同时捕获的包裹体,测定气相包裹体与其共生的液相盐水包裹体获得的均一温度范围相近(两者均一温度范围主要集中在268~395℃,峰值为350℃),液相包裹体的 $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为9%~11%,表明流体发生过沸腾作用(卢焕章,2000),并且发生在静水压力约 $200 \times 10^5$  Pa条件下(图12)。但是,早期形成的富气相的流体包裹体只能在早期形成的盐水包裹体中找到,可能是因为气相分离和逃逸之后,大部分盐水在原地冷却,使得富气相的流体包裹体很难在已发生过去气的盐水流体形成的流体包裹体中发现,因而在包裹体测温时获得了比原始流体稍高的盐度值(Fournier,1999)。闪锌矿、萤石、石英和方解石所获得的盐度变化也较大, $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 范围1%~22%,特别是在方解石中存在小部分的相对高盐度值的流体包裹体, $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 范围在22%左右;但除石英外,闪锌矿、萤石和方解石 $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 都在9%~10%处存在显著峰值,这与前人(Fournier,1999;Meinert et al.,2003;Baker et al.,2004)提出的岩浆热液流体演化到裂隙阶段静水压力条件下的盐水

流体的盐度值相近,这样盐度值的流体到后期会分离成不同盐度值的流体(Meinert et al.,2003)。通过激光拉曼分析,在闪锌矿流体包裹体中测到方解石和白云石子矿物,在方解石中的流体包裹体测到闪锌矿矿物,均表明铅锌矿的成矿作用发生在富集碳酸盐的热液流体中;在闪锌矿、萤石和石英流体包裹体测定到的 $\text{CH}_4$ ,目前笔者还无法推测其来源。

从近接触带云英岩和矽卡岩中W-Sn-Mo-Bi等多金属矿体到远接触带脉状、柱状和席状Pb-Zn-Ag矿脉成矿作用的转变,表明柿竹园地区成矿流体经历了较为复杂的演化过程。脉状、柱状和席状的Zn-Pb-Ag矿体和矽卡岩都是碳酸盐岩容矿的矿床,这些矿床被称为碳酸盐交代矿床(Megaw,1998;Baker et al.,2004)。Meinert等(2003)对该类矿床提出了一个分为2阶段的流体模型:早阶段来自浅部侵位的富蒸汽相岩体释放的高通量的流体,导致早期无水矽卡岩(石榴子石和辉石)的产生;晚阶段熔融结晶伴随着流体通量的减少,导致温度降低(450℃),并导致在静水压力下产生脆性裂隙。模型与岩浆去气作用和矽卡岩矿床中观察到的岩浆热液演化的物理化学条件和岩石学模型一致(Baker et al.,2004)。

需要说明的是,千里山岩体的主体,似斑状黑云母花岗岩与等粒黑云母花岗岩是近于同时形成的[(152±2)Ma;Li et al.,2004]。根据野外地质现象和分析成矿流体成分与性质,得出下列结论。首先,在柿竹园地表下,当时的千里山岩体的母岩浆侵位到地壳浅部,在这个阶段,岩浆和紧密接触的围岩是高温的(>>400℃),岩石以韧性为主,并且为封闭的条件。随后,当千里山岩体主体冷却和结晶时,中等盐度(6%~8%)的盐水流体被释放到岩浆结晶壳的外围,这样的盐水流体是超临界流体,尽管是在相对高温的条件下,但是没有沸腾作用,由于相分离,盐水流体在岩体与碳酸盐岩的接触面产生云英岩和矽卡岩,气相流体在岩体外围形成蒸气的羽状体。当下伏的岩浆房继续冷却和结晶,流体继续释放。晚期释放的流体与早期流体的Na-K-Cl组成相似(盐度值相似),但是由于母岩浆处在晚期结晶阶段的低流体通量,流体沿着不同的通道上升。当温度逐渐下降到低于400℃时(400℃是韧性变形到脆性变形转化的温度,也是在很多系统中静岩压力到静水压力转化的条件),在岩体远接触带产生裂隙,流体会发生沸腾作用(图12)。温度为340~400℃

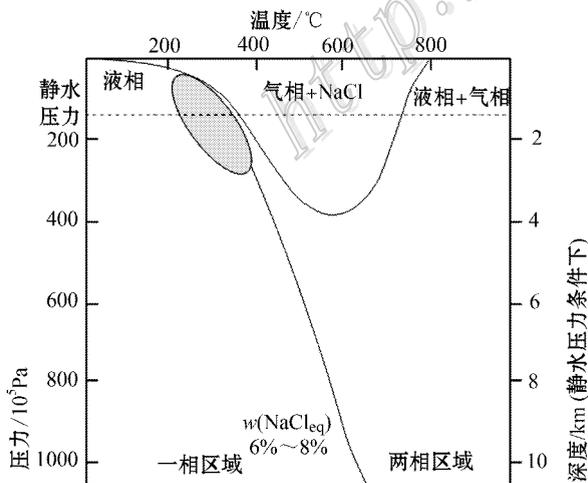


图12 NaCl-H<sub>2</sub>O系统的压力与温度图解  
(底图据Fournier,1987)

Fig. 12 Pressure versus temperature plot for NaCl-H<sub>2</sub>O system (after Fournier, 1987)

和  $x(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  为 7% [ 根据测定, 推测共生的气相与液相流体包裹体的均一温度峰的范围为 340~400°C 和  $x(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  为 9%~11% ] 的流体会分成  $x(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  为 10% 的液相流体和  $x(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  为 0.02% 的气相流体 (Fournier, 1987) (图 12)。由于温度和压力的降低, 成矿物质沿着裂隙和空洞继续上升并沉淀成矿(这些裂隙和空洞为早期气相流体的渗透和溶蚀作用形成, 使围岩变得薄弱; 后期发生岩浆的进一步活动, 在脆性的条件下张裂形成), 这就是现在东坡矿区看到的脉状、柱状和席状的铅锌矿体。

## 5 结 论

(1) 湖南东坡铅锌矿床中闪锌矿、萤石、石英和方解石中流体包裹体类型主要包括富液相包裹体、富气相包裹体和含子矿物包裹体。流体包裹体的均一温度范围为 140~395°C, 在 350°C、260~240°C 和 220~200°C 出现峰值, 表明该期热液流体在形成脉状、柱状铅锌矿体过程中可能包含了不同的捕获事件。其中, 方解石内的气相包裹体与液相包裹体共生, 均一温度相近, 表明流体发生过沸腾作用。流体包裹体  $x(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  的明显峰值为 9%~10%, 与岩浆热液流体演化到裂隙阶段静岩压力条件下盐水流体的盐度值相近。

(2) 通过激光拉曼分析, 在闪锌矿的流体包裹体中测到方解石和白云石子矿物, 在方解石的流体包裹体中测到闪锌矿子矿物, 表明铅锌矿的成矿作用发生在富集碳酸盐的热液流体中。

(3) 柴山-蛇形坪一带的铅锌矿床可能是千里山花岗岩体晚期释放的流体沿着不同的通道上升, 当温度下降到低于 400°C 时, 由于脆性裂隙等原因, 压力突然降低, 流体发生沸腾作用, 导致铅锌的沉淀而成矿。

志 谢 在室内外工作中, 得到湖南柿竹园有色金属有限责任公司李军和吴澜、湖南省湘南地质勘察院的张怡军和中国地质科学院矿产资源研究所流体包裹体与成矿模拟实验室徐文艺和陈伟十的支持和帮助, 在此深表谢意。

## 参考文献/References

蔡新华, 张怡军, 徐惠长, 谭若发. 2006. 柿竹园钨锡钼多金属矿床

- 边部铅锌找矿潜力分析[J]. 地质与勘查, 2006, 4(2): 29-32.
- 陈 骏, Halls C, Stanley C J. 1994. 柿竹园矽卡岩型钨锡钼矿床主要造岩矿物中 REE 的分布特征及成岩意义[J]. 地球化学, 23 (增刊): 84-92.
- 刘悟辉, 徐文焯, 戴塔根, 李 衡. 2006. 湖南柿竹园钨锡多金属矿床野鸡尾矿床同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 22(10): 2517-2524.
- 卢焕章. 2000. 高盐度、高温和高成矿金属的岩浆成矿流体——以格拉斯伯格 Cu-Au 矿为例[J]. 岩石学报, 16(4): 465-472.
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪 培, 欧光习, 沈 昆, 张文淮. 2004. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社. 208 页.
- 毛景文, 李红艳, 王平安, Guy B, Perrin M, Raimbault L. 1994. 湖南柿竹园钨多金属矿床中的锆质矽卡岩[J]. 矿床地质, 13(1): 38-47.
- 毛景文, 李红艳, Guy B, Raimbault L. 1996. 湖南柿竹园矽卡岩-云英岩型 W-Sn-Mo-Bi 矿床地质和成矿作用[J]. 矿床地质, 15 (1): 1-14.
- 毛景文. 1997. 超大型钨多金属矿床成矿特殊性——以湖南柿竹园矿床为例[J]. 地质科学, 32(3): 351-363.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 陈毓川. 2007. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景[J]. 岩石学报, 23 (10): 2329-2338.
- 毛景文, 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.
- 饶家荣, 王纪恒, 曹一中. 1993. 湖南深部构造[J]. 湖南地质, 12: 351-362.
- 王昌烈, 罗仁徽, 胥友志, 孙一虹, 谢慈国, 张重铭, 徐文光, 任湘眉. 1987. 柿竹园钨多金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社. 29-48.
- 徐培苍, 李如璧, 王永强, 王志海, 李月琴. 1996. 地学中的拉曼光谱[M]. 陕西: 陕西科学技术出版社. 102 页.
- 杨昌明. 1986. 蛇形坪铅锌矿成因初探[J]. 地质与勘探, 12: 19-27.
- 张怡军. 1998. 郴州枞树板大型铅锌银矿床成矿规律讨论[J]. 湖南地质, 17(2): 113-118.
- Baker T, Achterberg E V, Ryan C G and Lang J R. 2004. Composition and evolution of ore fluids in a magmatic-hydrothermal skarn deposit [J]. *Geology*, 32(2): 117-120.
- Brock K J. 1972. Genesis of Garnet Hill skarn, Calaveras County, California [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 83: 3391-3404.
- Bussell M A, Alpers C N, Petersen U, Shepherd T J, Bermudez C and Baxter A N. 1990. The Ag-Mn-Pb-Zn vein, replacement, and skarn deposits of Uchucchacua, Peru: Studies of structure, mineralogy, metal zoning, Sr isotopes, and fluid inclusions [J]. *Econ. Geol.*, 85: 1348-1383.
- Fournier R O. 1987. Conceptual models of brine evolution in magmatic-hydrothermal system [R]. U. S. Geological Survey Professional Paper, 1487-1506.
- Fournier R O. 1999. Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment [J]. *Econ. Geol.*, 94: 1193-1211.
- Gunnesch K A, Angel C T D, Castro C C and Saez J. 1994. The Cu-

- (Au) skarn and Ag-Pb-Zn vein deposits of La Paz, northeastern Mexico: Mineralogical paragenetic, and fluid inclusion characteristics [ J ]. *Econ. Geol.*, 89: 1640-1650.
- Guy B. 1993. Banded skarns, example of geochemical dissipative structure [ J/OL ]. In Hal-00523251, 1-20.
- Jiang Y H, Jiang S Y, Zhao K D and Ling H F. 2006. Petrogenesis of Late Jurassic Qianlishan granites and mafic dykes, Southeast China: Implications for a back-arc extension setting [ J ]. *Geological Magazine*, 143(4): 457-474.
- Li X H, Liu D Y, Sun M, Li W X, Liang X R and Liu Y. 2004. Precise Sm-Nd and U-Pb isotopic dating of the supergiant Shizhuyuan polymetallic deposit and its host granite, SE China [ J ]. *Geological Magazine*, 141(2): 225-231.
- Lu C S, Reed M H and Misra K C. 1992. Zinc-lead skarn mineralization at Tin Creek, Alaska: Fluid inclusions and skarn-forming reactions [ J ]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56(1): 109-119.
- Lu H Z, Liu Y M, Wang C L, Xu Y Z and Li H Q. 2003. Mineralization and fluid inclusion study of the Shizhuyuan W-Sn-Bi-Mo-F skarn deposit, Hunan Province, China [ J ]. *Econ. Geol.*, 98: 955-974.
- Mao J W and Li H Y. 1995. Evolution of the Qianlishan granite stock and its relation to the Shizhuyuan polymetallic tungsten deposit [ J ]. *International Geology Review*, 37(1): 63-80.
- Megaw P K M, Ruiz J and Titley S R. 1988. High-temperature, carbonate-hosted Ag-Pb-Zn (Cu) deposits of northern Mexico [ J ]. *Econ. Geol.*, 83: 1856-1885.
- Megaw P K M. 1998. Carbonate-hosted Pb-Zn-Ag-Cu-Au replacement deposits: An exploration perspective [ A ]. In: lentz D R, ed. *Mineralized intrusion-related skarn systems* [ C ]. *Mineralogical Association of Canada Short Course Notes*, 26: 337-357.
- Meinert L D. 1987. Skarn zonation and fluid evolution in the Groundhog Mine, Central mining district, New Mexico [ J ]. *Econ. Geol.*, 82: 523-545.
- Meinert L D, Hefton K K, Mayes D and Tasiran I. 1997. Geology, zonation, and fluid evolution of the Big Gossan Cu-Au skarn deposit, Ertsberg District, Irian Jaya [ J ]. *Econ. Geol.*, 92: 509-534.
- Meinert L D, Hedenquist J W, Satoh H and Matsuhisa Y. 2003. Formation of anhydrous and hydrous skarn in Cu-Au ore deposits by magmatic fluid [ J ]. *Econ. Geol.*, 98: 147-156.
- Samson I M, Williams-Jones A E, Ault K M, Gagnon J E and Fryer B J. 2008. Source of fluids forming distal Zn-Pb-Ag skarns: Evidence from laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry analysis of fluid inclusions from El Mochito, Honduras [ J ]. *Geology*, 36(12): 947-950.

<http://www.kcdz.com/>