

安徽姚家岭锌金多金属矿床地质特征与浅部 矿化流体包裹体研究*

文春华^{1,2}, 徐文艺^{3*}, 钟宏¹, 吕庆田³, 杨竹森³, 田世洪³, 刘英超³

(1 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要 姚家岭锌金多金属矿床是铜陵矿集区近年来新发现的一处大型矿床。该矿床可分为2个成矿期, 早期为铜(金、银)矿化, 晚期为锌(金银)多金属矿化, 以后者为主。多金属硫化物期以大量发育多种不规则脉状和角砾状矿石为特征, 发育硅化、绿泥石化和高岭土化, 矿化受张性构造控制, 矿物组合为富铁闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、石英(包括玉髓和蛋白石)、方解石、萤石、高岭石、绿泥石等, 成矿流体发生多期脉动。流体包裹体显微测温显示成矿流体为中低温(167~404℃, 众值区间 240~280℃)、中低盐度($w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 0.66%~13.62%, 众值区间 2%~4%)流体, 均一压力主体<11 MPa, 以静水压估算成矿深度在潜水面以下1 km左右或略深, 蚀变矿化和流体包裹体研究揭示姚家岭矿床以多金属硫化物期矿化为主, 应为浅成热液型锌(金银)多金属矿床。

关键词 地球化学 浅成热液矿床 流体包裹体 姚家岭 安徽

中图分类号: P618.43; P618.51

文献标志码: A

Geological characteristics and fluid inclusion studies of shallow mineralization in Yaojialing Zn-Au-polymetallic deposit, Anhui Province

WEN ChunHua^{1,2}, XU WenYi³, ZHONG Hong¹, LÜ QingTian³, YANG ZhuSen³,
TIAN ShiHong³ and LIU YingChao³

(1 State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China; 2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

The Yaojialing Zn-Au-polymetallic deposit is a newly-discovered large-size ore deposit in the Tongling ore concentration area. Two mineralization epochs are recognized. The early is characterized by Cu(Au)-mineralization and the late by Zn (Au-Ag) polymetallic mineralization, with the latter being dominant in Yaojialing area. The polymetallic sulfide mineralization is characterized by a variety of irregular veins and brecciated ores associated with silicification, chloritization and kaolinization, and controlled by extensional structure. The most common minerals in the second epoch are sphalerite, pyrite, chalcopyrite, galena, quartz (chalcedony and opal), calcite, fluorite, kaolinite, chlorite etc. Multi-stage fluid pulses occurred in the late epoch. The homogenization tempe-

* 本文得到国土资源部公益性行业科研专项(编号: 201011047、201011051)和国家科技支撑计划课题(2006BAB01B01、2006BAB01B06)项目资助

第一作者简介 文春华, 男, 1982年生, 博士研究生, 矿床地球化学专业。

**** 通讯作者** 徐文艺, 男, 研究员。Email: xu-wenyi@163.com

收稿日期 2011-02-28; **改回日期** 2011-04-27。张绮玲编辑。

temperatures range from 167°C to 404°C with a peak of 240°C to 280°C and the salinities $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ range from 0.66% to 13.62%, with a mode around 2% to 4%. The main homogenization pressure is lower than 11 MPa. Mineralizing depth, estimated by hydrostatic pressure, is about or more than 1 km under the paleo-water table. A study of alteration, mineralization and fluid inclusion reveals that the Yaojialing ore deposit is dominated by epithermal-type Zn(Au-Ag) polymetallic ores.

Key words: geochemistry, epithermal deposit, fluid inclusion, Yaojialing of Anhui

姚家岭铜-铅-锌矿床位于安徽省南陵县境内,西距铜陵市约 40 km(图 1)。上世纪 80 年代,在姚家岭地区寻找矽卡岩型和层控型铜矿,没有大的突破。2002 年华东冶金地质勘查局 812 地质队开始在姚家岭地区实施普查勘探,截至 2010 年累计获得 333 类资源量: 铜 117.41 万吨,平均品位 3.64% 金 32 吨,

平均品位 5.02 g/t; 铅 20.42 万吨,平均品位 2.09% 铜 13.3 万吨,平均品位 0.89%; 银 382 吨,平均品位 132.8 g/t,证实其为一座大型锌金矿和中型的铅铜银矿床^①。姚家岭矿床的发现,是铜陵矿集区近年来找矿勘探上的一项重大突破,引起了国内地质学家的密切关注。

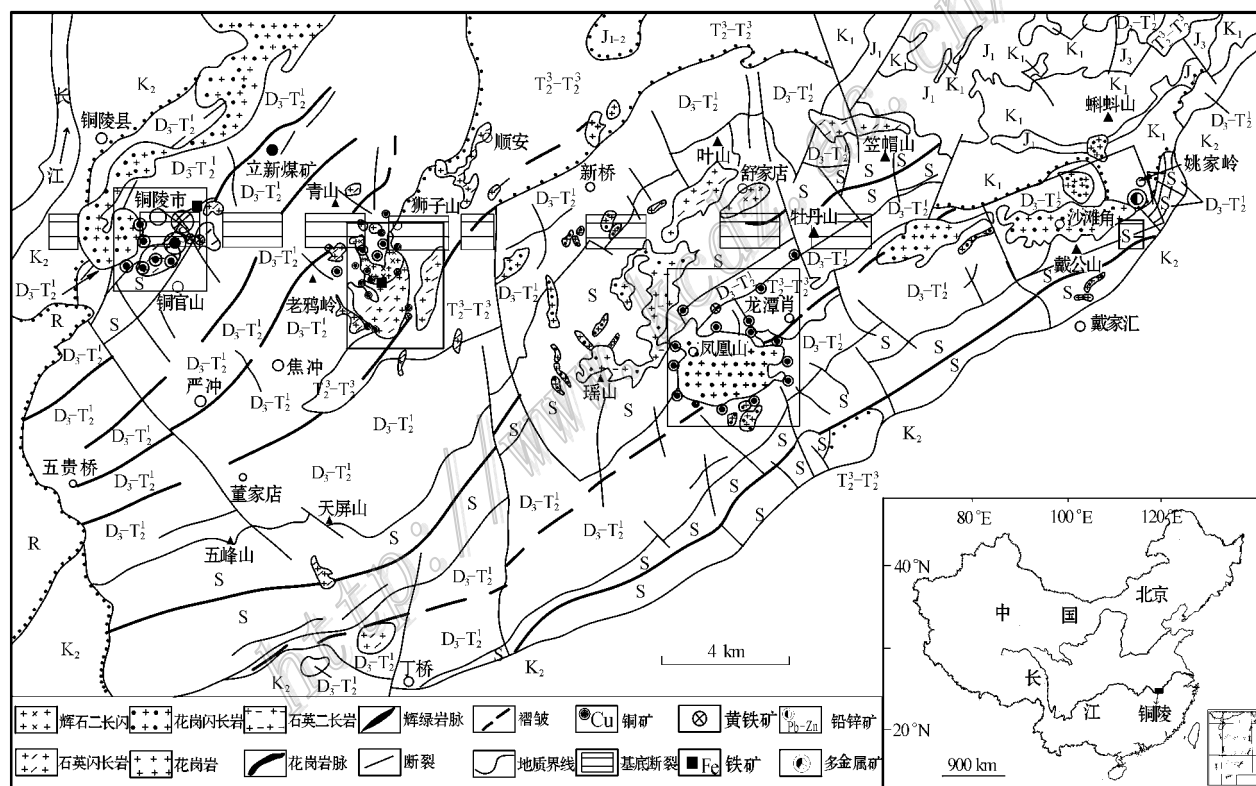


图 1 铜陵矿集区地质和矿产分布略图(据吴才来等,2003)

R—第三系; K₂—晚白垩世; K₁—早白垩世; J₃—晚侏罗世; J₁₋₂—早中侏罗世; T₂-T₃—中三叠世; D₃-T₂—晚泥盆世—早中三叠世; S—志留系

Fig. 1 Geological sketch map showing distribution of ore deposits in the Tongling ore concentration area (after Wu et al., 2003)
R—Tertiary; K₂—Upper Cretaceous, K₁—Lower Cretaceous; J₃—Upper Jurassic; J₁₋₂—Middle and Lower Jurassic; T₂-T₃—Middle Triassic;
D₃-T₂—Upper Devonian-Middle and Lower Triassic; S—Silurian

① 据中国有色网 2010 年 8 月 10 日(<http://paper.cnmm.com.cn/Content.aspx?id=65569&q=2976&v=1>)和《中国金属通报》2011 年第 4 期(<http://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTOTAL-JSTB201104007.htm>)报导。

姚家岭铜-铅-锌矿床处于长江中下游铁铜多金属成矿带铜陵矿集区的东段边缘沙滩角矿田内,在大地构造位置上处于扬子陆块北缘、下扬子拗陷带中部之铜陵隆起与繁昌拗陷的交接地带(图1)。铜陵矿集区是中国重要的铜多金属资源基地之一,区内内生金属矿床集中分布在铜陵-南陵隐伏深断裂控制的南北宽不到10 km的东西向岩浆岩带内(图1),由西向东构成了铜官山、狮子山、凤凰山、沙滩角等矿田,成矿元素以铜、硫、金为主,铁、铅、锌、银、钼次之,矿床类型主要是矽卡岩型和复合层状硫化物型,及少量斑岩型(如冬瓜山)和浅成热液型(如包村金矿和鸡冠石银矿)。这些矿床的形成或早或晚均与中生代(156~131 Ma)中酸性岩浆活动有关(常印佛等,1983;翟裕生等,1992a;1992b;邓晋福等,1992;吴言昌,1992;唐永成等,1998;吴才来等,2008),吴才来等(2003)将区内侵入岩划分为与金矿化关系密切的“橄榄安粗岩系列”(包括辉石二长闪长岩、二长闪长岩和石英二长岩)和与铜矿化关系密切的高钾钙碱性系列(由闪长岩、石英二长闪长岩、花岗闪长岩和花岗岩脉组成),区内岩浆岩主体属于后者。

沙滩角矿田是目前铜陵矿集区中找矿勘查程度较低的矿田,环绕沙滩角花岗闪长岩体已发现有多铜(钼、金、银)矿床(点),主要属于矽卡岩型,规模都很小。姚家岭矿床是一个以锌为主的多金属矿床,蒋其胜等(2005,2008)认为该矿床与江西冷水坑大型斑岩型铅锌矿床类似,矿床成因上属于与燕山晚期隐爆斑岩体侵入活动相关的浅成热液充填交代-斑岩型矿床,并认为其发现在成矿模式上是对铜陵矿集区矽卡岩型和层控叠加改造型两种传统模式的突破,不仅对于铜陵矿集区北缘与繁昌火山岩盆地交接地带,而且对于长江中下游成矿带的地质找矿和科学研究都有重要的启迪和指导意义。姚家岭矿床在成矿元素和成矿类型上都有别于铜陵矿集区的其他矿床。本文在野外工作的基础上,对该矿床矿石和脉石矿物中的流体包裹体开展了研究,以期探讨姚家岭矿床的成因提供基础科学依据。

1 矿区地质

姚家岭矿区出露地层齐全,从志留系到白垩系均有分布(图2),构成戴公山背斜东北端北西翼。区

内构造活动强烈,主要断层有 F_1 、 F_2 和 F_3 ,矿区岩石(包括地层和岩浆岩)强烈破碎,角砾岩广泛发育。

区内岩浆岩有沙滩角花岗闪长岩、小青塘和青山花岗闪长斑岩以及花岗斑岩脉。沙滩角岩体产于矿区西部,蚀变强,在岩体周边形成数处小型矽卡岩型铜矿,并伴生金、银等,其中塌里牧蚀变黑云母 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 坪年龄为 (133.6 ± 0.6) Ma,辉钼矿 Re-Os 年龄为 (138.6 ± 0.2) Ma(曾普胜等,2004)。小青塘斑岩体产于矿区中部,呈东西向延伸,北缓南陡,侵入于戴公山背斜北西翼地层中,超覆在栖霞组(P_1q)灰岩之上(图2),钻孔揭示岩体中含有大量石炭系—二叠系灰岩捕虏体(图3),该岩体是区内含矿岩体,蚀变强烈,并普遍发育角砾状构造,角砾成分复杂,除斑岩角砾外,还卷入有大量灰岩、硅质岩和碎屑岩角砾,该岩体时代有待厘定。青山花岗闪长斑岩产于矿区东北边部,目前尚未见矿化显示。

2 蚀变矿化特征

2.1 矿化特征

姚家岭矿区矿化带长约1600 m,宽500~800 m(图3),共圈出锌铅(金银)矿体70个,铜金矿体18个,硫矿体7个,金矿体1个^①。各类矿体走向近东西,呈薄透镜状雁行排列,赋存于角砾状花岗闪长斑岩、灰岩捕虏体的上、下接触带以及层间断裂破碎带中。主要矿石矿物有黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、赤铁矿,其次有黝铜矿、车轮矿、自然金、辉银矿、深红银矿等;主要脉石矿物为石英(包括玉髓和蛋白石)、萤石、方解石、铁白云石、钾长石、绢云母、绿泥石和高岭石,偶见重晶石和石墨。矿石构造有脉状、角砾状、团块状、块状(局部)和(稀疏)浸染状,以脉状为主。

脉状矿石中脉体多不规则,脉宽变化大,从微细脉(<1 mm)到几十厘米宽的粗脉都非常发育。由脉的两壁向中心,时常可见矿物组成对称分布,脉中心多为方解石,有时为蛋白石,两侧为硫化物、萤石和少量石英。脉体内经常夹杂角砾状黄铁矿、石英、粗晶方解石以及灰岩碎块,黄铁矿角砾呈不规则棱角状单晶,大小不一,内部碎裂;石英角砾常发育次生加大边。脉体总体上显示出张性裂隙充填的特征。

① 据中国有色网 2010 年 8 月 10 日报导(<http://paper.cnmm.com.cn/Content.aspx?id=65569&q=2976&v=1>)。

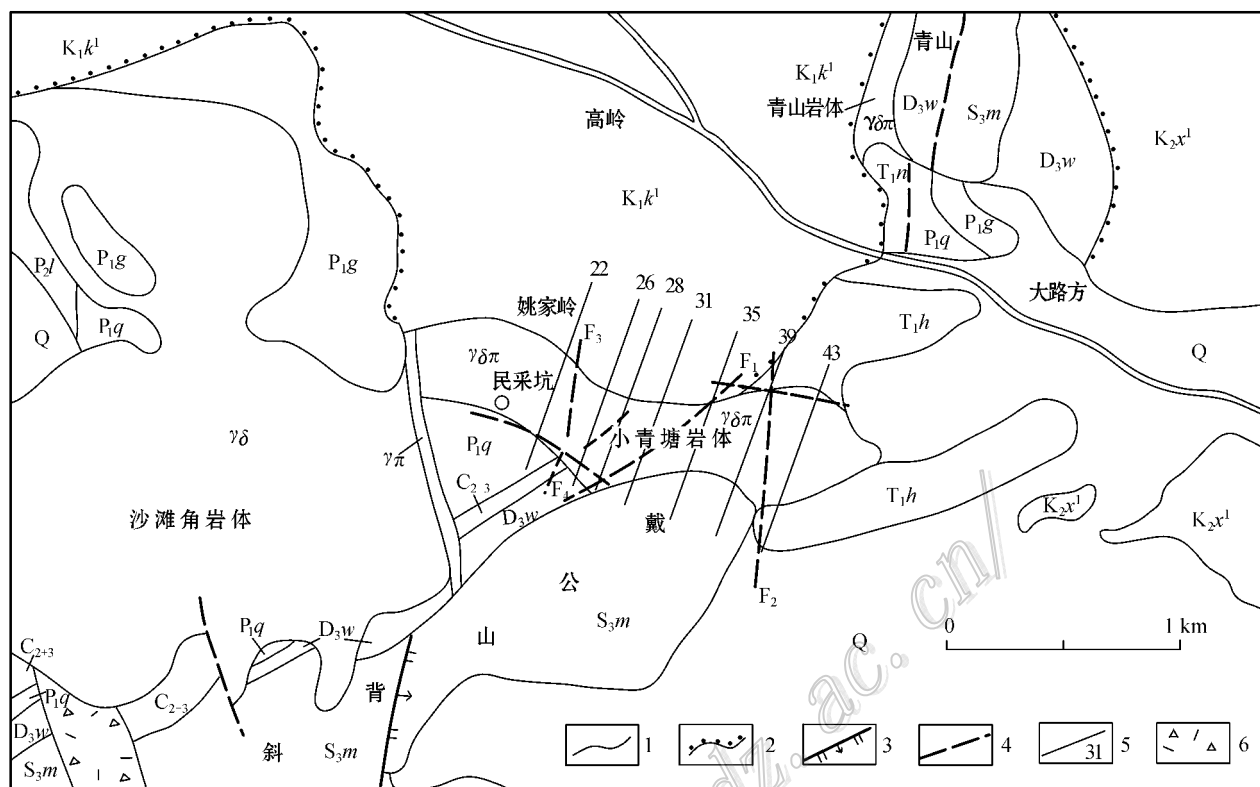


图 2 姚家岭铜铅锌矿区地质图(据蒋其胜等,2008)

1—地质界线;2—不整合地质界线;3—正断层;4—推断断层;5—勘探线位置及编号;6—破碎带;Q—第四系; K_2x^1 —白垩系上统宣南组下段; K_1k^1 —白垩系下统蝌蚪山组下段; T_1n —三叠系下统南陵湖组; T_1h —三叠系下统和龙山组; P_2l —二叠系上统龙潭组; P_1g —二叠系下统孤峰组; P_1q —二叠系下统栖霞组; C_{2+3} —石炭系中上统; D_3w —泥盆系上统五通组; S_3m —志留系上统茅山组; $\gamma\delta$ —花岗闪长岩; $\gamma\delta\pi$ —花岗闪长斑岩; $\gamma\pi$ —花岗岩

Fig. 2 Geological map of the Yaojialing Cu-Pb-Zn ore district (after Jiang et al., 2008)

1—Geological boundary; 2—Unconformity; 3—Normal fault; 4—Inferred fault; 5—Exploration line and its serial number; 6—Fracture zone; Q—Quaternary; K_2x^1 —Lower Member of Upper Cretaceous Xuannan Formation; K_1k^1 —Lower Member of Lower Cretaceous Kedoushan Formation; T_1n —Lower Triassic Nanlinghu Formation; T_1h —Lower Triassic Helongshan Formation; P_2l —Upper Permian Longtan Formation; P_1g —Lower Permian Gufeng Formation; P_1q —Lower Permian Qixia Formation; C_{2+3} —Middle—Upper Carboniferous; D_3w —Upper Devonian Wutong Formation; S_3m —Upper Silurian Maoshan Formation; $\gamma\delta$ —Granodiorite; $\gamma\delta\pi$ —Granodiorite porphyry; $\gamma\pi$ —Granite porphyry

角砾状矿石(图 4A)中,角砾成分复杂,主体为蚀变斑岩和灰岩角砾,夹有黑色燧石、砂岩、大理岩、粗晶方解石以及白色微晶硅质角砾,有时可见团块状黄铁矿和赤铁矿角砾,角砾多为棱角状或不规则状,大小 1~10 cm。胶结物主要是硫化物、碳酸盐、萤石、石英和绿泥石,有时可见石墨。对比角砾状矿石和脉状矿石的特征,推测两者在成因上相似,都是含矿热液沿张性构造破碎带或裂隙带充填形成。

块状和团块状矿石发育在局部,主要分布在岩体与灰岩接触带以及破碎带中,包括含少量方解石、石英和黄铜矿的块状黄铁矿矿石和含少量黄铁矿、方铅矿和方解石的粗粒黑色富铁闪锌矿矿石,有时

可见到团块状胶状黄铁矿。

(稀疏)浸染状矿石主要发育在蚀变斑岩体内,硫化物主要是黄铁矿,少量黄铜矿,伴生(石英-方解石)-黄铁矿细脉。在浅部还可见到稀疏浸染状闪锌矿,伴有微细闪锌矿脉和萤石-闪锌矿脉,偶见星点状方铅矿。总体上,浸染状矿化在姚家岭矿区较为次要,目前发现的浸染状矿化最好的地段 Cu 平均品位只有 0.15% (蒋其胜等,2008)。

2.2 蚀变特征

矿区岩石蚀变强烈,蚀变类型多样。花岗闪长斑岩体发育钾长石化、绢英岩化和高岭土化。总体上钾长石化较强,但常常因后期蚀变叠加而被改造

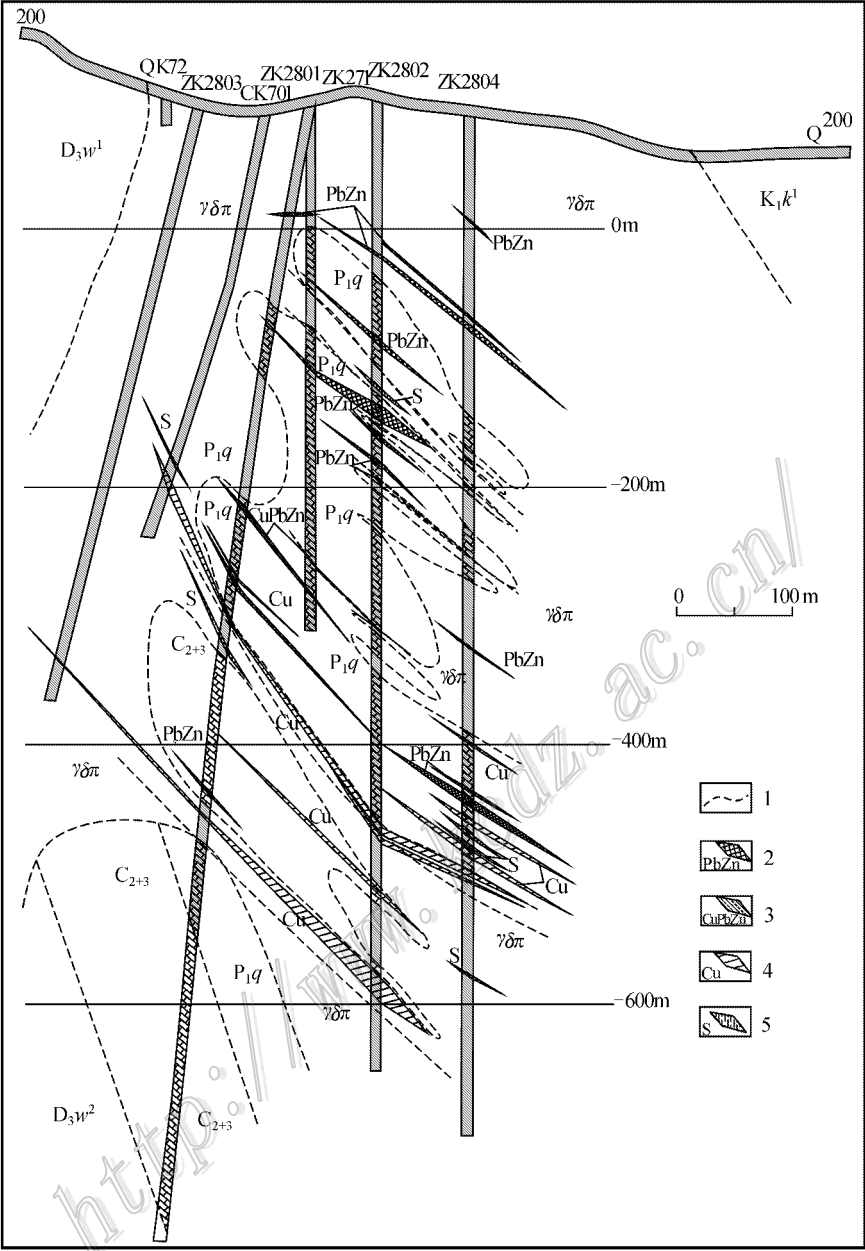


图 3 姚家岭矿床 28 线勘探剖面图(据蒋其胜等,2008)

Q—第四系； K_1k^1 —白垩系下统蝌蚪山组下段； P_1q —二叠系下统栖霞组； C_{2+3} —石炭系中上统； D_3w^2 —泥盆系上统五通组上段； D_3w^1 —泥盆系上统五通组下段； $\gamma\delta\pi$ —花岗闪长斑岩；1—地质界线及裂隙；2—铅锌矿体；3—铜铅锌矿体；4—铜矿体；5—金硫矿体

Fig. 3 Geological section along No. 28 exploration line of the Yaojialing ore deposit (after Jiang et al. , 2008)

Q—Quaternary； K_1k^1 —Lower Member of Lower Cretaceous Kedoushan Formation； P_1q —Lower Permian Qixia Formation； C_{2+3} —Middle-Upper Carboniferous； D_3w^2 —Upper Member of Upper Devonian Wutong Formation； D_3w^1 —Lower Member of Upper Devonian Wutong Formation； $\gamma\delta\pi$ —Granodiorite porphyry；1—Geological boundary and fracture；2—Lead-zinc ore body；3—Copper-lead-zinc ore body；4—Copper ore body；5—Gold-sulfur ore body

分割成破布状或团块状(图 4B)。绢英岩化蚀变相对较弱,镜下观察显示,主要表现为微细粒绢云母和少量石英呈孤立团斑状残留于弥漫状微细蚀变高岭土或碳酸盐之中(图 5A),有时伴有浸染状硫化物矿

化 绢英岩化蚀变同样遭受了后期蚀变的强烈叠加改造。高岭土化是矿区最为强烈的蚀变类型之一,广泛发育,并叠加在早期的钾化和绢英岩化之上。绿泥石化主要发育在裂隙脉的两壁或破碎带中,时

常伴有赤铁矿化,并改造早期的钾长石化(图 4B)。硅化主要发育在碎屑岩和灰岩地层中,另外在破碎带中也经常可以见到不规则状玉髓团块以及硅化蚀变角砾,与硫化物矿化密切伴生,硅化在晚期演变成细脉状蛋白石化,并伴有少量闪锌矿矿化。碳酸盐化包括方解石化和铁白云石化,也是矿区最为强烈的蚀变类型之一,或呈弥漫状微细粒碳酸盐交代斑岩体,叠加在钾化和绢英岩化之上,或呈各种脉状穿插交代斑岩体和围岩地层,与脉状和角砾状硫化物矿化密切伴生。

除上述蚀变类型外,矿区不同地段碳酸盐地层都有不同程度的大理岩化,局部碎屑岩出现角岩化,另外,蒋其胜等(2008)还报道有矽卡岩化并伴有铜金矿化。

总之,姚家岭矿区最为强烈的蚀变类型是钾长石化、高岭土化和碳酸盐化,而与大量硫化物矿化密切相关的是硅化、高岭土化和碳酸盐化。虽然绢英

岩化也伴有浸染状硫化物矿化,但蚀变矿化较弱。

2.3 成矿期与成矿阶段

综观姚家岭矿区的蚀变矿化特征,根据热液矿物的共生组合和空间生长关系,初步将姚家岭矿床的热液成矿过程从早到晚划分为 2 个成矿期和 7 个成矿阶段(表 1)。

I Cu(Au、Zn)成矿期 以发育钾长石化和绢英岩化蚀变并伴有微细脉状和(稀疏)浸染状黄铁矿、黄铜矿以及少量闪锌矿矿化为特征,Au 与浸染状黄铁矿、黄铜矿伴生(蒋其胜等,2008) 同时灰岩和碎屑岩捕虏体相应发生大理岩化和角岩化,在斑岩与灰岩接触带局部出现矽卡岩化 此外,在该矿化期的晚阶段还发育碳酸盐化,伴有黄铁矿和黄铜矿矿化,偶见重晶石。总体上,该矿化期可进一步划分为如下 3 个阶段:

- I -1 钾长石化阶段,基本无硫化物矿化;
- I -2 绢英岩化阶段,矿物组合为绢云母-石英-

表 1 姚家岭矿床矿物共生组合及生成顺序表
Table 1 Mineral association of the Yaojialing ore deposit

成矿期 矿化矿物	Cu(Au)成矿期			Zn多金属硫化物成矿期			
	I-1阶段	I-2阶段	I-3阶段	II-1阶段	II-2阶段	II-3阶段	II-4阶段
钾长石							
大理岩化							
绢云母							
石英							
蛋白石							
绿泥石							
高岭石							
萤石							
方解石							
黄铁矿							
黄铜矿							
闪锌矿							
方铅矿							

黄铁矿-黄铜矿-闪锌矿;

I-3 碳酸盐阶段,矿物组合为方解石-铁白云石-重晶石-黄铁矿-黄铜矿(图4C)。

该矿化期的蚀变矿化特征类似于斑岩、矽卡岩型矿床,可能主要与岩浆期后热液活动有关,但该期矿化总体较弱。另外,该矿化期蚀变矿化产物时常以角砾形式出现(图4A),表明受到了后期构造与热液活动的强烈改造。

II 多金属硫化物期:以大量发育脉状和角砾状以黄铁矿和闪锌矿为主的硫化物矿化为特征,局部出现团块状或块状多金属硫化物;黄铜矿伴生 Au、方铅矿伴生 Ag(蒋其胜等,2008);伴有硅化、绿泥石化和广泛的高岭土化、碳酸盐化,在充填脉体和角砾岩胶结物中大量出现方解石和萤石。根据脉体穿插关系,该成矿期可进一步划分为如下4个阶段:

II-1 闪锌矿阶段,以大量发育黑色粗晶富铁闪锌矿为特征,矿物组成以闪锌矿和黄铁矿为主,含少量黄铜矿、方铅矿、萤石、方解石和石英,多发育在粗大脉体两壁,局部呈块状或团块状,为后期充填脉体所穿插(图4C);

II-2 多金属硫化物阶段,矿物组成以黄铁矿、闪锌矿、萤石、方解石、石英为主,含少量的黄铜矿、方铅矿以及硫盐矿物,伴生金、银矿化,以充填裂隙脉体或角砾胶结物形式产出(图4C、D)。镜下观察显示,该阶段黄铁矿粗粒自形,但晶体常出现碎裂,时常可见同一脉体中黄铜矿、方铅矿、闪锌矿充填在黄铁矿晶间或碎裂黄铁矿的裂隙中(图5B),显示黄铁矿形成相对较早,而且该成矿阶段处于不稳定的构造环境。

II-3 方解石-闪锌矿阶段,广泛发育方解石脉,穿插在II-2阶段的多金属硫化物中(图4D),并使围岩碳酸盐化。矿物组成以方解石为主体,其次为闪锌矿,常见闪锌矿呈微细线状分布于方解石脉中,另外,在方解石脉中还可见到少量细粒黄铁矿和黄铜矿。

II-4 蛋白石-闪锌矿阶段,呈细脉状产出,闪锌矿常出现在脉的两侧呈对称分布;总体上该阶段脉体分布不广。

3 流体包裹体研究

3.1 流体包裹体岩相学

本文主要对姚家岭矿床 I-3 阶段的方解石和重晶石、II-2 阶段的石英、萤石、闪锌矿(棕色)和方解

石以及 II-3 阶段的萤石和方解石开展了流体包裹体测试工作,其他阶段由于难以找到适合于流体包裹体测试的样品而未开展工作。测试样品采自姚家岭铜铅锌矿床的民采坑道中(坐标:20614147, 3423769)。

镜下观察显示,II-2 和 II-3 阶段萤石中原生和次生流体包裹体都非常发育,各阶段方解石中的流体包裹体次之,闪锌矿、石英和重晶石中流体包裹体相对较少。石英、方解石和萤石中原生包裹体呈孤立分布状,以椭圆形为主,部分长条形或不规则状,大小多在 $4 \sim 21 \mu\text{m}$,萤石中个别可达 $32 \mu\text{m}$ 。II-2 阶段闪锌矿部分呈棕色、半透明,其中可见到少量流体包裹体,均为原生,呈星散状分布,多为椭圆状,大小在 $6 \sim 19 \mu\text{m}$ 。这些主矿物中原生包裹体均为气、液(L-V)两相包裹体(图6a~6f),室温下气相分数变化大,绝大多数气相体积分数 $< 30\%$,个别可达到 40% ,但加热后都均一到液相。

3.2 激光拉曼探针分析

为了解流体包裹体的成分特征,在中国地质科学院矿产资源研究所成矿流体实验室进行了激光拉曼探针(LRM)分析,测试仪器为英国 Renishaw-2000 型显微共焦激光拉曼光谱仪,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 $1 \sim 2 \text{ cm}^{-1}$ 。拉曼探针分析显示(图7a~7d),萤石、石英、闪锌矿、方解石中的 L-V 型流体包裹体均为简单的盐-水体系,气相中除 H_2O 外,未检测到其他气体。

3.3 流体包裹体显微测温

姚家岭矿床流体包裹体显微测温在中国地质科学院矿产资源研究所实验室完成,测试仪器为 Linkam THMSG 600 型显微冷热台,温度范围 $-196 \sim +600^\circ\text{C}$, $\leq 30^\circ\text{C}$ 时测试精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, $> 30^\circ\text{C}$ 时测试精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。测试结果列于表2,其中所有包裹体加热后都均一到液相,包裹体盐度、密度和均一压力估算均采用 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系、由 FLINCOR 软件(Brown,1989;Brown et al.,1989)计算得到。

I-3 阶段:对该阶段残留于蚀变斑岩中的不规则脉状和团块状方解石及伴生细粒重晶石获得了少量流体测温数据(表2),结果显示,该阶段除1个包裹体均一温度为 189°C 外,其他流体包裹体均一温度分布在 $301 \sim 361^\circ\text{C}$ 。盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 范围为 $4.03\% \sim 9.08\%$,集中在 $4.0\% \sim 6.0\%$;密度范围 $0.66 \sim 0.92 \text{ g/cm}^3$,集中在 $0.6 \sim 0.8 \text{ g/cm}^3$;均一压力范围 $0.6 \sim 17.9 \text{ MPa}$,集中在 $1.0 \sim 2.0 \text{ MPa}$ 。

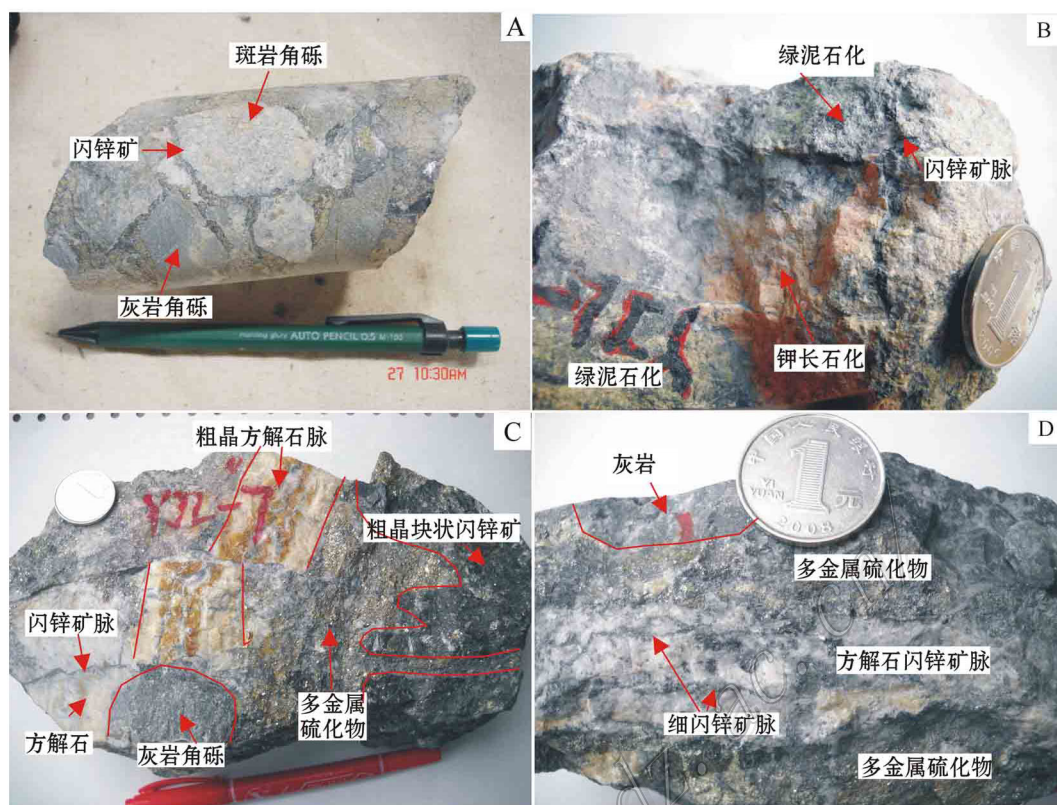


图 4 姚家岭矿床蚀变矿化照片

- A. ZK3903-335m, 角砾状矿石, 角砾有蚀变斑岩、灰岩, 胶结物为闪锌矿、黄铁矿和方解石; B. YJL-17, 绿泥石化叠加改造钾长石化斑岩; C. YJL-7, 块状粗晶闪锌矿(Ⅱ-1 阶段)被石英-方解石-萤石-多金属硫化物(Ⅱ-2 阶段)穿插, 后者包含灰岩和粗晶方解石角砾, 并被晚期闪锌矿脉穿插; D. YJL-6, 穿插于灰岩中的多金属硫化物脉, 脉体中矿物由脉壁向中心呈对称分布

Fig. 4 Alteration and mineralization photographs of the Yaojialing ore deposit

A. ZK3903-335 m, brecciated ore. The grains are mainly altered porphyry and limestone while the cements are usually sphalerite, pyrite and calcite. B. YJL-17. Chloritization stacked and reshaped potash feldspathized porphyry; C. YJL-7. Blocky and coarsely-crystalline grained sphalerite (Ⅱ-1 stage) intercalated with quartz-calcite-fluorite-polymetallic sulfides (Ⅱ-2 stage). The latter include limestone and coarsely-crystalline grained calcite rubble penetrated by late stage sphalerite veins; D. YJL-6. Ore of polymetallic sulfides veins assuming symmetric distribution from vein wall to the center and penetrating limestone

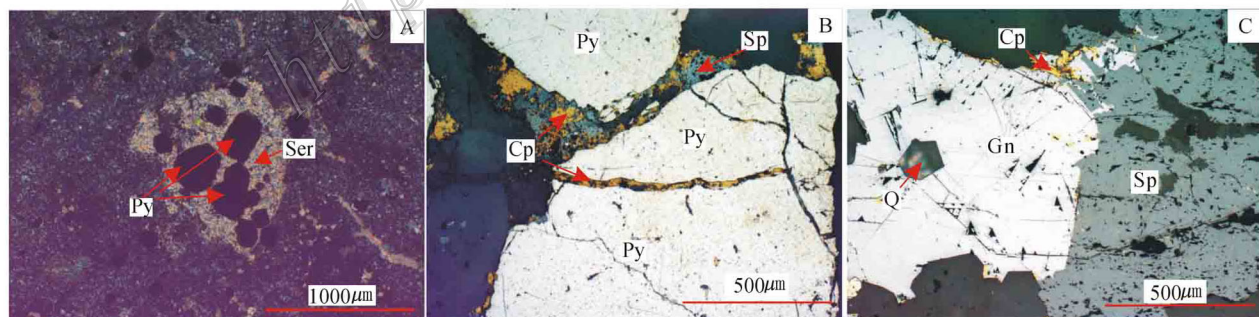


图 5 姚家岭矿床蚀变矿化显微照片

- A. YJL-3, 透射正交偏光, 团块状绢云母-黄铁矿残留于强烈高岭土化蚀变斑岩体中; B. YJL-4, 反射镜, Ⅱ-2 阶段黄铜矿、闪锌矿分布于粗粒黄铁矿裂隙中和晶间; C. YJL-6, 反射镜, 方铅矿、闪锌矿、黄铜矿共生。Py—黄铁矿, Ser—绢云母, Cp—黄铜矿, Sp—闪锌矿, Gn—方铅矿, Q—石英

Fig. 5 Alteration and mineralization micrographs of the Yaojialing ore deposit

A. YJL-3, Photomicrograph showing lumpy sericite-pyrite residue in strongly kaolinized porphyry, crossed nicols; B. YJL-4, Photomicrograph showing chalcopyrite and sphalerite distributed in fissures of coarse pyrite. Reflected light; C. YJL-6, Photomicrograph showing the intergrowth of galena, sphalerite and chalcopyrite. Reflected light. Py—Pyrite, Ser—Sericite, Cp—Chalcopyrite, Sp—Sphalerite, Gn—Galena, Q—Quartz

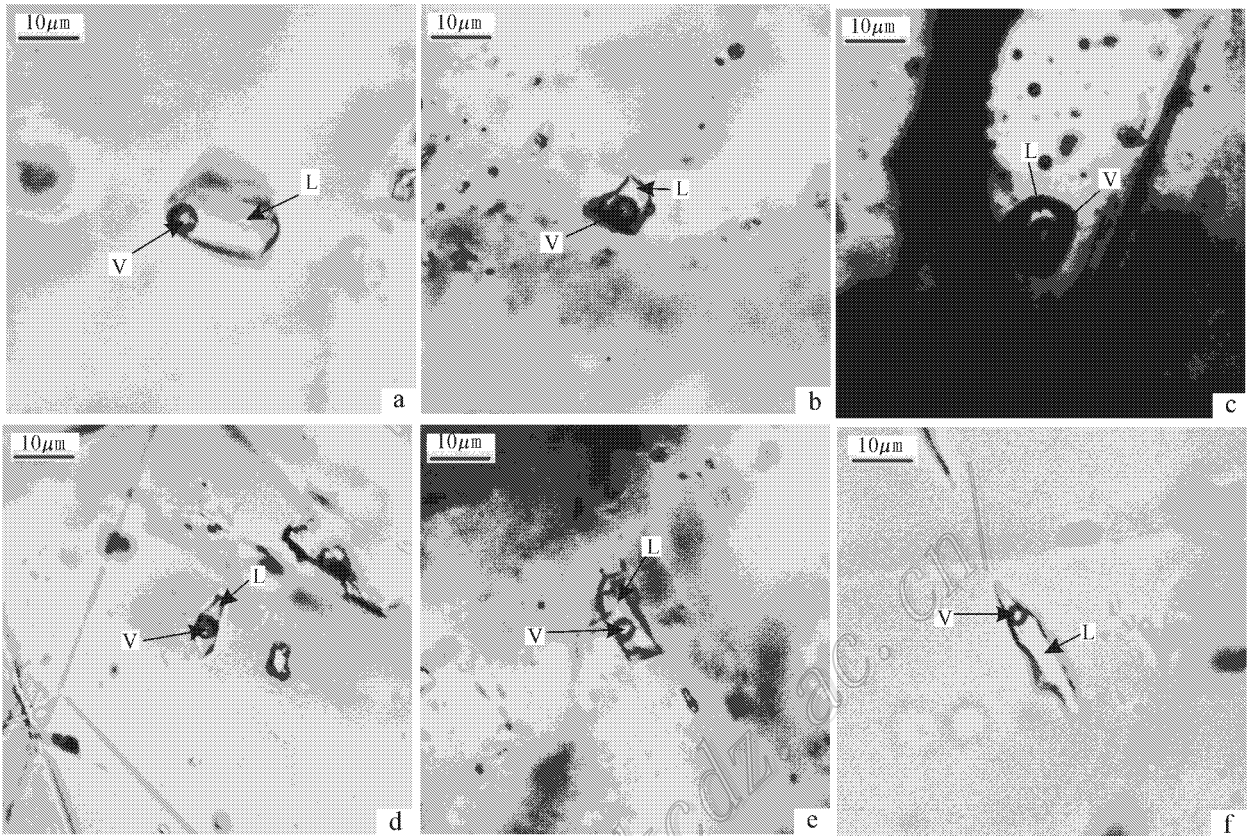


图6 姚家岭矿床不同矿物中流体包裹体

a. YJL-10, 萤石(Ⅱ-2阶段)中L-V型包裹体; b. YJL-5(2), 石英(Ⅱ-2阶段)中L-V型包裹体; c. YJL-6(1), 闪锌矿(Ⅱ-2阶段)中L-V型包裹体; d. YJL-11, 方解石(Ⅱ-2阶段)中L-V型包裹体; e. YJL-6(3), 方解石(Ⅱ-3阶段)中L-V型包裹体; f. YJL-6(2), 萤石(Ⅱ-3阶段)中L-V型包裹体; V—气相; L—液相

Fig. 6 Fluid inclusions in different minerals from the Yaojialing ore deposit

a. YJL-10, Gas-liquid inclusion in fluorite of Ⅱ-2; b. YJL-5(2), Gas-liquid inclusion in quartz of Ⅱ-2; c. YJL-6(1), Gas-liquid inclusion in sphalerite of Ⅱ-2; d. YJL-11, Gas-liquid inclusion in calcite of Ⅱ-2; e. YJL-6(3), Gas-liquid inclusion in calcite of Ⅱ-3; f. YJL-6(2), Gas-liquid inclusion in fluorite of Ⅱ-3; V—Gas; L—Liquid

Ⅱ-2阶段 总体上,该阶段流体包裹体均一温度范围为 $160 \sim 420^{\circ}\text{C}$,集中在 $260 \sim 280^{\circ}\text{C}$ (图8 Ⅱ-2-a) 盐度 $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 范围为 $0 \sim 14\%$,集中在 $2.0\% \sim 4.0\%$ (图8 Ⅱ-2-b);密度范围 $0.49 \sim 0.98 \text{ g/cm}^3$,集中在 $0.8 \sim 0.9 \text{ g/cm}^3$;均一压力范围 $0.6 \sim 28.2 \text{ MPa}$,集中在 $1 \sim 2 \text{ MPa}$ 。

对比该阶段不同主矿物(表2),石英中流体包裹体均一温度相对较高($195 \sim 400^{\circ}\text{C}$ 、众值 $300 \sim 320^{\circ}\text{C}$),其次为方解石($251 \sim 314^{\circ}\text{C}$ 、众值 $300 \sim 314^{\circ}\text{C}$)和闪锌矿($214 \sim 300^{\circ}\text{C}$ 、众值 $280 \sim 300^{\circ}\text{C}$),萤石中包裹体均一温度总体较低(众值 $260 \sim 280^{\circ}\text{C}$),但范围较宽($167 \sim 404^{\circ}\text{C}$)。

对比盐度,闪锌矿和石英中包裹体相对较高(表

2), $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 众值分别为 $10.0\% \sim 12.0\%$ 和 $6.0\% \sim 8.0\%$,方解石和萤石相对较低, $\omega(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 众值均为 $2.0\% \sim 4.0\%$ 。方解石和萤石包裹体盐度相对较低,可能与主矿物结晶过程Ca吸收有关,闪锌矿和石英包裹体溶液中 $[\text{Ca}^{2+}]$ 浓度因而可能相对较高,并导致盐度估计值偏高(Sterner et al., 1988)。

对比包裹体均一压力,石英相对较高(众值 $9 \sim 11 \text{ MPa}$),其次为方解石(众值 $5.0 \sim 7.0 \text{ MPa}$)和闪锌矿(众值 $5 \sim 6 \text{ MPa}$),萤石相对较低(众值 $1 \sim 2 \text{ MPa}$),但萤石中包裹体均一压力范围较宽($0.6 \sim 28.2 \text{ MPa}$)。

通过上述对比,可看出该阶段石英结晶相对较早,闪锌矿和方解石晶出近同步,萤石结晶时间较

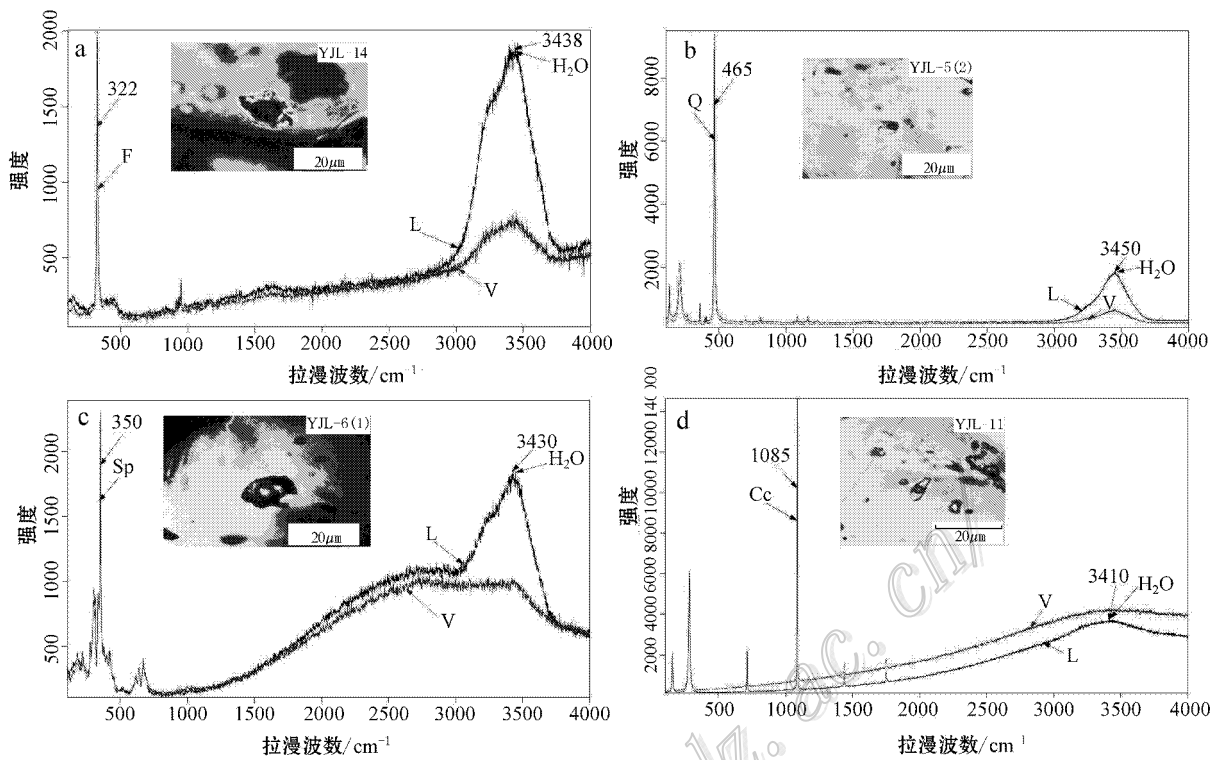


图 7 流体包裹体拉曼分析(V:气相拉曼谱;L:液相拉曼谱)

a:YJL-14, II-2 阶段,萤石;b:YJL-5(2), II-2 阶段,石英;c:YJL-6(1), II-2 阶段,闪锌矿;d:YJL-11, II-2 阶段,方解石
Fig. 7 Raman probe analyses of fluid inclusions from the Yaojialing ore deposit (V:Raman spectrum of gas phase;L:Raman spectrum of liquid phase)
a:YJL-14. Fluorite of II-2 stage;b:YJL-5(2). Quartz of II-2 stage;c:YJL-6(1). Sphalerite of II-2 stage;d:YJL-11. Calcite of II-2 stage

表 2 姚家岭矿床流体包裹体显微测温结果

Table 2 Microthermometric data of fluid inclusions from the Yaojialing ore deposit

阶段	主矿物	类型	个数	t_h 范围/℃ 众值区间	t_m /℃	$\frac{w(\text{NaCl}_{\text{eq}})}{\%}$ 众值区间	密度/g·cm ³	均一压力/MPa
I -3 阶段	方解石 重晶石	L-V	5	189~353	-2.4~-5.9	4.03~9.08	0.69~0.92	0.6~16.3
		L-V	1	361	-3.7	6.01	0.66	17.9
II -2 阶段	石英	L-V	24	$\frac{195\sim 400}{300\sim 320}$	-2.0~-9.7	$\frac{3.28\sim 13.62}{6.0\sim 8.0}$	0.52~0.98	1.1~24.5
	方解石	L-V	5	$\frac{251\sim 314}{300\sim 314}$	-2.0~-3.2	$\frac{3.28\sim 5.17}{2.0\sim 4.0}$	0.74~0.83	3.6~10.0
	闪锌矿	L-V	12	$\frac{214\sim 300}{280\sim 300}$	-1.6~-8.2	$\frac{2.63\sim 11.94}{10.0\sim 12.0}$	0.80~0.93	0.6~8.2
	萤石	L-V	173	$\frac{167\sim 404}{260\sim 280}$	-0.4~-9.7	$\frac{0.66\sim 13.62}{2.0\sim 4.0}$	0.49~0.98	0.6~28.2
II -3 阶段	萤石	L-V	6	$\frac{232\sim 357}{240\sim 260}$	-1.1~-3.0	$\frac{1.82\sim 4.86}{2.0\sim 4.0}$	0.61~0.86	2.5~17.1
	方解石	L-V	15	$\frac{225\sim 330}{240\sim 260}$	-1.1~-9.9	$\frac{1.82\sim 13.84}{10.0\sim 14.0}$	0.66~0.95	2.2~12.3

长,但主体晶出相对较晚。

II-3 阶段 综合该阶段方解石和萤石测温结果(表 2,图 8 II-3a,b),该阶段流体包裹体均一温度范

围为 220 ~ 360℃,集中在 240 ~ 260℃;盐度 $w(\text{NaCl}_{eq})$ 范围为 0 ~ 14%,集中在 2.0% ~ 4.0%;密度范围 0.61 ~ 0.95 g/cm^3 ,集中在 0.8 ~ 0.9 g/cm^3 ;

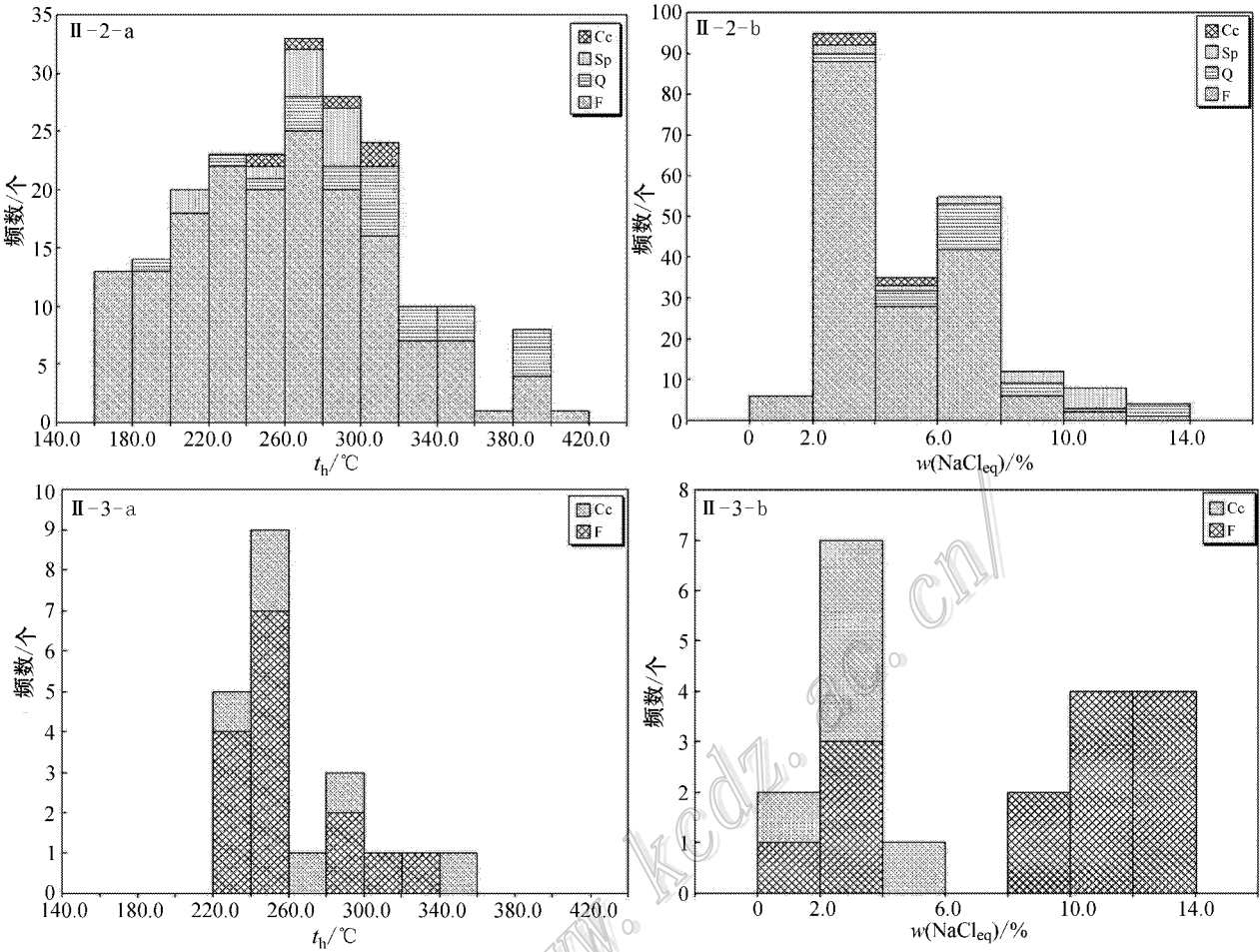


图 8 流体包裹体均一温度、盐度直方图

II-2-a、II-2-b：II-2 阶段包裹体均一温度、盐度直方图；II-3-a、II-3-b：II-3 阶段包裹体均一温度、盐度直方图；Cc—方解石；Sp—闪锌矿；Q—石英；F—萤石

Fig. 8 Histogram of homogenization temperature and salinity of fluid inclusions

II-2-a, II-2-b: Histogram of homogenization temperature and salinity of II-2 stage; II-3-a, II-3-b: Histogram of homogenization temperature and salinity of II-3 stage

均一压力范围 2.2 ~ 17.1 MPa,集中在 2.0 ~ 4.0 MPa。与 II-2 阶段相比(图 8 II-2-a、II-2-b),该阶段包裹体均一温度总体略有降低,盐度相近。

4 讨 论

如前所述,姚家岭矿区的蚀变矿化特征显示存在 2 个成矿期,早期微细脉状和(稀疏)浸染状铜(金)矿化和钾长石化、绢云母化(绢英岩化)以及矽卡岩化、大理岩化,类似于斑岩和矽卡岩型蚀变矿化,可能与岩浆期后热液活动有关,显微测温显示该成矿期晚阶段(I-3 阶段)碳酸盐化温度为 189 ~ 361℃,主体在 301 ~ 361℃,相对较高(图 9)。由于早期矿化总体较弱且受到了后期蚀变矿化强烈改

造,下面对第 II 成矿期——多金属硫化物期进行重点讨论。

多金属硫化物期以大量发育各种类型脉状和角砾状矿石为特征,脉体不规则且由两壁向中心,矿物对称分布,显示矿化受张性构造控制,角砾状矿石的胶结物为热液矿物,暗示成矿过程中可能存在热液爆发,脉体的多阶段性表明成矿过程中成矿流体的多期脉动;流体包裹体显微测温显示成矿流体为中低温(167 ~ 404℃,主体 240 ~ 280℃)、中低盐度〔w(NaCl_{eq}) 0.66% ~ 13.62%,主体 2% ~ 4%〕流体,均一压力主体 < 11 MPa,考虑到张性环境,以静水压估算,成矿深度在潜水面以下 1 km 左右或略深,大量出现富铁闪锌矿、黄铁矿、石英(包括玉髓和蛋白石)、方解石、萤石、高岭石、绿泥石等矿物组合,

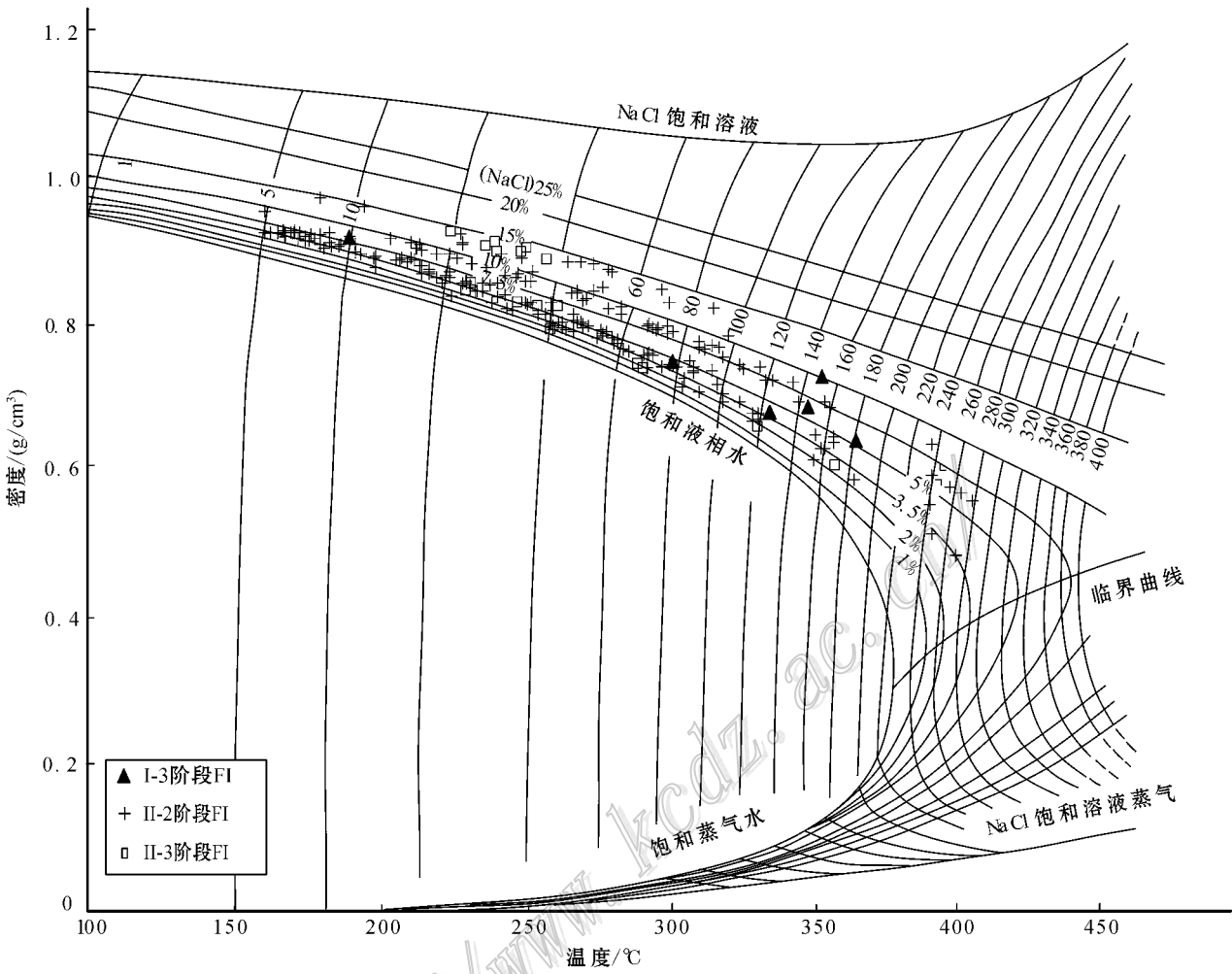


图 9 姚家岭矿床矿床流体包裹体均一温度-密度分布图(底图转引自刘斌等,1999)

Fig. 9 Homogenization temperature-density relationship plot of inclusions of II-2 stage and II-3 stage from the Yaojialing ore deposit (base map after Liu et al., 1999)

揭示成矿处于低硫化态、近中性(pH 值)的低温还原环境中(Giggenbach, 1997; Hedenquist et al., 2000; Einaudi et al., 2003; Sillitoe et al., 2003; Simmons et al., 2005)。上述这些特征与低硫化态浅成热液型金银-贱金属矿床典型特征(Sillitoe et al., 2003; Simmons et al., 2005)基本一致,因此该期成矿应属浅成热液型矿化。该期矿化温度变化范围较宽(图 9 II-2、3),反映成矿流体可能属于被加热的循环地下水(不排除有岩浆水的混合),流体温度的降低是矿石淀积的主导机制。

姚家岭与江西冷水坑铅锌矿相比,二者在成矿流体特征上存在显著差异,冷水坑铅锌矿流体包裹体类型复杂,发育富液相、富气相、含子晶和二氧化碳包裹体,盐度变化大〔 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 0.35% ~

58.41%],出现高盐度流体包裹体(左力艳等, 2009) 而姚家岭主要发育气液两相包裹体(均一到液相),盐度低,拉曼探针未检测到 CO_2 。由此可看出,姚家岭矿床与冷水坑铅锌矿还是存在一定的差异。

姚家岭矿床是一个以锌为主的金银多金属矿床,在成矿元素和成矿类型上都有别于铜陵矿集区其他矿床,可能与其构造位置有关。姚家岭矿床位于铜陵矿集区的最东面,沙滩角岩体的东北角,与繁昌盆地相接。沙滩角矿田以中高温热液蚀变和矽卡岩、斑岩型矿化为特征,繁昌盆地火山岩系中以与碱性火山岩有关的中低温热液蚀变和充填脉型矿化为特征。姚家岭矿床兼具两种蚀变矿化特征,成矿是否与繁昌火山盆地中碱性火山岩有关的中低温热液

流体系统有关?还有待进一步研究。

5 结 论

通过对姚家岭铜铅锌矿床开展流体包裹体研究,结合该矿床地质特征,初步得出以下几点认识:

(1) 姚家岭矿床可划分为2个成矿期,早期铜金锌矿化的晚阶段(I-3)流体包裹体均一温度范围为 $189 \sim 361^{\circ}\text{C}$,盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 范围为 $4.03\% \sim 9.08\%$ 后期多金属成矿期流体包裹体均一温度范围为 $167 \sim 404^{\circ}\text{C}$ (主体 $240 \sim 280^{\circ}\text{C}$),盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 范围为 $0.66\% \sim 13.62\%$ (主体 $2\% \sim 4\%$),均一压力范围为 $0.6 \sim 28.2 \text{ MPa}$ (主体 $< 11 \text{ MPa}$),成矿流体以中低温、中低盐度、低压力为特征。

(2) 根据流体包裹体测温结果和蚀变矿化特征,姚家岭锌金多金属矿区后期形成的大规模多金属矿化体应属于浅成热液型(金银-贱金属矿床。

志 谢 感谢华东冶金地质勘查局812地质队同仁、特别是蒋其胜总在作者野外工作期间给予的热情帮助!感谢中科院地质与地球物理研究所范宏瑞研究员及2位匿名审稿人为本稿的审阅和发表付出了大量的时间和精力!

References

Brown P E. 1989. FLINCOR: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data[J]. *Am. Mineralogist*, 74: 1390-1393.

Brown P E and Lamb W M. 1989. P-V-T properties of fluids in the system $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$: New graphical presentations and implications for fluid inclusion studies[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53: 1209-1221.

Chang Y F and Liu X G. 1983. On stratabound skarn: Example from some deposits of the Lower Yangtze River area in Anhui Province[J]. *Mineral Deposits*, 2(1): 11-20 (in Chinese with English abstract).

Chang Y F, Liu X P and Wu Y C. 1991. The copper-iron belt of the Middle and Lower reaches of the Yangtze River [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-379 (in Chinese).

Deng J F, Ye D L, Zhao H L, Tang D P, et al. 1992. Deep process of the volcanism and the formation of basins in the Lower Yangtze craton[M]. Wuhan: China University Geosciences Publishing House. 1-188 (in Chinese).

Einaudi T M, Hedenquist J W and Inan E. 2003. Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transitions from

porphyry to epithermal environments [J]. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 10: 285-314.

Giggenbach W F. 1997. The origin and evolution of fluids in magmatic-hydrothermal systems [A]. In: Barnes H L, ed. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits* [C]. 3rd ed. New York: John Wiley and Sons. 737-796.

Hedenquist J W, Arribas R A and Gonzalez-Urien E. 2000. Exploration for epithermal gold deposits [A]. In: Hagemann S G, Brown P E, ed. *Gold in 2000* [C]. *Reviews in Economic Geology*, 13: 245-277.

Jiang Q S, Han C S and Huang J M. 2005. Geological features of the copper-lead-zinc deposit in Yaojialing and its genetic discussion [J]. *Geology of Anhui*, 15(4): 265-269 (in Chinese with English abstract).

Jiang Q S, Zhao Z H and Huang J M. 2008. Discovery of the Yaojialing copper-lead-zinc deposit in Nanlin, Anhui, and its significance [J]. *Geology in China*, 35(2): 314-321 (in Chinese with English abstract).

Liu B and Shen K. 1999. *Thermodynamics of fluid inclusions* [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-290 (in Chinese).

Sillitoe R H and Hedenquist J W. 2003. Linkages between volcanotectonic settings, ore fluid compositions and epithermal precious metal deposits [J]. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 10: 315-343.

Simmons S F, White N C and John D A. 2005. Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits [J]. *Econ. Geol.*, 100th anniversary volume. 486-522.

Sterner S M and Hall D L and Bodnar R J. 1988. Synthetic fluid inclusions. V. Solubility relations in the system $\text{NaCl}-\text{KCl}-\text{H}_2\text{O}$ under vapor-saturated conditions [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52: 989-1005.

Tang Y C, Wu Y C, Chu G Z, Xin F M, Wang Y M, Cao F Y and Chang Y F. 1998. Geology of copper gold polymetallic deposits in the along-Changjiang area of Anhui Province [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-351 (in Chinese).

Wu C L, Chen S Y, Shi R D and Hao M Y. 2003. Origin and features of the mesozoic intermediate-acid intrusive in the tongling area, Anhui, China [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(1): 41-48 (in Chinese with English abstract).

Wu C L, Dong S W, Guo H P, Guo X Y, Gao Q M, Liu L G, Chen Q L, Lei M, Wooden J L, Mazadab F K and Mattinson C. 2008. Zircon SHRIMP U-Pb dating of intermediate-acid intrusive rocks from Shizisha, Tongling and the deep processes of magmatism [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1801-1812 (in Chinese with English abstract).

Wu Y C. 1992. On magmatic skarn: A new type of skarn [J]. *Geology of Anhui*, 2(1): 12-26 (in Chinese with English abstract).

Zeng P S, Yang Z S, Meng Y F, Pei R F, Wang Y B, Wang X C, Xu W Y, Tian S H and Yao X D. 2004. Temporal-spatial configuration and mineralization of Yanshanian magmatic fluid systems in

tongling ore concentration area, Anhui Province [J]. Mineral Deposits, 23(3):298-309 (in Chinese with English abstract).

Zhai Y S, Yao S Z, Lin X D, Zhou X R, Wan T F, Jin F Q and Zhou Z G. 1992a. Metallogenic regularity of Fe-Cu (-Au) in the Middle-Lower Reach of the Yangtze River area [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-235 (in Chinese).

Zhai Y S, Yao S Z, Lin X D, Jin F Q, Zhou X R, Wan T F and Zhou Z G. 1992b. Metallogenic regularity of iron and copper deposits in the middle and lower valley of the Yangtze River [J]. Mineral Deposits, 11(1):1-11 (in Chinese with English abstract).

Zuo L Y, Hou Z Q, Song Y C, Meng X J and Yang Z S. 2009. A study of the ore-forming fluid in the Lengshuikeng Ag-Pb-Zn porphyry deposit [J]. Acta Geoscientica Sinica, 30(5):616-626 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

常印佛, 刘学圭. 1983. 关于层控式矽卡岩型矿床: 以安徽省内下扬子拗陷中一些矿床为例 [J]. 矿床地质, 2(1):11-20.

常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游地区铜铁成矿带 [M]. 北京: 地质出版社. 1-379.

邓晋福, 叶德隆, 赵海玲, 汤德平, 等. 1992. 下扬子地区火山作用深部过程与盆地形成 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 1-188.

蒋其胜, 韩长生, 黄建满. 2005. 姚家岭铜铅锌矿床地质特征及成因探讨 [J]. 安徽地质, 15(4):265-269.

蒋其胜, 赵自宏, 黄建满. 2008. 安徽南陵姚家岭铜铅锌矿床的发现及意义 [J]. 中国地质, 35(2):314-321.

刘 斌, 沈 昆. 1999. 流体包裹体热力学 [M]. 北京: 地质出版社. 1-290.

唐永成, 吴言昌, 储国正, 邢凤鸣, 王永敏, 曹奋扬, 常印佛. 1998. 安徽沿江地区铜多金属矿床地质 [M]. 北京: 地质出版社. 1-351.

吴才来, 陈松永, 史仁灯, 郝美英. 2003. 铜陵中生代中酸性侵入体特征及成因 [J]. 地球学报, 24(1):41-48.

吴才来, 董树文, 国和平, 郭祥炎, 高前明, 刘良根, 陈其龙, 雷 敏, Wooden J L, Mazadab F K, Matfinson C. 2008. 铜陵狮子山地区中酸性侵入岩锆石 SHRIMP-U-Pb 定年及岩浆作用的深部过程 [J]. 岩石学报, 24(8):1801-1812.

吴言昌. 1992. 论岩浆矽卡岩-种新类型矽卡岩 [J]. 安徽地质, 2(1):12-26.

曾普胜, 杨竹森, 蒙义峰, 裴荣富, 王彦斌, 王训诚, 徐文艺, 田世洪, 姚孝德. 2004. 安徽铜陵矿集区燕山期岩浆流体系统时空结构及成矿 [J]. 矿床地质, 23(3):298-309.

翟裕生, 姚书振, 林新多, 周珣若, 万天丰, 金福全, 周宗桂. 1992a. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律 [M]. 北京: 地质出版社. 1-235.

翟裕生, 姚书振, 林新多, 金福全, 周珣若, 万天丰, 周宗桂. 1992b. 长江中下游地区铁、铜等成矿规律研究 [J]. 矿床地质, 11(1):1-11.

左力艳, 侯增谦, 宋玉财, 孟祥金, 杨竹森. 2009. 冷水坑斑岩型银铅锌矿床成矿流体特征研究 [J]. 地球学报, 30(5):616-626.