

# 浙西开化石龙头金矿含金黄铁矿的成分标型及硫同位素特征研究

曹素巧<sup>1</sup>, 贾锦生<sup>1,2</sup>, 钟增球<sup>1</sup>, 洪汉烈<sup>1</sup>, 王朝文<sup>1</sup>, 殷科<sup>1</sup>, 程峰<sup>1</sup>, 叶茵<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 浙江省第三地质大队, 浙江 金华 321001)

**摘要:**浙西开化石龙头金矿位于皖浙赣断褶带中, 矿体明显受断裂控制。为了解含金黄铁矿的矿物学特征及其对金矿化作用的指示, 对矿床中黄铁矿进行了X射线衍射、电子探针及其硫同位素分析。结果显示, 矿石中主要金属矿物为黄铁矿和毒砂, 含少量褐铁矿和磁黄铁矿, 脉石矿物有石英、绢云母、伊利石和白云石等。黄铁矿的 $Fe/(S+As)$ 值在0.777~0.886之间, 平均为0.828, 说明其在中深部环境生成;  $Co$ 含量( $64 \times 10^{-6} \sim 111 \times 10^{-6}$ )及 $Au/Ag$ 值(3.6~17.8)指示其形成于中低温环境;  $Co/Ni$ 值为1.95~4.47, 平均为3.59, 指示其为热液成因; 较高的 $As$ 含量和 $As-Co-Ni$ 相对含量三角图显示成矿流体与岩浆热液有关, 具有地下热卤水的特征; 硫同位素值介于6.14‰~8.27‰之间, 偏离陨石硫的范围, 而与超镁铁质岩的硫同位素值相近, 表明成矿流体来自深部, 后期受壳源物质影响。  
**关键词:**浙西, 石龙头金矿, 黄铁矿, 成分标型, 硫同位素

中图分类号: P578.2<sup>+</sup>92; P597<sup>+</sup>.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)05-0937-10

## Composition and sulfur isotope characteristics of auriferous pyrite from the Shilongtou gold deposit in Kaihua, western Zhejiang Province

CAO Su-qiao<sup>1</sup>, JIA Jin-sheng<sup>1,2</sup>, ZHONG Zeng-qiu<sup>1</sup>, HONG Han-lie<sup>1</sup>, WANG Chao-wen<sup>1</sup>, YIN Ke<sup>1</sup>, CHENG Feng<sup>1</sup> and YE Han<sup>1</sup>

(1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. No.3 Geological Party of Zhejiang Province, Jinhua 321001, China)

**Abstract:** The Shilongtou gold deposit in Kaihua of western Zhejiang lies in the Anhui-Zhejiang-Jiangxi fault-fold belt, with its orebodies obviously controlled by regional faults. In order to understand the mineralogy of pyrite and the indicator of gold mineralization, the authors studied the pyrite by using X-ray diffraction (XRD) analysis, electron microprobe analysis and sulfur isotopic composition analysis. The results show that major metal minerals are pyrite and arsenopyrite, with minor limonite and pyrrhotite, whereas gangue minerals are dominated by quartz, sericite, illite and dolomite. Electron microprobe analyses of auriferous pyrite show that the  $(Fe)/(S+As)$  ratios are between 0.777 and 0.886, indicating that it formed at the middle to shallow depth.  $Co$  content is relatively low ( $64 \times 10^{-6} \sim 111 \times 10^{-6}$ ), and  $Au/Ag$  ratios vary from 3.6 to 17.8, suggesting that it formed in a low temperature environment.  $Co/Ni$  ratios are between 1.95 and 4.47, with an average of 3.59, indicating its hydrothermal genesis. The high  $As$  content and the  $As-Co-Ni$  ternary diagram show that

收稿日期: 2014-03-06; 修订日期: 2014-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41012030, 40872038); 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20110145110001); 国家自然科学基金项目(41072030, 40872038)

作者简介: 曹素巧(1989-), 女, 硕士研究生, 主要从事金矿床研究, E-mail: 903552406@qq.com; 通讯作者: 钟增球, E-mail: zqzhong@cug.edu.cn.

the hydrothermal fluid was related to primary magmatic activity, with a nature of underground thermal brine. Sulfur isotope values vary from 6.14‰ to 8.27‰, similar to those of ultramafic rocks from deep crust, with the values affected by crustal sulfur at the later stage.

**Key words:** western Zhejiang; Shilongtuo gold deposit; pyrite; typomorphic characteristics; sulfur isotope

在金矿床中,黄铁矿是最常见的金属矿物之一,它往往作为金的伴生矿物或者载金矿物产出(Boyle, 1979)。研究表明,含金黄铁矿的地球化学及同位素地球化学特征可以指示黄铁矿的形成条件,从而成为金矿成因的指示矿物(李红兵等, 2005)。黄铁矿的成分标型具有重要的地质意义,比如黄铁矿中 As 含量和  $Fe/(S+As)$  值(质量分数比值,下同)与其形成深度具相关性(邹伟静等, 2011);微量元素 Co 含量和  $Au/Ag$  值可以反映一定的成矿温度(宋学信等, 1986;周学武等, 2005); $Co/Ni$  值可以反映黄铁矿的成因类型(宋学信等, 1986),  $As-Co-Ni$  相对含量对成矿热液的类型具有一定的指示作用(周文雅, 2001)等。近年来,硫同位素地球化学方法广泛应用于黄铁矿成因的研究(汪在聪等, 2010),因为硫是黄铁矿中铁元素的主要沉淀剂,不同成因黄铁矿中硫同位素值相差较大,而不同范围的硫同位素值可以指示硫的不同源区,从而可以推测成矿流体的来源(郑永飞等, 2000;严育通等, 2012)。

浙江地区发育多处硫化物石英脉型金矿床,主要赋存在元古宙和中生代的火山岩区(邵洁涟等, 1987;徐国风等, 1987)。研究表明,黄铁矿为该区域主要的载金矿物,硫同位素值显示为地幔硫或地壳深部硫(丰淑庄等, 1985),矿物包裹体标型特征指示金矿形成于中低温环境,其形成与岩浆及火山活动密不可分(邵洁涟等, 1986)。了解金矿床的成因对于金矿的远景预测和开采利用具有重大意义,而最主要的载金矿物——黄铁矿的标型分析是研究该类金矿床成因的一个最有效方法。浙江开化石龙头金矿是近年来发现的金矿床,位于浙江省西部开化县境内,矿床中金主要呈显微-次显微状赋存在黄铁矿和毒砂中,矿石中毒砂含量较低,而黄铁矿含量相对较高,易于挑选和实验。除浙江省第三地质大队 20 世纪初对开化石龙头金矿进行过勘探外,本项目首次对该金矿床进行系统、高精度的测试分析,利用 X 射线衍射分析的方法研究了矿石的成分和相对含量,在此基础上,进一步通过黄铁矿的主量和微量元素地球化学特征和硫同位素分析来讨论含金黄铁矿形成时的物理化学条件和成矿物质来源,旨在探讨

该区金矿的成因机制,为该区金矿的选冶回收和进一步找矿提供有效的新信息。

## 1 区域地质及矿床地质

研究区位于江南造山带东南缘的皖浙赣地体边界汇聚带内(图 1a)。矿区内构造以断裂为主,其中北东向的下庄-石柱断裂(皖浙边界断裂在浙西开化地区的一部分)是矿区规模最大的断裂,贯穿整个矿区。断裂上盘(北西侧)出露前震旦系浅变质岩系,下盘(南东侧)为奥陶-震旦系沉积岩,为一陡倾角的推覆构造。该断裂是本矿区最主要的控矿和容矿构造,构造具多期次活动特征。断裂带内发育强烈的硅化、绢云母化和褐铁矿化。浙西开化石龙头金矿区即位于下庄-石柱断裂带中段,物化探测表明,金矿区范围呈与断裂带延伸方向一致的北东向条带状,金矿(化)体赋存于该断裂中。

矿区出露地层有新元古界上墅组,震旦系南沱组、陡山沱组、板桥山组以及奥陶系印渚埠组、宁国组、胡乐组、砚瓦山组、黄泥岗组和长坞组下段(图 1b)。新元古界上墅组主要分布于下庄-石柱断裂带的北西侧,为一套绿片岩相变质岩系,岩性为双峰式火山岩夹变质粉砂岩;震旦系地层发育有粉砂质泥岩、砂砾岩、白云质泥岩和白云岩,与上下地层均呈断层接触;奥陶系是一套海相碎屑岩和碳酸盐沉积,分布在下庄-石柱断裂带的南东侧,岩性主要为炭质-硅质泥岩、瘤状灰岩、钙质-灰质泥岩以及粉砂质泥岩等。

研究区内岩浆岩发育,矿区及其外围发现有中酸性岩体(图 1b),主要发育在主构造带及其旁侧构造中。岩性主要为石英霏细斑岩、闪长玢岩和微晶闪长岩。岩脉长度一般为 100 m 左右,宽度 2~15 m,走向北东,少数近南北向。矿区南西段的下庄-石柱主断裂带的近顶板处有一处石英霏细斑岩脉(图 1b),长度大于 500 m,宽度 15 m 左右,倾向北西,倾角  $70^{\circ}\sim 85^{\circ}$ ,岩脉走向延伸较稳定,未见构造破坏特征,而断裂具多期次活动特征,初步说明该岩脉属较晚期侵入。岩石呈斑状结构,块状构造,斑晶成分以石

英为主，次为长石，基质为霏细长英质集合体。岩石蚀变较弱，主要是绢云母化和高岭土化。该岩脉未见金矿化。

浙西开化石龙头金矿严格受区内北东向断裂带控制，该金矿已圈定 I 号、II 号、III 号和 IV 号矿体，它们都赋存在石龙头断裂的矿化蚀变带中。其中 I 号、II 号矿体是石龙头金矿的主要矿体(图 1b)，主要呈狭长状分布在矿床的西南部和中部。I 号矿体长 680 m，厚 1.8~30.8 m，平均约 7.01 m。II 号矿体长 620 m，厚 1.2~3.95 m，平均约 2.99 m。矿体呈脉状产于构造碎裂蚀变带中，由于构造作用的多期次性和不均一性，使同一条矿化带中的矿体呈断续

分布，并具分叉复合的特征。矿化体走向较稳定，呈北东 40°~45°展布，倾向北西，倾角约 75°。赋矿岩石为糜棱岩(片理化岩)和碎裂岩，原岩成分多为变质泥岩、变质泥质粉砂岩和泥晶白云岩等。岩石受多期的应力作用，被强烈挤压破碎、碎裂，定向构造较发育，以碎裂程度高、糜棱岩化强、蚀变显著(黄铁矿化、绢云母化和硅化)为特征。而围岩破碎和蚀变程度则较弱，矿体与围岩的界线较清楚。围岩蚀变主要类型为绢云母化、硅化、褐铁矿化、黄铁矿化，次为绿泥石化、高岭土化、碳酸盐化等，金矿化与绢云母化、硅化和黄铁矿化关系尤为密切。

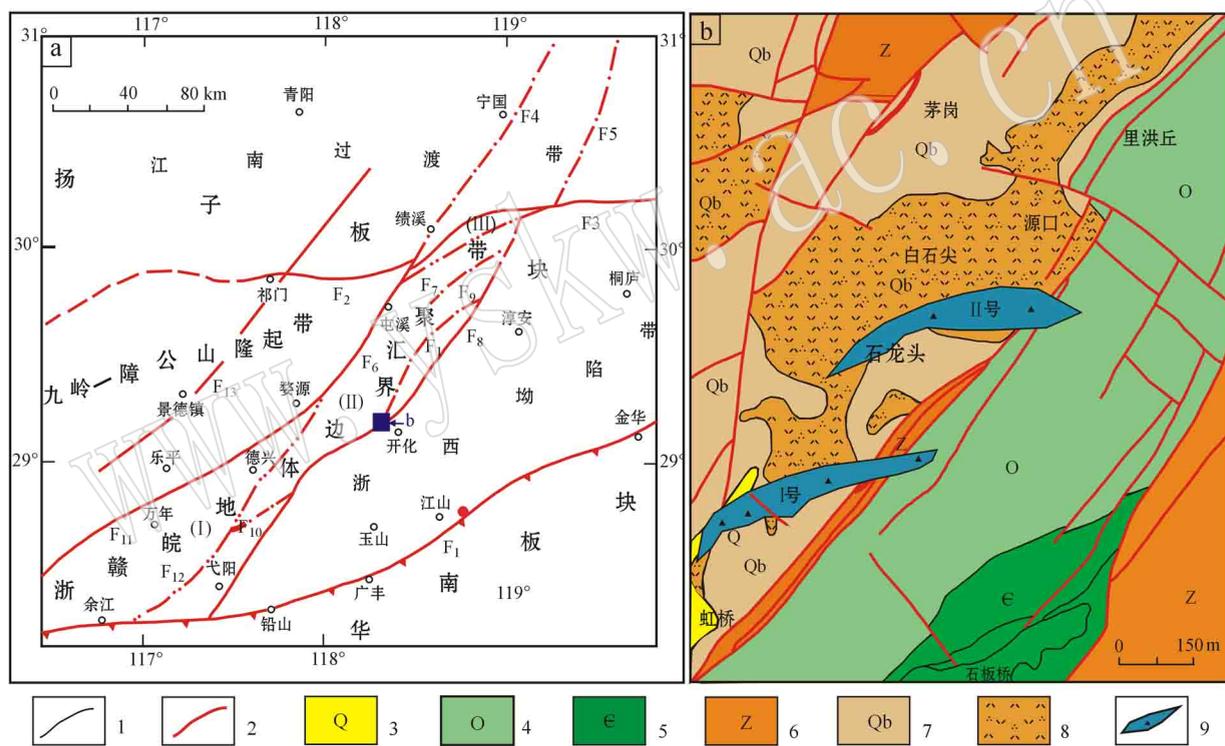


图 1 浙西开化构造分区图(a)与石龙头金矿矿区地质简图(b)(据浙江省第三地质大队, 2014)<sup>①</sup>

Fig. 1 Tectonic zoning map of Kaihua, west Zhejiang Province (a) and geological sketch map of the Shilongtou gold deposit (b)

(after No. 3 Geological Party of Zhejiang, 2014)<sup>①</sup>

F<sub>1</sub>—江绍断裂带(板块分界线); F<sub>2</sub>—祁门—潜口断裂; F<sub>3</sub>—伏川—顺溪断裂; F<sub>4</sub>—绩溪—宁国断裂; F<sub>5</sub>—西天目山断裂; F<sub>6</sub>—屯溪—五城断裂; F<sub>7</sub>—三阳断裂; F<sub>8</sub>—皖浙边界断裂; F<sub>9</sub>—井潭断裂; F<sub>10</sub>—森村—大茅山断裂; F<sub>11</sub>—乐安江断裂; F<sub>12</sub>—赣东北断裂; F<sub>13</sub>—祁门—景德镇断裂; (I)—德兴地体; (II)—怀玉地体; (III)—伏川蛇绿岩套; 1—地质界线; 2—断层; 3—第四系; 4—奥陶系; 5—寒武系; 6—震旦系; 7—青白口系; 8—石英斑岩; 9—矿体及钻孔位置

F<sub>1</sub>—Jiangshao faulted zone (boundary of plate); F<sub>2</sub>—Qimen-Qiankou faulted zone; F<sub>3</sub>—Fuchuan-Shunxi faulted zone; F<sub>4</sub>—Jixi-Ningguo faulted zone; F<sub>5</sub>—Xitianmushan faulted zone; F<sub>6</sub>—Tunxi-Wucheng faulted zone; F<sub>7</sub>—Sanyang faulted zone; F<sub>8</sub>—boundary of Anhui-Zhejiang faulted zone; F<sub>9</sub>—Jingtan faulted zone; F<sub>10</sub>—Sencun-Damaoshan faulted zone; F<sub>11</sub>—Le'anjiang faulted zone; F<sub>12</sub>—Gandongbei faulted zone; F<sub>13</sub>—Qimen-Jingdezhen faulted zone; (I)—Dexing terrane; (II)—Huaiyu terrane; (III)—Fuchuan ophiolite suite; 1—geological boundary; 2—fault; 3—Quaternary; 4—Ordovician; 5—Cambrian; 6—Sinian; 7—Qingbaikou System; 8—quartz porphyry; 9—location of orebody and drill hole

① 浙江省第三地质大队. 2014. 浙江省开化县石龙头金矿区工艺矿物学研究报告(内部资料).

## 2 样品特征及矿石组成

本文采集金矿区I号和II号矿体中6个钻孔的金矿石代表性样品29件,共7.5 kg。磨制光片、薄片各13个,探针片3个,并研磨样品粉末若干。

野外观察及岩石光片、薄片鉴定可见,石龙头金矿矿石主要为构造蚀变岩型矿石,一般呈灰白-浅黄褐色,原岩性质多样,主要可见强烈蚀变石英斑岩质碎裂岩(图2a)和轻微变质细粒泥质或硅质砂岩(图2b),有少量碎裂脉石英岩(图2c)和糜棱岩化碎裂微细粒英安岩(图2d)。金属矿物主要为黄铁矿(图2e、

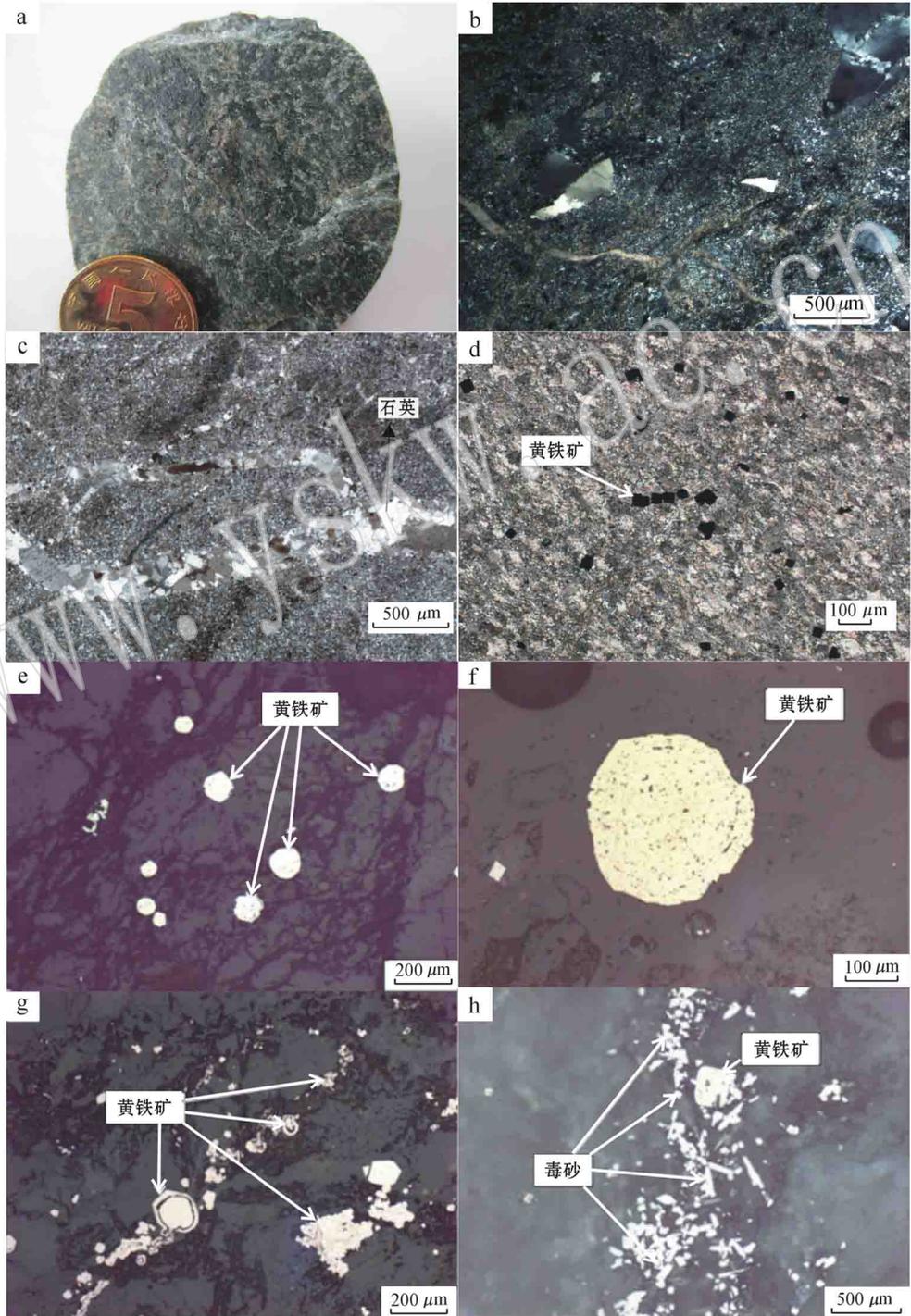


图2 矿石手标本(a)及矿石矿物单偏光下(b、c、d)、反光镜下(e、f、g、h)特征照片

Fig. 2 Photographs of hand specimen(a), microphotographs of ore minerals under plainlight (b, c, d) and under reflected light(e, f, g, h)

2f、2g)和毒砂(图2h),含少量褐铁矿、磁黄铁矿和自然金等,脉石矿物有石英、云母类矿物(绢云母和水云母类矿物)和碳酸盐岩等。矿石普遍具碎裂结构,塑性变形,定向构造较为发育。构造以块状构造、浸染状构造为主,有时可见脉状构造,表现为石英、碳酸盐岩短细脉充填在矿石的微细裂隙中。矿石中绢云母化、硅化发育也较普遍。钻孔样品中可见黄铁矿呈暗黄色,浸染状分布,有时粒状黄铁矿聚集成断续的细脉状分布。野外露头很少见到黄铁矿化,褐铁矿以黄铁矿假像呈稠密浸染状或条带状分布。

为了进一步了解矿石的成分,在详细的野外观察、显微镜下薄片、光片的鉴定基础上,对金异常较大的钻孔样品 YX38 粉碎,研磨至 200 目以下,进行

X 射线衍射分析。X 射线衍射分析实验在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室采用荷兰帕纳科公司 XPertProDY2198 型 X 射线衍射仪上进行,采用  $\text{CuK}\alpha$  辐射, Ni 片滤波,工作电压为 35 kV,电流为 30 mA,光阑系统为  $\text{DS}=\text{SS}=1^\circ$ ,  $\text{RS}=0122$  mm,扫描速度为  $8^\circ/\text{s}$ 。衍射结果如图 3 所示。X 射线衍射分析显示,矿石中主要矿物成分为石英、白云石、伊利石、黄铁矿和毒砂等(图 3)。根据不同矿物特征峰的衍射强度及其对应的权重系数,使用 MID jade 5.0 软件对样品中各矿物含量进行半定量计算,结果表明,石英含量为 44%,云母类矿物为 40%,白云石 8%,黄铁矿和毒砂分别为 6% 和 2%。

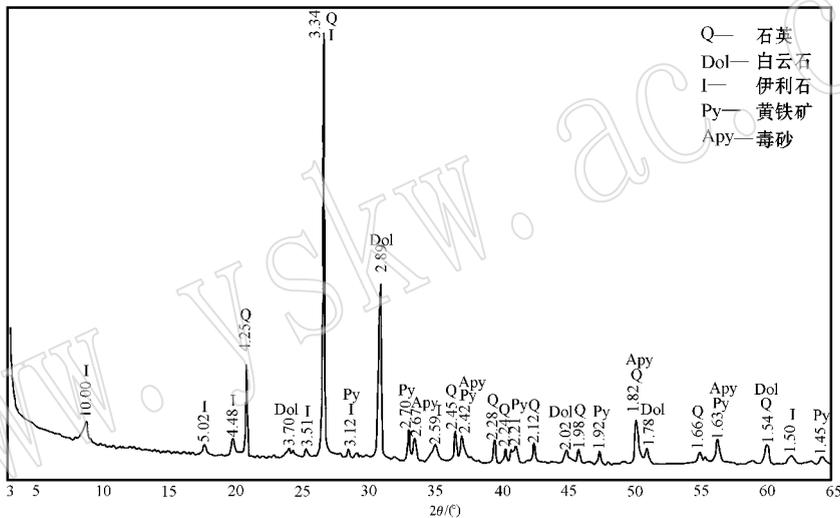


图 3 石龙头金矿矿石 X 射线衍射图

Fig. 3 X-ray diffraction pattern of ore from the Shilongtou gold deposit

### 3 含金黄铁矿主微量标型及硫同位素特征

#### 3.1 成分分析方法

前期的透射电镜能谱分析和电感耦合等离子体发射光谱测试(ICP-OES)表明矿石中金主要呈显微-超显微状赋存在黄铁矿和毒砂中。本次研究首先通过扫描电子显微镜对主要载金矿物黄铁矿进行微观形貌观察(图4),并利用电子探针分析方法研究载金矿物的黄铁矿的化学组成特征。将制备好的光片表面进行喷碳导电处理,然后进行电子探针分析。分析工作在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室的日本 JEOL JMZ28100 型电子探针分

析仪上进行。利用  $\text{AuL}\alpha$  线进行面扫描观察发现,独立的金矿物相对较少(或者金矿物粒度在检出限之下),金主要赋存在黄铁矿和毒砂等硫化物中。本文重点对矿石中不同晶形的黄铁矿进行了电子探针化学成分分析,结果列于表 1。

#### 3.2 黄铁矿的主微量特征

扫描电镜的二次电子像(图4a、4b)显示,石龙头金矿区黄铁矿的晶形主要有立方体和五角十二面体,呈半自形和不规则粒状等,颗粒比较细小,一般在  $10\sim 150\ \mu\text{m}$  之间,很少大于  $500\ \mu\text{m}$ 。背散射像显示(图4c、4d、4e、4f),黄铁矿内部裂隙和空洞十分发育,有的位于黄铁矿晶体内部,有的贯穿整个晶体,同时可见毒砂与黄铁矿紧密共生。

黄铁矿的化学式为  $\text{FeS}_2$ ,理论上主要元素 S 和

为硫亏损。其余8个测点S/Fe(原子比)均大于2,在2.07~2.20之间,表现为铁亏损(表1)。

黄铁矿中的Fe常被其同族元素Co和Ni以类质同像代替,S常被As替代。从表1可见,该金矿中黄铁矿的微量元素主要为As、Co、Ni、Au、Ag、Bi和Cr等。含As量较高,在 $289 \times 10^{-6} \sim 1\,289 \times 10^{-6}$ 之间,平均 $766 \times 10^{-6}$ ;Co含量为 $64 \times 10^{-6} \sim 111 \times 10^{-6}$ ,平均为 $86 \times 10^{-6}$ ;除1个测点极低(达 $1 \times 10^{-6}$ )外,Ni含量在 $16 \times 10^{-6} \sim 40 \times 10^{-6}$ 之间,平均为 $23 \times 10^{-6}$ ;Co/Ni值在1.95~4.47之间,平均为3.59;Au含量为 $137 \times 10^{-6} \sim 232 \times 10^{-6}$ ,Ag含量为 $13 \times 10^{-6} \sim 51 \times 10^{-6}$ ;Au/Ag值较高,在3.63~17.85之间,平均达7.55。同时,黄铁矿中含有高温元素Bi,含量在 $176 \times 10^{-6} \sim 293 \times 10^{-6}$ 之间,平均 $237 \times 10^{-6}$ 。

### 3.3 黄铁矿的硫同位素特征

硫同位素测试在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,所用仪器为MAT251,测试方法及流程参见李新俊等(2002)。测试结果显示3个钻孔样品中的黄铁矿硫同位素值分别为6.14‰、6.88‰和8.27‰,平均为7.10‰。

## 4 讨论

### 4.1 矿床成因探讨

金矿床中黄铁矿的粒度、晶体形态、主微量成分和硫同位素值均能在一定程度上反映黄铁矿的含金性及其形成时的物理化学条件,对其成因具有较好的指示作用。研究表明,颗粒细小、裂隙发育的黄铁矿含金性较好,因为它们具有较大的比表面积,更易于从周围成矿流体中吸附金(李红兵等,2005)。该区含金黄铁矿粒度细小,裂隙和空洞十分发育,晶体形态常见五角十二面体和不规则粒状集合体,说明其具有较好的含金性(宁钧陶等,2012)。

研究表明,黄铁矿中主成分含量及Fe/(S+As)值与其形成深度相关性较高,相关系数达0.87,深部产出的黄铁矿Fe/(S+As)值为0.846,中部为0.863,浅部为0.926(周学武等,2004,2005;郇伟静等,2011)。表1中12个测点分析结果显示,本区黄铁矿中Fe/(S+As)值在0.777~0.886之间,平均为0.828,说明其形成于中部至深部环境。对于内生热液矿床,形成深度越浅,越贫S、富Fe,而形成深度越深,则越富S、贫Fe(南京大学地质学系岩矿教研室,1978)。本区黄铁矿中S/Fe值在1.93~2.20

之间,平均为2.09,相对富S、贫Fe,也反映了该区黄铁矿的形成环境为中深部环境。

黄铁矿中的Fe常被其同族元素Co和Ni以类质同像代替,As常替代S元素。在热液高温阶段,Co比Ni更容易进入黄铁矿替代 $Fe^{2+}$ ,故成矿温度越高,黄铁矿的Co含量越多,Co/Ni值越大(李胜荣等,1994;熊先孝等,2000)。一般高温型黄铁矿Co含量高于 $1\,000 \times 10^{-6}$ ,中温型在 $100 \times 10^{-6} \sim 1\,000 \times 10^{-6}$ ,低温型小于 $100 \times 10^{-6}$ (梅建明,2000;郇伟静等,2011)。本区黄铁矿中Co含量为 $64 \times 10^{-6} \sim 111 \times 10^{-6}$ ,平均为 $86 \times 10^{-6}$ ,Co/Ni值在1.95~4.47之间,平均为3.59,指示其成矿温度不高,为中低温环境。Au/Ag值亦可以指示温度(周学武等,2005),高温热液型金矿床的黄铁矿中Au/Ag值小于0.5,中低温热液型则大于0.5。本区黄铁矿Au/Ag值为3.6~17.8,平均为7.55,远大于0.5,也说明该金矿床形成于中低温环境。

王奎仁(1989)总结了不同类型矿床中黄铁矿的Co/Ni值特征,指出沉积型该值远小于1,变质热液型接近1,岩浆热液型为1~5,火山热液型为5以上。宋学信等(1986)和李红兵等(2005)提出用As-Co-Ni质量分数三角图解来研究中国不同成因金矿床中黄铁矿的划分。该区金矿床中黄铁矿Co/Ni值在1.95~4.47之间,平均为3.59,符合岩浆热液的特征,黄铁矿中含有高温元素Bi(含量为 $176 \times 10^{-6} \sim 293 \times 10^{-6}$ )也说明成矿热液继承了早期岩浆的特征。但是典型的岩浆热液金矿形成温度较高,高温元素Co含量较高,低温元素As较低。本文Co/Ni值投图位于热液成因区域(图5a),接近沉积成因区域,可能是深部热液上升过程中与上部沉积地层发生交换反应的结果。本区黄铁矿含As量较高,在 $289 \times 10^{-6} \sim 1\,289 \times 10^{-6}$ 之间,而Co、Ni含量较低,在As-Co-Ni含量三角图上,集中于富砷贫钴贫镍的地下热卤水淋滤区域,少量落入岩浆热液区(图5b),说明成矿流体与深部岩浆作用有关,同时具有地下热卤水的特征,可能是岩浆热液上升过程中加入了大量深循环低温大气水使得其中As含量很高。可见该矿床为中-低温热液型金矿床,黄铁矿形成于中-深部环境。成矿流体与深部岩浆作用有关,具有地下热卤水的特点,矿石中黄铁矿的硫同位素研究也反映了成矿流体的这一特征。

### 4.2 成矿流体来源

硫同位素示踪可以反映成矿流体的来源。研究

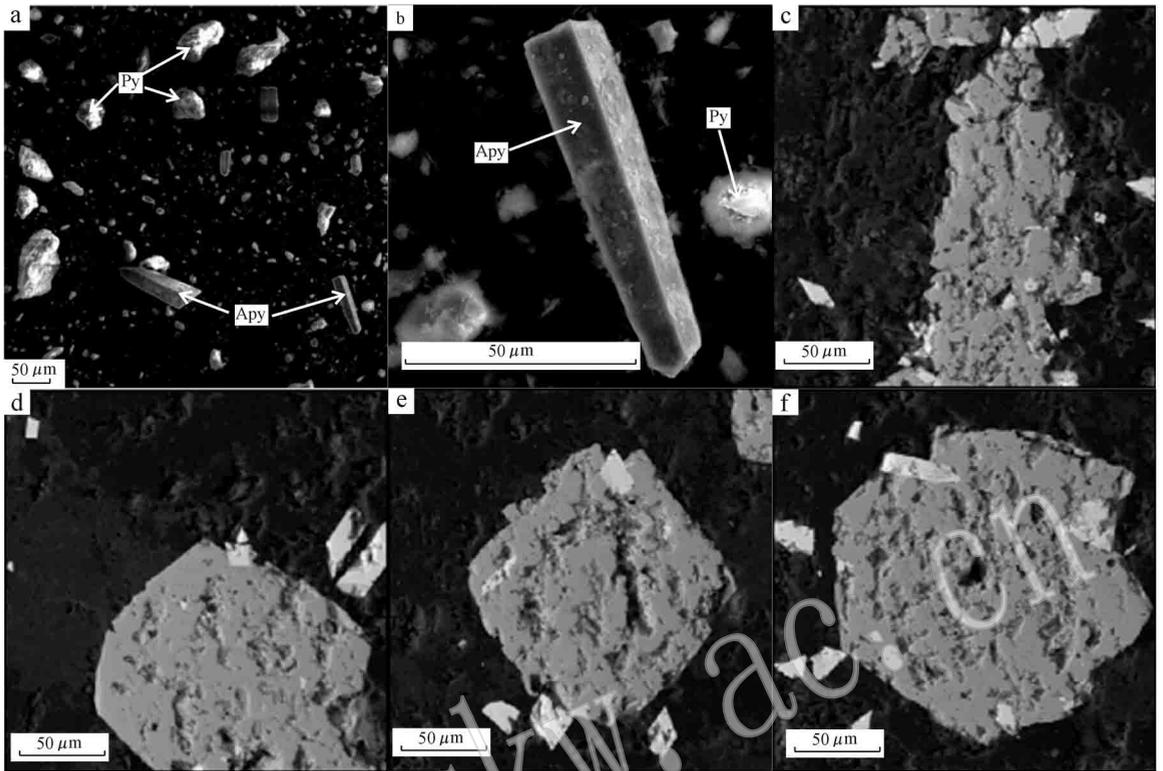


图 4 石龙头金矿扫描电镜下含金硫化物照片

Fig. 4 Microphotographs of auriferous sulfide from the Shilongtou gold deposit

a、b—扫描电镜下长柱状毒砂(Apy)和不规则状黄铁矿(Py)集合体; c、d、e 和 f—黄铁矿横切面照片(有立方体、五角十二面体和不规则状)  
a and b—arsenopyrite (Apy) and aggregation of pyrite (Py) under SEM; c, d, e and f—photographs of pyrite cross-sections  
(with cube, pentagonal dodecahedron and irregular shape)

表 1 黄铁矿电子探针主量和微量成分表

Table 1 Electron microprobe analyses of pyrite

晶形	Fe	S	As	Co	Ni	Au	Ag	Bi	Cr	总量	S/Fe	Co/Ni	Au/Ag
五角十二面体	46.60	52.48	289	83	19	182	26	216	—	99.90	1.97	4.37	7.00
	46.05	51.60	1 176	111	37	186	19	273	23	99.48	1.96	3.58	9.79
	46.45	51.64	883	88	23	162	19	188	7	99.46	1.95	3.83	8.53
	46.49	51.36	1 141	85	19	137	16	293	30	99.57	1.93	4.47	8.56
立方体	43.50	53.68	537	94	22	202	45	176	41	98.28	2.16	4.27	4.49
	43.61	53.58	668	84	1	232	13	250	29	98.47	2.15	84.00	17.85
	43.04	52.37	663	86	31	185	51	217	21	96.66	2.13	2.77	3.63
半自形	42.15	52.41	342	64	16	188	35	277	65	95.55	2.18	4.00	5.37
	42.56	53.40	325	78	40	183	41	244	15	96.89	2.20	1.95	4.46
不规则状	42.22	53.01	1 289	86	23	204	17	231	25	97.11	2.20	3.74	12.00
	42.75	53.22	901	69	18	155	32	253	47	97.45	2.18	3.83	4.84
	44.80	53.03	988	108	29	156	38	230	30	99.41	2.07	3.72	4.11
平均值	44.19	52.65	766	86	23	181	29	237	28	98.19	2.09	3.59	7.55

表中除 Fe、S 和总量的单位为 % 外,其余元素单位为  $1 \times 10^{-6}$ ; S/Fe 值为原子个数比, Co/Ni 和 Au/Ag 值为质量分数比。

Fe 含量(质量分数,下同)应为 S 53.45%, Fe 46.55%, S/Fe(原子比)应为 2。电子探针主成分分析结果显示,该金矿中黄铁矿 12 个测点的主要化学

成分 S、Fe 含量总体上接近或略低于理论值, S 51.36%~53.68%, Fe 42.15%~46.60%, S/Fe(原子比)有 4 个测点小于 2,在 1.93~1.97 之间,表现

表明,当成矿流体中  $f_{O_2}$  较低时,硫主要呈低价态的  $HS^-$  和  $S^{2-}$  存在,成矿流体中的  $\delta^{34}S$  基本都富集于硫化物中;当成矿流体中  $f_{O_2}$  较高时,硫主要呈高价态的  $SO_4^{2-}$  存在,富集  $\delta^{34}S$  的硫酸盐的沉淀导致成矿流体中  $^{34}S$  亏损,此时生成的硫化物中  $\delta^{34}S$  值低于成矿热液中总的硫同位素值(Ohmoto, 1972; 郭利军等, 2009)。X 射线衍射分析显示,该区矿石中未发育硫酸盐,含硫矿物主要为黄铁矿和毒砂等硫化物,说明成矿体系的  $f_{O_2}$  较低,硫化物中的  $\delta^{34}S$  特征可以代表成矿流体中总硫  $\delta^{34}S_{\Sigma S}$  的特征。来源于地幔的硫与陨硫同位素相似,变化于 0‰ 附近,受地壳再

循环组分影响,其变化范围在  $-6‰$  至  $+6‰$  之间(Denies, 1995)。严育通等(2012)统计了各成因类型金矿中黄铁矿的硫同位素特征,指出浅成低温热液型金矿的硫同位素值为  $-0.4‰ \sim 11‰$ ,与陨硫和超镁铁质岩硫同位素值相似,分异度小;岩浆热液型硫同位素值为  $0.9‰ \sim 13.63‰$ ,类似花岗岩的硫同位素特征,变化范围较前者大。本矿区 3 个钻孔样品中的黄铁矿硫同位素值分别为  $6.14‰$ 、 $6.88‰$  和  $8.27‰$ ,变化范围较窄,平均为  $7.10‰$ ,表现为较低的正值。这种特征偏离陨硫同位素值,与超镁铁岩的硫同位素值相近(图6),推测硫来自于深源地幔,

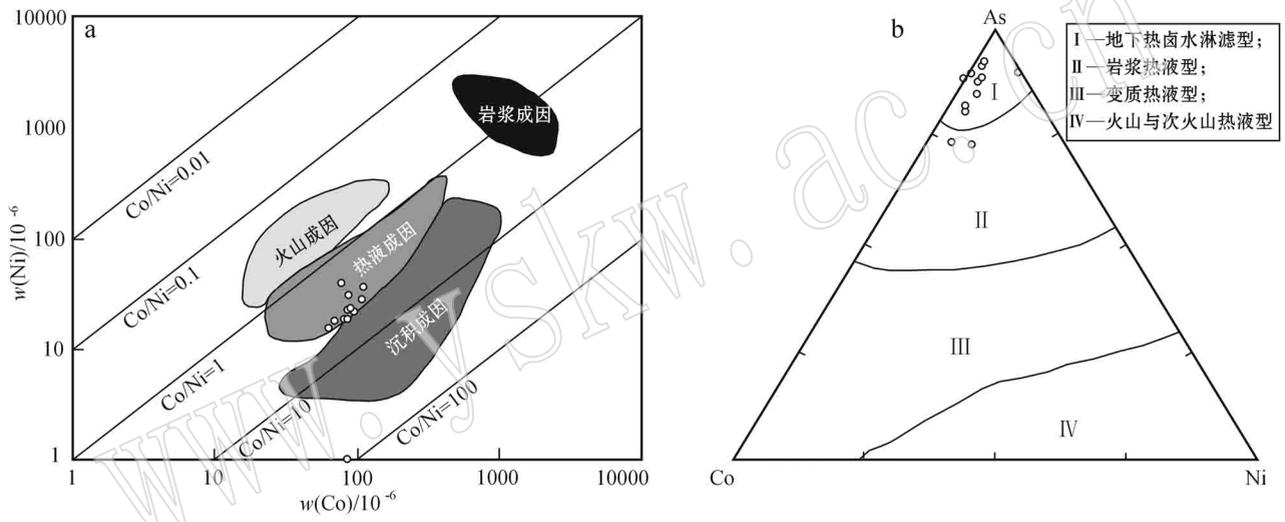


图 5 石龙头金矿床中黄铁矿的 Ni-Co 分布图[a, 底图据 Bajwah 等(1987)和 Brill(1989)]和 As-Co-Ni 三角图解 [b, 底图据李红兵等(2005)]

Fig. 5 Ni-Co diagram (a, after Bajwah *et al.*, 1987; Brill, 1989) and As-Co-Ni diagram of pyrites from the Shilongtuo gold deposit (b, after Li Hongbing *et al.*, 2005)

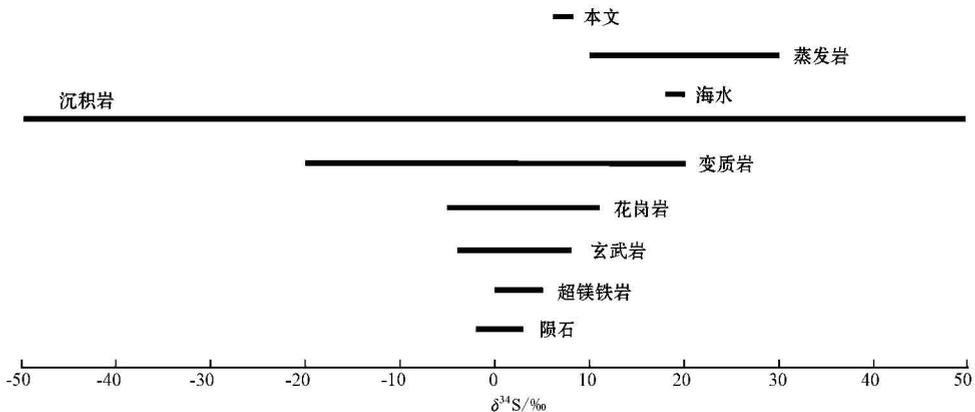


图 6 不同天然含硫物质中  $\delta^{34}S$  的特征(据严育通等, 2012)

Fig. 6  $\delta^{34}S$  characteristics of different natural sulfur substances (after Yan Yutong *et al.*, 2012)

后期受到壳源硫的影响。成矿物质可能与火山-岩浆作用导致的地幔物质上涌有关,喷发过程中加入了壳源物质的贡献,但又有别于典型的浅成低温热液型金矿,可能与其形成深度较大有关。

综上所述,浙西开化石龙头金矿属于中低温热液矿床。成矿流体具有地下热卤水的特征,可能为深源岩浆上升过程中混入大量深循环大气水而形成的。该区广泛的火山-岩浆活动可能为该金矿成矿系统提供了矿源和热源,而区域上的深大断裂不仅是成矿的有利部位,可能也是深部流体向上运移的通道。

## 5 结论

(1) 矿石中主要矿物成分为石英(44%)、云母类矿物(40%)、白云石(8%)、黄铁矿(6%)和毒砂(2%)。

(2) 据  $Fe/(S+As)$  值推断,黄铁矿形成于中深部环境; $Co$  含量、 $Au/Ag$  值表明其形成温度为中低温。根据  $Co/Ni$  值和  $As-Co-Ni$  相对含量,推断该矿床为热液成因。

(3) 硫同位素测试表明该区黄铁矿中硫值表现为低的正值,接近超镁铁质岩的硫同位素值,为深源硫,说明成矿流体来自深源部位,上升过程中加入了壳源物质的贡献。

## References

- Bajwah Z U, Seccombe P K and Offler R. 1987. Trace element distribution,  $Co/Ni$  ratios and genesis of the Big Cadia iron-copper deposit, New South Wales, Australia[J]. Mineralium Deposita, 22: 292~303.
- Boyle R. 1979. The geochemistry of gold and its deposits[J]. Geological Survey Bulletin, 280: 1~584.
- Brill B A. 1989. Trace element contents and partitioning of elements in ore minerals from the CSA Cu-Pb-Zn deposit, Australia[J]. Can. Mineral, 27: 263~274.
- Denies P. 1995. Sulfides inclusion chemistry and carbon isotopes of Africa diamond[J]. Geochemistry Cosmoch in Acta, 59: 3 171~3 188.
- Feng Shuzhuang, Zuo Dahua and Mei Jianming. 1985. On the study of native gold and gold-bearing minerals from one gold deposit in Zhejiang province[J]. Geology and Prospecting, 21(1): 41~44( in Chinese ).
- Guo Lijun, Xie Yuling, Hou Zengqian, et al. 2009. Geology and ore fluid characteristics of the Bairendaba silver polymetallic deposit in InnerMongolia[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 28(1): 26~36( in Chinese with English abstract ).
- Li Hongbing and Zeng Fanzhi. 2005. The Pyrite's typomorphic characteristics in gold deposit[J]. Contributions to Geology and Mineral Resource Research, 20(3): 199~203( in Chinese with English abstract ).
- Li Shengrong, Chen Guangyuan, Shao Wei, et al. 1994. Study of chemical characteristic of pyrites from Qingjinding gold deposit, Rushan, Jiaodong[J]. Gold Science and Technology, 2(6): 7~12 ( in Chinese ).
- Li Xinjun and Liuwei. 2002. Fluid inclusion and stable isotope constraints on the genesis of the Mazhuangshan gold deposit, eastern Tianshan Mountains of China[J]. Acta Petrologica Sinica, 18(4): 551~558( in Chinese with English abstract ).
- Mei Jianming. 2000. Chemical typomorphic characteristic of pyrites from Zhilengtou gold deposit, Suichang, Zhejiang[J]. Geoscience, 14(1): 51~55( in Chinese with English abstract ).
- Section of Petrology and Mineralogy, Department of Geology Nanjing University. 1978. Crystallography and Mineralogy[M]. Beijing: Geological Publishing House, 334~338( in Chinese ).
- Ning Juntao, Guo Xiyun, Fu Gonggong, et al. 2012. The marked characteristics of the pyrite of gold ore genesis and mineral exploration[J]. Journal of East China institute of Technology, 35(4): 352~357( in Chinese with English abstract ).
- Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. Economic Geology, 67(5): 551~578.
- Shao Jieliang and Mei Jianming. 1986. On the study of typomorphic characteristics of mineral inclusion in the gold deposits from volcanic terrain in Zhejiang and its genetic and prospecting significance[J]. J. Mineral Petrol., 6(3): 103~111( in Chinese with English abstract ).
- Shao Jieliang and Mei Jianming. 1987. On the prospecting mineralogical study of pyrite from gold deposits of the volcanic terrain in Zhejiang province, China[J]. Contributions to Geology and Mineral Resource Research, 2(1): 55~66( in Chinese with English abstract ).
- Song Xuexin and Zhang Jingkai. 1986. Minor elements in pyrites of various genetic types from China[J]. Bulletin of the Institute of Mineral Deposits Chinese Academy of Geological Sciences, (2): 166~175( in Chinese with English abstract ).
- Wang Kuiren. 1989. Genetic Mineralogy of Earth and Universe[M]. Hefei: Anhui Education Press( in Chinese ).
- Wang Zaicong, Liu Jianming, Liu Hongtao, et al. 2010. Complexity and uncertainty of tracing fluid sources by means of H-O, C, S, N

- isotope systems: a case study of orogenic lode gold deposits[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(5): 577~590 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Xianxiao and Yao Chaomei. 2000. Mineralogy of pyrites from the Xiangshan iron and pyrite deposits, Anhui Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19(2): 189~192 (in Chinese with English abstract).
- Xu Guofeng, Shao Jieliang and Mei Jianming. 1987. On ore emplacement and prospecting guidelines of gold deposits in the volcanic terrain in Zhejiang, China[J]. *Journal of Guilin College of Geology*, 7(1): 17~24 (in Chinese with English abstract).
- Xun Weijing, Yuan Wangming and Li Na. 2011. Study on the mineral electron microprobe evidence of the formation conditions and fission track of gold deposits in Ganzi-Litang gold belt, western Sichuan Province[J]. *Geoscience*, 25(2): 261~270 (in Chinese with English abstract).
- Yan Yutong, Li Shengrong, Jia Baojian, et al. 2012. Composition typomorphic characteristics and statistic analysis of pyrite in gold deposits of different genetic types[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(4): 214~226 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yongfei, Xu Baolong and Zhou Gentao. 2000. Geochemical studies of stable isotopes in minerals[J]. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 299~320 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xuewu, Li Shengrong, Lu Li, et al. 2005. Study of pyrite typomorphic characteristics of Wulong quartz-vein-type gold deposit in Dandong, Liaoning Province, China[J]. *Geoscience*, 19(2): 231~238 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Wenya. 2001. Typomorphic peculiarities and significance of the pyrite in the veinlet-disseminated gold deposits[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 20(2): 100~104 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xuewu, Li Shengrong, Lu Li, et al. 2004. Research on typomorphism of pyrite from Nongkeng gold-silver mineralization district in Wuyi County, Zhejiang Province, China[J]. *J. Mineral Petrol.*, 24(4): 6~13 (in Chinese with English abstract).
- 丛, 20(3): 199~203.
- 李胜荣, 陈光远, 邵伟, 等. 1994. 胶东乳山金青顶金矿区黄铁矿化学成分研究[J]. *黄金科学技术*, 2(6): 7~12.
- 李新俊, 刘伟. 2002. 东天山马庄山金矿床流体包裹体和同位素地球化学研究及其对矿床成因的制约[J]. *岩石学报*, 18(4): 551~558.
- 梅建明. 2000. 浙江遂昌冶岭头金矿床黄铁矿的化学成分标型研究[J]. *现代地质*, 14(1): 51~55.
- 南京大学地质学系岩矿教研室. 1978. 结晶学与矿物学[M]. 北京: 地质出版社, 334~338.
- 宁钧陶, 郭喜运, 符巩固, 等. 2012. 黄铁矿的标型特征及其对金矿床成因与找矿勘查的启示[J]. *东华理工大学学报*, 35(4): 352~357.
- 邵洁涟, 梅建明. 1986. 浙江火山岩区金矿床的矿物包裹体标型特征研究及其成因与找矿意义[J]. *矿物岩石*, 6(3): 103~111.
- 邵洁涟, 梅建明. 1987. 浙江火山岩区金矿床黄铁矿的找矿矿物学研究[J]. *地质找矿论丛*, 2(1): 55~66.
- 宋学信, 张景凯. 1986. 中国各种成因黄铁矿的微量元素特征[J]. *中国地质科学院矿床地质研究所所刊*, (2): 166~175.
- 王奎仁. 1989. 地球与宇宙成因矿物学[M]. 合肥: 安徽教育出版社.
- 汪在聪, 刘建明, 刘红涛, 等. 2010. 稳定同位素热液来源示踪的复杂性和多解性评述——以造山型金矿为例[J]. *岩石矿物学杂志*, 29(5): 577~590.
- 熊先孝, 姚超美. 2000. 向山地区铁、硫矿床中黄铁矿矿物学研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 19(2): 189~192.
- 徐国风, 邵洁涟, 梅建明. 1987. 浙江火山岩区金矿床成矿作用和找矿方向[J]. *桂林冶金地质学报*, 7(1): 17~24.
- 郇伟静, 袁万明, 李娜. 2011. 川西甘孜-理塘金矿带形成条件的矿物电子探针与裂变径迹研究[J]. *现代地质*, 25(2): 261~270.
- 严育通, 李胜荣, 贾宝剑, 等. 2012. 中国不同成因类型金矿床的黄铁矿成分标型特征及统计分析[J]. *地学前缘*, 19(4): 214~226.
- 郑永飞, 徐宝龙, 周根陶. 2000. 矿物稳定同位素地球化学研究[J]. *地学前缘*, 7(2): 299~320.
- 周学武, 李胜荣, 鲁力, 等. 2005. 辽宁丹东五龙矿区石英脉型金矿床的黄铁矿标型特征研究[J]. *现代地质*, 19(2): 231~238.
- 周文雅. 2001. 细微浸染型金矿床中黄铁矿的标型特征及意义[J]. *岩矿测试*, 20(2): 100~104.
- 周学武, 李胜荣, 鲁力, 等. 2004. 浙江弄坑金银矿区黄铁矿成分标型研究[J]. *矿物岩石*, 24(4): 6~13.

## 附中文参考文献

- 丰淑庄, 左大华, 梅建明. 1985. 浙江某金矿床自然金和载金矿物的研究[J]. *地质与勘探*, 21(1): 41~44.
- 郭利军, 谢玉玲, 侯增谦, 等. 2009. 内蒙古拜仁达坝银多金属矿床地质及成矿流体特征[J]. *岩石矿物学杂志*, 28(1): 26~36.
- 李红兵, 曾凡治. 2005. 金矿中的黄铁矿标型特征[J]. *地质找矿论*