

文章编号 10258-7106 (2009) 01-0042-11

德兴金山金矿床成矿流体来源:小尺度构造和同位素地球化学证据*

李晓峰¹, 易先奎², 朱和平³

(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 江西有色地质矿产开发院, 江西 南昌 330001; 3 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100055)

摘 要 德兴金山金矿床位于扬子板块和华南克拉通之间的江南造山带东段赣东北深大断裂带的次级剪切带中, 是一个与韧-脆性剪切带有关的超大型金矿床。金山金矿床的矿石类型包括蚀变岩型和含金石英脉型, 均为与断裂(或者裂隙)充填有关的不同尺度石英脉系统。纹层状和透镜状含金石英脉结构表明金山金矿床的成矿作用是同构造的, 金的矿化与递进变形作用密切相关, 变形过程中产生的变质流体参与了成矿作用。石英-钠长石-铁白云石-黄铁矿蚀变带中与金共生的黄铁矿流体包裹体的³He/⁴He 比值为 0.13~0.24 Ra, ⁴⁰Ar/³⁶Ar 比值变化范围为 575~1 090, 说明成矿流体主要以地壳端员的流体为主, 有很少量的地幔流体参与。铁白云石的碳、氧同位素值分别变化于-5.0‰~-4.2‰和 4.4‰~8.0‰之间, 与世界上大多数脉状金矿床的碳、氧同位素值基本一致。含金石英脉中石英的氧同位素变化于 12.4‰~15.3‰之间, 其中的流体包裹体氢同位素值变化于-62‰~-73‰。根据这些同位素地球化学数据, 结合金山金矿床小尺度地质构造特征, 笔者认为金山金矿的成矿流体主要为变质流体, 并有少量地幔流体和大气降水的参与。金山金矿形成于地体碰撞过程中的转换压缩汇聚构造背景中。

关键词 地质学; He、Ar 同位素; 成矿流体; 显微构造; 金山金矿; 江西

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

Source of ore-forming fluids in Jinshan gold deposit of Dexing County: Constraints from microstructures and stable isotopes

LI XiaoFeng¹, YI XianKui² and ZHU HePing³

(1 MRL Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 Jiangxi Institute of Geological Exploration for Mineral Resources of Nonferrous Metals, Nanchang 330001, Jiangxi, China; 3 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

The Jinshan gold deposit, a superlarge deposit with 200 t Au, is hosted in the Jinshan ductile shear zone and located in the northeast Jiangxi deep crustal fault. The zone is a magnificent Neo-Proterozoic mélange-suture zone. The mineralized fault-filling quartz veins that were elongated and boudinaged along with mylonitic foliations serve as main ore bodies. Textural and structural data indicate that mineralization was syn-tectonic, and the opening of the foliation planes played a fundamental role in facilitating gold mineralization. Auriferous quartz veins were laminated due to repeated foliation opening and fluid filling and precipitation. Banded and laminated

* 本文得到国家自然科学基金项目(编号: 40403006, 40872065)和留学人员短期回国讲学专项(编号: 40610404013)资助。
第一作者简介: 李晓峰, 男, 1971 年生, 博士, 主要从事金属矿床地质地球化学研究工作。Email: x-f-li@hotmail.com
收稿日期: 2008-11-03; 改回日期: 2008-12-08。张绮玲编辑。

textures suggest a crack and seal mechanism for gold precipitation and the continuation of the shear deformation during the emplacement of the veins. This means that progressive deformation is closely associated with gold mineralization. Fluid inclusions in pyrite associated with quartz have $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios of 0.13~0.24 Ra, whereas their $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratios are from 575 to 1 090. $\delta^{18}\text{O}$ values calculated from quartz are between 5.5‰ and 8.4‰, and δD values of the fluids in the fluid inclusions of quartz are between -61‰ and -73‰. The $\delta^{13}\text{C}$ values of ankerite range from -5.0‰ to -4.2‰, whereas the $\delta^{18}\text{O}$ values range from 4.4‰ to 8.0‰. These ranges demonstrate a mixing of mantle-derived fluids and crustal-derived fluids. The crustal end-member is composed of metamorphic water and meteoric water. The microstructures along with noble gas isotope (He and Ar) data as well as stable isotope (C, O and D) data strongly suggest that diverse sources were involved in the hydrothermal activity in the Jinshan gold deposit. Ore-forming fluids were dominantly derived from the crustal source with the participation of less than 5% mantle components. The deposit was formed in a transpressive tectonic setting.

Key words: geology, noble gas isotope(He and Ar), ore-forming fluid, microstructure, Jinshan gold deposit, Jiangxi Province

金山金矿田位于扬子板块和华南克拉通之间的江南造山带东段赣东北深大断裂带的次级剪切带中,是一个与韧-脆性剪切带有关的超大型金矿床(韦星林,1995a;1995b)(图 1a),主要由金山、花桥、八十源等矿床组成(以下简称金山金矿),其采矿历史最早可追溯到北宋年间。江西有色地质勘查局四队从 20 世纪 70 年代开始在金山开展地质勘查工作。1976 年在金山金矿硐中发现高品位含金石英脉;1979 年发现蚀变岩型金矿;1989 年提交《德兴县金山金矿区湾家坞-香菇棚-金矿硐岩金勘探地质报告》,提交金矿储量 4 余吨,控制金资源量 20 余吨。1994 年至今,江西省有色地质勘查局先后完成金山外围石碑、西矿、西蒋深部、石坞、朱林西、雷高雾等矿区金矿普查(详)查地质工作^①。目前,整个金山矿田已探明金矿资源储量 190 多吨,远景可达 300 t 以上,成为华南地区最大的岩金资源基地。金山金矿最初由大茅山垦殖场于 1986 年筹建并进行开采,初期开采规模为 100 吨/日,2002 年扩成 2 000 吨/日。2005 年中国黄金总公司成为金山金矿控股股东后,该矿山达到 5 000 吨/日的规模,成为年产黄金 5 t 的大型生产矿山。

前人对金山金矿的成矿流体进行了大量的研究工作(黄宏立等,1990;季峻峰等,1994a;1994b;张文淮等,1998;曾键年等,2001;华仁民等,2002),对其成因有 2 种认识:①岩浆热液成因(黄宏立等,1990);②变质热液成因(韦星林,1995a;1995b;万昌林,1997;王可勇等,1999;Li et al.,2003)。另外,一

些学者也认为有大气降水参与了成矿作用,如季峻峰等(1994a;1994b)。本文在野外宏观构造和室内显微构造观察和研究的基础上,结合与金密切共生的黄铁矿稀有气体同位素、铁白云石碳、氧同位素以及石英氢、氧同位素数据,对金山金矿的成矿流体来源及其特点提出了新的认识。

1 区域地质

金山金矿所在的赣东北地区位于江南造山带(又称江南古陆)东段,北面是扬子板块,南面是华南褶皱系,东面则是同属江南造山带的江(山)绍(兴)地区。区域出露地层有中元古界双桥山群、新元古界登山群、南华系志堂组、下寒武统荷塘组、下侏罗统林山组和鹅湖岭组,以及白垩系石溪组(图 1)。其中,中元古界双桥山群出露面积广泛,约占全区面积的 70%。双桥山群由一套浅变质的火山碎屑沉积岩夹变质火山熔岩组成,分为不同成因类型、产于不同大地构造环境的上、下亚群。其中,双桥山下亚群以深海相泥砂质及火山碎屑复理石建造为主,属于稳定的大陆边缘沉积岩系(1 515 Ma)(刘英俊等,1989;1993);而上亚群为一强烈活动的板块边缘沉积岩系(1 371 Ma)(江西省地质矿产局,1984),以灰绿色变质火山浊积岩与火山熔岩为特征。新元古界登山群为近海湖盆陆相火山-碎屑岩建造,南华系志堂组主要为近海湖盆碎屑岩建造,下寒武统荷塘组为碳酸盐岩建造,而下侏罗统林山组为河漫滩相-湖

① 江西省有色地质勘查四队,1996。江西省德兴市新营-花桥金矿概查地质报告,24-28(内部资料)。

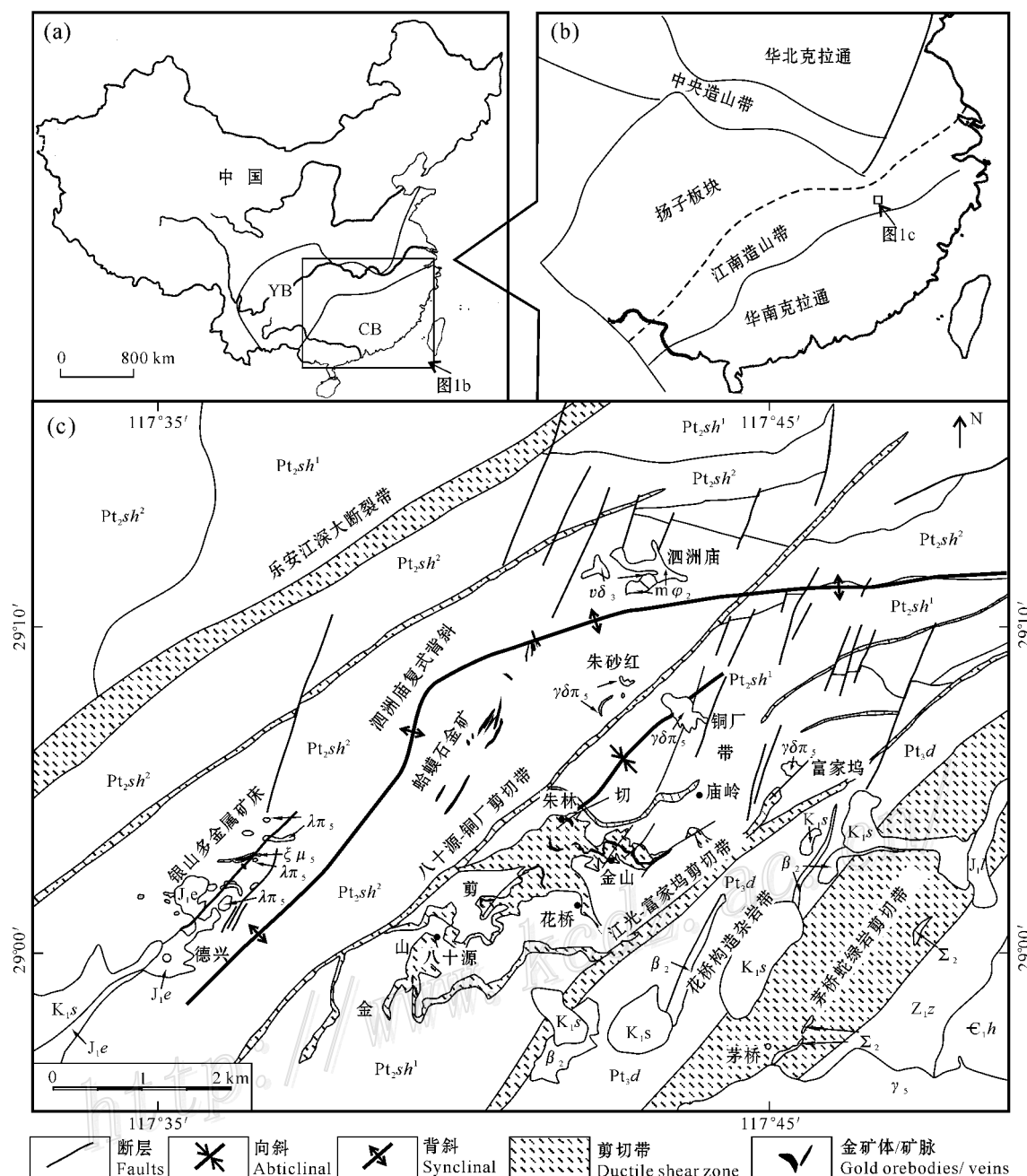


图 1 江西金山金矿大地构造位置(a、b)及地质简图(c)(据江西地质勘查公司四队,1996^①修改)

K_1s —白垩系石溪组; J_1e —下侏罗统鹅湖岭组; J_1l —下侏罗统林山组; ϵ_1h —寒武系荷塘组; Z_1z —南华系志堂组; Pt_3d —新元古界登山群; Pt_2sh^2 —中元古界双桥山上亚群; Pt_2sh^1 —中元古界双桥山下亚群; ξ_{μ_5} —早侏罗世英安斑岩; $\lambda\pi_5$ —早侏罗世石英斑岩; $\gamma\delta\pi_5$ —中侏罗世花岗闪长岩; γ_5 —中-晚侏罗世花岗岩; $\nu\delta_3$ —元古代辉石闪长岩; β_2 —新元古代变细碧角斑岩; Σ_2 —新元古代超镁铁质岩; $m\varphi_2$ —新元古代变余角闪辉石岩; YB—扬子板块; CB—华南克拉通

Fig. 1 Geotectonic (a, b) and geological map (c) of the Jinshan gold deposit, Jiangxi Province (modified after No. 4 Geological Party, Jiangxi Institute of Geological Exploration for Mineral Resource of Nonferrous Metals, 1996)

K_1s —Cretaceous Shixi Formation; J_1e —Lower Jurassic Ehuling Formation; J_1l —Lower Jurassic Linshan Formation; ϵ_1h —Cambrian Hetang Formation; Z_1z —Zhitang Formation of Nanhua System; Pt_3d —Neoproterozoic Dengshan Group; Pt_2sh^2 —Upper Mesoproterozoic Shuangqiaoshan Group; Pt_2sh^1 —Lower Mesoproterozoic Shuangqiaoshan Group; ξ_{μ_5} —Early Jurassic dacite porphyry; $\lambda\pi_5$ —Early Jurassic quartz porphyry; $\gamma\delta\pi_5$ —Middle Jurassic granodiorite; γ_5 —Middle-Late Jurassic granite; $\nu\delta_3$ —Paleoproterozoic pyroxenite diorite; β_2 —Neoproterozoic metaspilite keratophyre; Σ_2 —Neoproterozoic ultramafic rock; $m\varphi_2$ —Neoproterozoic blasto-amphibole pyroxenite; YB—Yangtze plate; CB—South China craton

① 江西省有色地质勘查四队. 1996. 江西省德兴市新营-花桥金矿概查地质报告. 24-28 (内部资料).

泊沼泽相碎屑岩建造。鹅湖岭组为陆相火山岩建造,其底部为千枚质砾岩,中部为流纹质集块角砾岩和角闪流纹熔岩,上部为英安质集块岩和英安质熔岩。白垩系石溪组主要为陆相红色碎屑建造(江西银山铜铅锌金银矿床编写组,1996)。

赣东北深大断裂带、乐安江深大断裂带及泗洲庙复式向斜三者构成本区基本构造格架(图1c)。在赣东北深大断裂和乐安江断裂之间发育着次一级NNE向的八十源-铜厂韧性剪切带和江光-富家坞韧性剪切带。而金山剪切带主要由几组近于平行的近EW向韧-脆性剪切带组成,夹持于八十源-铜厂韧-脆性剪切带和江光-富家坞韧-脆性剪切带之间。

区域岩浆活动频繁,主要有新元古代早期海相安山质火山碎屑岩和基性火山熔岩。早侏罗世陆相潜火山岩石英斑岩、英安斑岩(183 Ma, Li et al., 2007a)和中侏罗世花岗闪长斑岩(171 Ma, 王强等, 2004),以及中-晚侏罗世黑云母花岗岩和花岗闪长岩等(江西银山铜铅锌金银矿床编写组,1996)。伴随着大规模的岩浆活动,德兴地区形成了一套与早侏罗世潜火山岩有关的Pb-Zn-Ag-Cu-Au矿床(矿床年龄179 Ma, Li et al., 2007a)和与中侏罗世花岗闪长斑岩有关的斑岩铜矿床(矿床年龄170 Ma, Lu et al., 2005)。

2 矿床地质特征

金山金矿田(图1)位于赣东北深大断裂带次一级的金山韧-脆性剪切带中。剪切带由数条近于平行的韧-脆性剪切带组成,分别控制着金山、花桥和八十源等金矿床的产出。矿田赋矿地层为中元古界双桥山群下亚群浅变质岩系。

矿田内宏观变形构造以推覆型剪切带的多层叠置为特征。剪切带规模大小悬殊,宽度由0.1 m到650 m不等,呈带状、扁豆状尖灭再现,倾向变化于NW向、NE向之间,倾角为5~35°,呈舒缓波状起伏,沿倾向呈舒缓台阶状延深,与矿田边缘区域性NE向走滑型剪切带低角度渐变交接(韦星林, 1995a; 1995b)。

矿体严格受剪切带控制,金矿体赋存在位于剪切带应变中心部位的石英、钠长石-黄铁矿-铁白云石化-金矿化带中。赋矿剪切带可出现多应变矿化中心,而每一条矿化中心往往有多条矿体叠置产出。矿体形态以似层状为主,板柱状、透镜状次之,产状

与主剪切面(平行C面理)平行起伏。一般厚度为1.2~6.0 m,平均3.5 m左右,最厚可达16.28 m。矿石金品位变化比较大,一般为6 g/t左右,单样最高品位达1 687 g/t。

金山金矿田具有变形-蚀变-矿化作用一体化的特征。围岩蚀变主要有硅化、钠长石化、黄铁矿化、绢云母化、绿泥石化和碳酸盐化。其中,硅化和黄铁矿化与金矿化的关系密切。根据岩石的变形变质作用、矿物的共生组合关系,围岩蚀变由内向外可以分为3个带:①石英-钠长石-铁白云石-黄铁矿化带,该蚀变组合产于应变最强烈的主剪切面附近,垂向厚度从数米到数十米不等,一般不超过50 m。特征矿物是钠长石和铁白云石。该蚀变带金矿化较强。②石英-绢云母-铁白云石化带。此蚀变组合产于石英-钠长石-铁白云石-黄铁矿化带的两侧,垂向厚度近百米。特征矿物是绢云母和铁白云石。③绿泥石-方解石-绢云母化带。该组合产于变形带的最外带,范围广,但不超出剪切带的范围。特征矿物是绿泥石和方解石。

矿石类型有星散浸染状蚀变岩型(硅化、黄铁矿化、铁白云石化)和含金石英脉型两大类,其中糜棱岩型矿石占总储量的75%。蚀变岩型矿石中金的品位在3~10 g/t,而石英脉型矿石中金的品位在5~20 g/t。矿石矿物组合简单,硫化物的含量<3%,其中黄铁矿占90%以上。除黄铁矿外,还有磁铁矿、赤铁矿、毒砂、闪锌矿、黄铜矿和方铅矿等,脉石矿物主要有石英,其次为绢云母、钠长石、铁白云石和绿泥石等。黄铁矿是最主要的金属矿物和载金矿物。自然金是唯一的金矿物,成色高(953.6~969.4),以细粒单体金(占85.1%~91.21%)为主。金主要以不规则状、他形粒状、脉状、片状成群嵌布于黄铁矿及石英的粒间和显微裂隙中,有时可见明金(图2a)。在显微镜下可以观察到金在黄铁矿边缘出现(图2b),或呈细脉状或不规则叶片状穿插于黄铁矿裂隙中(图2c),有时在黄铁矿附近的石英颗粒中也会有自然金颗粒出现(图2d)。

3 小尺度构造与金的成矿作用

金山金矿含金石英脉主要表现为细小的石英脉和粗大的石英脉以及厚度介于两者之间的石英脉组成,类似于Robert等(2001)提出的纹层状断裂充填的石英脉(laminated fault-fill veins)、席状石英脉(sheeted veinlets)和单脉(isolated veinlets)等,其区别

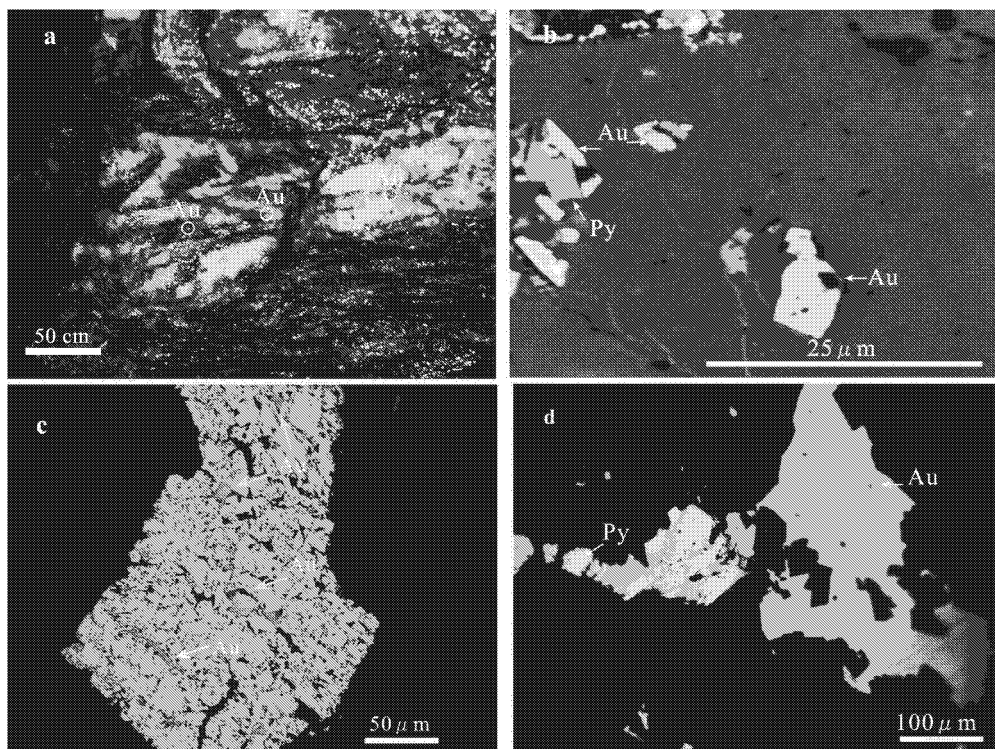


图 2 金与石英、黄铁矿的关系

a. 含金石英脉中的明金 ; b. 围绕黄铁矿颗粒边缘生长的金和独立的金颗粒 ; c. 金沿黄铁矿的裂隙生长 ; d. 金与黄铁矿的同沉淀特征

Fig. 2 Microphotographs showing gold-quartz-pyrite association in the Jinshan deposit

a. Visible gold grains in gold-bearing veins ; b. Gold in quartz grains ; c. Gold-filled fractures in pyrite ; d. Gold co-precipitated with pyrite

在于石英脉体与围岩所占相对比例的多少。纹层状石英脉主要由石英条带和由片理化的围岩碎片组成。在厘米级尺度上,蚀变糜棱岩型矿石也可以归属于石英脉系统。因此,金山金矿的矿石类型可以归属于不同尺度上与断裂(或者裂隙)充填有关的石英脉系统(李晓峰等,2007)。

在宏观构造上,含金石英脉或平行于片理、或为拉长透镜体化(布丁化),而拉长透镜体化表明含金石英脉形成过程中存在递进变形作用,即含矿的石英脉的形成过程中或者形成之后仍然存在强烈的韧性剪切变形作用,因此,从宏观尺度上来说,含金石英脉是同构造的。

在微观构造上,剪切带内变形变质的产物“糜棱岩”的原岩实际上是一种细粒的石英绢云母片岩或绢云母石英片岩,其片理主要表现为新生矿物绢云母的定向排列,绢云母的定向排列可形成典型的交织结构。石英碎屑普遍发生动态重结晶作用。动态重结晶形成的亚颗粒(和新颗粒)可形成石英条带。

变形越高,石英的动态重结晶程度越高,颗粒越细,片理化越强。除少部分长石碎屑发生双晶弯曲外,大部分长石碎屑普遍未受变形变质作用的影响。显微镜下,常可观察到石英碎屑的压溶作用以及黄铁矿颗粒边缘由石英或者绢云母等矿物形成的压力影构造。在微观尺度上,含金石英脉表现为石英的塑性变形,如采自阳山矿床井下高品位的含金石英脉中发育显微尺度的剪切带,剪切带内表现为粗颗粒石英的强烈动态重结晶现象,如石英颗粒亚颗粒化,亚颗粒石英条带化。微剪切带外的粗颗粒石英也大多形态不规则或边界呈锯齿状,晶内塑性变形强烈,如普遍发育的变形纹、不规则消光等现象。这些现象充分表明含金石英脉的形成及演化与剪切带的递进变形紧密相关。另外,压力影矿物绢云母形成的“书斜构造”也说明了递进变形作用的发生。因此,从微观尺度上,含金石英脉是同构造的。故从不同尺度的构造特征来看,金山金矿是递进变形作用的产物。

4 同位素地球化学

用于同位素分析的黄铁矿、铁白云石和石英分别采自阳山区段 130 m 中段、50 m 中段以及 170 m 标高露天开采的金矿石。在双目镜下,分别挑选出石英、黄铁矿和铁白云石矿物,纯度达 99%。测试分析工作在中国地质科学院同位素实验室完成。有关黄铁矿的 He-Ar 同位素分析、铁白云石的碳、氧同位素分析以及石英的氢、氧同位素分析方法参见李晓峰等(2004)文献。

4.1 黄铁矿流体包裹体的 He、Ar 同位素

用硫化物流体包裹体的 He、Ar 同位素示踪成矿流体来源已在矿床成因研究中得到了较为广泛的运用。地壳端员³He/⁴He 比值为 0.01~0.05 Ra,而地幔端员³He/⁴He 比值为 5~6 Ra(Tolstikhin, 1987),两者的³He/⁴He 比值相差较大,因而在成矿流体作用过程中,即使有少量的地幔端员组分流体的加入,也会导致成矿流体中的³He/⁴He 比值有较大的变化。已有的研究表明,地幔流体在一些金矿和铜矿的成矿作用过程中扮演着重要的角色,如青藏高原东缘大渡河金矿(李晓峰等,2004;Li et al.,2007b)、乌兹别克斯坦 Muruntau 金矿(Graupner et al.,2006)、中国西部红河成矿带(Burnard et al.,1999)、美国西部斑岩铜矿带(Kendrick et al.,2001)等,在这些矿床的形成过程中,来自地幔端员的流体或多或少地参与了成矿作用。

金山金矿黄铁矿流体包裹体氦、氩同位素分析结果列于表 1,由表可知,金山金矿黄铁矿流体包裹体的³He/⁴He 比值在 0.13~0.24 Ra 之间,变化范围较小,而⁴He 的含量变化范围较大,一般在 12.6×10⁻⁶~851.1×10⁻⁶cm³STP/g 之间。与³He/⁴He 相比,黄铁矿流体包裹体中⁴⁰Ar/³⁶Ar 比值变化范围较宽,在 575~1 090 之间,⁴⁰Ar 的含量变化在 0.35×10⁻⁷~23.5×10⁻⁷cm³STP/g 之间。

本次研究用于 He、Ar 同位素测试的样品均采自于地下坑道,因而可以排除黄铁矿流体包裹体中存在宇宙成因的³He 的可能性(Simmons et al.,1987; Stuart et al.,1995),同时,由于研究区缺乏含锂的矿物,因此,由含锂矿物诱发而产生³He 对流体中氦浓度的影响,可以忽略不计。大气对流体中氦浓度的影响程度,可以根据参数 F⁴He 来判断(Kendrick et al.,2001)。F⁴He 为样品中⁴He/³⁶Ar 与大气中⁴He/³⁶Ar 的比值(大气的⁴He/³⁶Ar=0.1655)。假如样品中含有大气氦,则 F⁴He=1。而金山金矿黄铁矿流体包裹体中 F⁴He 远远大于 1,因此可以排除流体包裹体中大气对氦的混染作用。在所有样品数据中,R/Ra 比值变化比较小,而⁴He 含量变化范围比较大,说明由于扩散作用和地层中产生的⁴He 所导致的 R/Ra 比值降低可以忽略不计,同时在对与黄铁矿共生的石英流体包裹体研究中发现,在石英颗粒中液相流体包裹体和气相流体包裹体是共存的。因此,黄铁矿流体包裹体 He、Ar 同位素分析结果能够代表黄铁矿形成时成矿流体的 He、Ar 同位素组成。从测试数据来看,金山金矿成矿流体来源表现出地幔端员和地壳端员混合来源的特征。

利用地幔流体和地壳流体简单的二元混合模式,计算得到成矿流体中地幔端员的流体比例在 1.6%~3.5% 之间,说明成矿流体中的氦绝大部分来自地壳。地壳端员来源的流体在成矿作用中占主导地位,只有极少地幔端员来源的流体参与了成矿作用。

黄铁矿流体包裹体中⁴⁰Ar/³⁶Ar 的比值在 575~1 090 之间,远远大于大气降水的⁴⁰Ar/³⁶Ar 比值(298),这说明放射成因的⁴⁰Ar* 主要来自地壳或者地幔端员。⁴⁰Ar*/⁴He 的变化范围在 0.01~0.05,远远低于地壳端员的⁴⁰Ar*/⁴He(0.2)。由图 3 可以看出,⁴⁰Ar*/⁴He 与 R/Ra 具有明显的相关关系,说明⁴⁰Ar*/⁴He 和³He/⁴He 的变化受相同地质因素的影响。而前述已知³He/⁴He 的变化受地壳端员流体

表 1 金山金矿黄铁矿流体包裹体的氦、氩同位素组成

Table 1 Helium and argon isotopic data of fluid inclusions in pyrite from the Jinshan gold deposit

样品编号	³ He/ ⁴ He/10 ⁻⁷	⁴ He/10 ⁻⁶ cm ³ STP/g	R/Ra	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	⁴⁰ Ar/10 ⁻⁷ cm ³ STP/g	⁴⁰ Ar*/ ⁴ He
J05	2.57	232.39	0.19	575	23.52	0.05
J10	3.35	76.10	0.24	869	5.70	0.05
J14	3.31	40.62	0.24	819	2.96	0.05
J16	1.80	147.91	0.13	1 090	2.60	0.01
J20	3.25	851.12	0.24	923	19.35	0.02
HQ-1	2.63	12.60	0.19	1 058	0.35	0.02

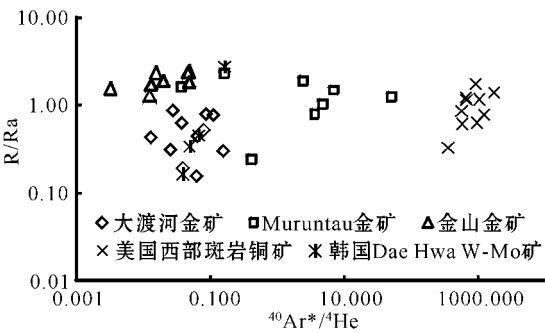


图 3 黄铁矿流体包裹体⁴⁰Ar^{*}/⁴He 与 R/Ra 图解

Fig. 3 ⁴⁰Ar^{*}/⁴He versus R/Ra diagram for fluid inclusions in pyrites. Data sources for Ailaoshan Au deposit (Burnard et al. , 1999) , Dae Hwa W-Mo deposit (Stuart et al. , 1995) , porphyry Cu deposit (Kendrick et al. , 2001) , USA , Daduhe Au deposit (Li et al. , 2007b) and Muruntau Au deposit (Graupner et al. , 2006)

和地幔端员流体混合作用的影响,因此,⁴⁰Ar^{*}/⁴He的变化也受地壳端员和地幔端员流体的影响,但主要受地壳端员来源流体的影响,因为成矿流体中极少有地幔流体的参与。高含量的⁴He(即⁴⁰Ar^{*}/⁴He比值低于地壳端员)可能是低温的流体在运移过程中优先吸收地壳中放射成因⁴He的结果。

4.2 铁白云石的碳、氧同位素

金山金矿石英-钠长石-铁白云石-黄铁矿蚀变带金矿中铁白云石的碳、氧同位素变化范围分别在-5.0‰~-4.2‰和4.4‰~8.0‰之间(表2),与世界上其他地区不同时代脉状金矿的碳同位素组成基本一致(δ¹³C值为-23‰~2‰)。虽然世界范围内脉状金矿碳、氧同位素变化范围较宽,但是具体到单一矿床,其碳、氧同位素变化范围则比较窄,如乌兹别克斯坦 Muruntau 金矿(δ¹³C值为-4.9‰~-8.5‰,δ¹⁸O为12.5‰~18.2‰)。从数据看,金山金矿铁白云石的碳、氧同位素与邻区德兴斑岩铜矿(δ¹³C -4.8‰~-6.25‰,δ¹⁸O为6.8‰~18.8‰,Li et al. ,2007c)和银山多金属矿床(δ¹³C为-4.3‰~

表 2 金山金矿铁白云石碳、氧同位素

Table 2 Carbon and oxygen isotope data of ankerites in the inner alteration zone of the Jinshan gold deposit

样品编号	矿物	δ ¹³ C _{V-PDB} /‰	δ ¹⁸ O _{V-PDB} /‰	δ ¹⁸ O _{V-SMOW} /‰
J08	铁白云石	-5.0	-22.9	7.3
J11	铁白云石	-4.2	-25.7	4.4
J18	铁白云石	-4.9	-22.2	8.0

表 3 金山金矿含金石英脉中石英及其流体包裹体的氢、氧同位素组成

Table 3 Oxygen and hydrogen isotope data of quartz and its fluid inclusions from auriferous quartz vein

样品编号	矿物	δ ¹⁸ O _{石英} /‰	δD _水 /‰	δ ¹⁸ O _水 /‰
HQ-1	石英	15.3	-62	8.4
HQ-2	石英	13.2	-73	6.3
J08	石英	12.4	-65	5.5
J10	石英	14.6	-66	7.7
J13	石英	13.4	-73	6.5
J15	石英	14.9	-69	8.0
J20	石英	14.3	-68	7.4

-7.6‰,δ¹⁸O为11.5‰~18.8‰,江西银山铜铅锌金银矿床编写组,1996)的碳、氧同位素数据大不相同。德兴斑岩铜矿和银山多金属矿床是典型的与岩浆热液活动有关的矿床,从碳、氧同位素数据来看,基本可以排除金山金矿是与岩浆热液有关的矿床。

4.3 石英及其流体包裹体的氢、氧同位素

金山金矿含金石英脉中石英及其流体包裹体的氢、氧同位素结果列于表3。由表可知,金山金矿与黄铁矿共生石英的氧同位素值为12.4‰~15.3‰,石英流体包裹体氢同位素值为-62‰~-73‰。根据金山金矿石英的变形温度以及石英流体包裹体的均一温度(平均温度300℃),利用1000lnα_{quartz-H₂O} = 3.38×10⁻⁶T²-3.4(Clayton et al. ,1972)分馏公式计算石英流体包裹体水的氧同位素,结果由表3

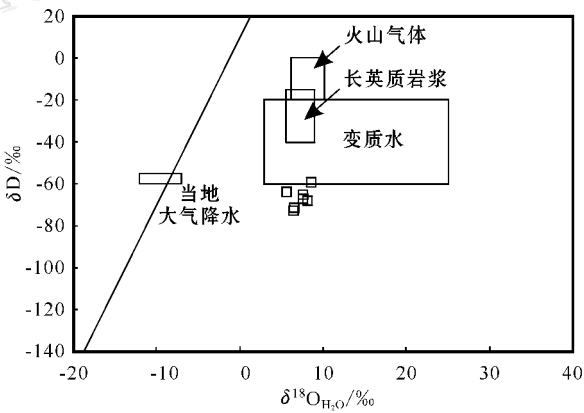


图 4 石英流体包裹体的 δD_{SMOW} 与 δ¹⁸O_{H₂O} 图解

Fig. 4 δD_{SMOW} versus δ¹⁸O_{H₂O} diagram of fluid inclusions in auriferous quartz. The fields are simplified metamorphic fluids after Taylor (1974) , mantle-derived fluid fields (Rollinson , 1993) , volcanic vapors , felsic magma , and magmatic water (Hedenquist et al. , 1994)

可知,金山金矿石英流体包裹体中氧同位素变化范围在 $5.5\text{‰} \sim 8.4\text{‰}$,与世界上太古代和元古代脉状金矿的成矿流体氢、氧同位素组成一致($\delta^{18}\text{O}$ 值为 $6\text{‰} \sim 11\text{‰}$, δD 值为 $-30\text{‰} \sim -80\text{‰}$,如 Mother 脉状金矿、Alaska 金矿)。在 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 与 δD 投影图中(图4)(Taylor, 1974),投影点位于变质水下方,说明成矿流体可能来源于变质流体。

5 讨论

5.1 金山金矿成矿的构造背景

世界上绝大多数脉状金矿床均形成于区域尺度切割岩石圈地体边界的构造附近,而这些垂向上的地体边界构造则代表了成矿作用的地震泵系统。这些构造或多或少地记录了推覆、转换压缩和转换伸展等多重位移轨迹。McCuaig 等(1998)认为脉状金矿形成需要特殊的地球动力学背景,而这个特定的地球动力学背景就是与外来地体的转换、压缩、汇聚背景,或者与先存的大陆边缘环境有关,如 Cordilleran 造山带。

金山金矿赋存于赣东北中元古代基底构造中,而赣东北元古代基底构造是江南中-新元古代造山带的一部分。赣东北元古代基底构造区以赣东北断裂为界,北西侧为九岭地体,南东为怀玉地体(刘英俊等,1993)。九岭地体为扬子板块的边缘带,是一个裂解的大陆边缘碎块。由于拉伸作用,使其脱离扬子板块,成为扬子大陆的边缘碎块。怀玉地体在其演化早期为大陆边缘海,晚期成为火山岛弧。新元古代向九岭地体碰撞拼贴于九岭地体之上。由赣东北东乡至皖南歙县分布的赣东北蛇绿混杂岩带则是2个地体缝合带的标志(舒良树等,1995)。九岭地体和怀玉地体在地质演化历史及沉积建造类型上,均有明显的差异。九岭地体中元古代的构造环境为被动大陆边缘,其沉积建造类型属于亲陆壳型岩石组合,以石英砂岩-页岩-钙质页岩为代表,而怀玉地体的沉积建造类型为亲洋壳岩石组合,以蛇绿岩带和深海相的火山碎屑浊积岩为代表。在赣东北地区,韧性剪切带只产生在中、新元古代地层中,尚未在震旦纪和更晚时代的地层中发现糜棱岩化和韧性剪切变形。怀玉地体中地层倾滑推覆韧性剪切和流变形现象远比九岭地体明显。地体边界的地层岩石剧烈变形,远离拼贴带地体内部岩层也都普遍发生强烈的剪切变形。层间褶皱、不协调褶皱比较

普遍,挤压透镜体、拉伸石香肠等到处可见。在怀玉地体内部,深成岩浆活动微弱。在中、新元古代之前没有发育深成花岗岩体(舒良树等,1995)。因此,金山金矿在新元古代所处的地球动力学背景是碰撞过程中的转换汇聚背景。

在区域尺度上,金山金矿位于赣东北深大断裂旁侧;在矿田尺度上,金矿床位于次一级断裂八十源-铜厂断裂和江光-富家坞断裂以及泗洲庙向斜组成的构造格架内;在矿床尺度上,矿床受近EW向剪切带的控制,位于第三级脆-韧性剪切带中。这些断层是低应力集中区,热液流体的流量比较大;在矿体尺度上,金矿体主要位于构造的弯曲、走滑以及扩展阶步等构造面。单个石英脉的纹层构造说明了金成矿作用过程中破裂-愈合过程的不断发生,也就是脆-韧性环境的不断转换。而含金石英脉中微剪切带的发育也说明了成矿作用与递进变形作用有关。

5.2 成矿流体来源

前人认为金山金矿成矿流体有以下几种来源:①来源于岩浆水+变质水(黄宏立等,1990);②来源于变质水+大气降水(季峻峰等,1994);③来源于建造水和大气降水(王秀章等,1999);④来源于变质水(王可勇等,1999)。金山金矿田内无大规模的火成岩体,岩浆活动微弱。从岩石地球化学特征来看,金山金矿岩石的 K/Rb 、 K/Ba 比值分别为 $110 \sim 350$ 和 $14 \sim 59$,与地壳的 K/Rb 、 K/Ba 比值基本一致(地壳的 K/Rb 为 $130 \sim 430$,平均286; K/Ba 比值为 $34 \sim 97$,平均37),但与邻区岩浆热液成因的德兴斑岩铜矿岩石的 K/Rb ($9 \sim 14$)、 K/Ba ($152 \sim 242$)比值明显不同,这说明在金山金矿成矿作用过程中,岩浆流体不占主导地位。

黄铁矿流体包裹体He同位素表明成矿流体主要来源于地壳,这与强烈蚀变岩石的Sr同位素和黄铁矿的Sr同位素来源于地壳的结果是一致的(韦星林,1996)。黄铁矿流体包裹体的He、Ar同位素表明成矿流体中有低温($<200^\circ\text{C}$)的流体参与成矿作用。石英的氢、氧同位素表明变质水和大气降水参与了成矿作用。黄铁矿流体包裹体中含 ^3He 稍高的原因可能是地幔组分流体沿赣东北深大断裂上升参与成矿作用的结果。在 $^3\text{He}/^{36}\text{Ar}$ 与 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 图解(图5)中,可以看出投影点落于地幔流体、变质流体和大气降水端元流体之间。在用最小二乘法拟合的直线上,当 $^3\text{He}/^{36}\text{Ar} = 5 \times 10^{-8}$ (雨水值)时, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 估计值高于大气降水的氩同位素组成($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} =$

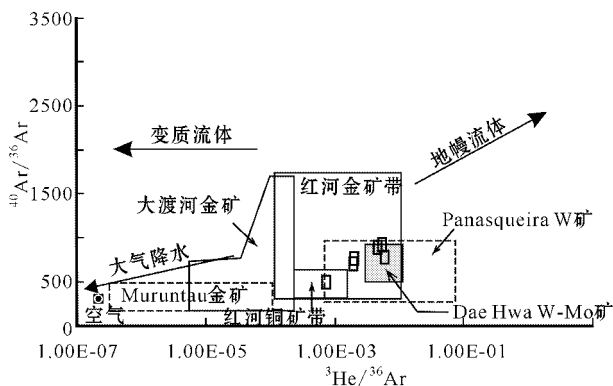


图 5 黄铁矿流体包裹体的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 与 $^3\text{He}/^{36}\text{Ar}$ 图解

Fig. 5 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ versus $^3\text{He}/^{36}\text{Ar}$ diagram for fluid inclusions in pyrite (Data sources as for Fig. 3)

295.5),说明地壳端员的流体含有放射成因的 ^{40}Ar 。张文淮等(1998)认为金山金矿石英流体包裹体中存在深部流体所特有的高盐度和纯 CO_2 的流体。笔者对石英流体包裹体的测试结果也显示,其中几乎不含Br和I,因此,可以排除盆地卤水或者建造水参与成矿作用的可能性。

6 结 论

从以上研究结果可以得出以下2点认识。

(1)从不同尺度构造和岩石流变学角度来看,金山金矿的形成与岩石的递进变形作用密切相关,形成于脆-韧性转换的过程中,与板块碰撞过程中的转换、压缩、汇聚有关。

(2)黄铁矿流体包裹体的He、Ar同位素组成、铁白云石碳、氧同位素组成及石英及其流体包裹体的氢、氧同位素组成表明,金山金矿的成矿流体主要为变质流体,并有少量的大气降水和地幔流体的参与。

志 谢 在野外工作期间,得到了江西有色地质勘查局韦星林副局长和金山金矿张开平副矿长的大力支持以及金山金矿地质测量科地质同行的热情帮助,在此深表谢意。

References

Burnard P G, Hu R, Turner G and Bi X W. 1999. Mantle, crustal and atmospheric noble gases in Ailaoshan gold deposits, Yunnan Province, China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, 1595-

1604.
Clayton K N, O'Neil J R and Mayeda T K. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water [J]. *Journal of Geophysical Research*, 77: 3057-3067.
Graupner T, Niedermann S, Kemper U and Klemd R. 2006. Origin of fluids in the Muruntau gold system: constraints from noble gas, carbon isotope and halogen data [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70: 5356-5370.
Hedenquist J W and Lowenstern J B. 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits [J]. *Nature*, 370, 519-527.
Hua R M, Li X F, Zhang K P, Qiu D T and Yang F G. 2002. Geochemical features of ore-forming fluid in the Jinshan gold deposit, Jiangxi Province [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 38(3): 408-417 (in Chinese with English abstract).
Huang H L and Yang W S. 1990. Geological characteristics and genesis of Jindshan gold deposit in the northeast Jiangxi Province [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 52(2): 29-39 (in Chinese with English abstract).
Ji J F, Liu Y J, Sun C Y and Qiu D T. 1994a. Geochemical characteristics of auriferous quartz vein in the Jinshan shear zone hosted gold deposit, Jiangxi, with discussion on genesis of two stages [J]. *Geochimica*, 23, 226-232 (in Chinese with English abstract).
Ji J F, Sun C Y and Zheng Q. 1994b. The metallogenetic characteristics of auriferous quartz veins in the Jinshan shear zone type gold deposit, Jiangxi Province [J]. *Geological Reviews*, 40(4): 361-367 (in Chinese with English abstract).
Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Resources. 1984. Regional geology of Jiangxi Province [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-921 (in Chinese with English abstract).
Jiangxi Geological Exploration Bureau. 1996. Yinshan Cu-Pb-Zn-Au-Ag deposit in Jiangxi Province [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-380 (in Chinese with English abstract).
Kendrick M A, Burgess R, Pattick R A D and Turner G. 2001. Fluid inclusion noble gas and halogen evidence on the origin of Cu-porphry mineralization fluids [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65, 2651-2668.
Li X F, Hua R M, Mao J W and Ji J F. 2003. A study of illite Kübler Indexes and chlorite crystallinities with respect to shear deformation and alteration, Jinshan gold deposit, East China [J]. *Resource Geology*, 53(4): 283-292.
Li X F, Mao J W, Wang D H and Luo F X. 2004. Helium and argon isotope systematic in fluid inclusion of the gold deposit along the Daduhe River, Sichuan Province, southwestern China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(2): 403-410 (in Chinese with English abstract).
Li X F, Watanabe Y and Mao J W. 2007a. SHRIMP II U-Pb zircon and ^{40}Ar - ^{36}Ar sericite ages from Yinshan Pb-Zn-Ag-Cu-Au deposit: Implication for the volcanism and mineralization in the northeast Jiangxi District, South China [J]. *Resource Geology*, 57(3): 325-

- 337.
- Li X F, Mao J W, Wang C Z and Watanabe Y. 2007b. The Daduhe gold field at the eastern margin of the Tibetan Plateau: He, Ar, S, O and H isotopic data and their metallogenic implications [J]. *Resource Geology*, 53(4): 283-292.
- Li X F, Sasaki M. 2007c. The hydrothermal alteration and mineralization of Middle Jurassic Dexing porphyry Cu-Mo deposit, Southeast China [J]. *Resource Geology*, 57(4): 409-416.
- Li X F, Wang C Z, Yi X K, Feng Z H and Wang Y T. 2007d. Deformation structures at various and their roles during gold mineralization at Jinshan gold deposit, Jiangxi Province [J]. *Geological Review*, 53(6): 774-782 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y J, Sha P and Zhu K J. 1989. The study on geochemistry of the gold-bearing formation of Middle Proterozoic Shuangqiaoshan Group in Dexing district, Jiangxi [J]. *Journal of Guilin Institute of technology*, 2, 115-126 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y J, Sun C Y and Ma D S. 1993. Jiangnan gold deposit and its ore-forming geochemical setting [M]. Nanjing: Nanjing University Pub. House. 61-84 (in Chinese with English abstract).
- Lu J J, Hua R M and Yao C L. 2005. Re-Os age for molybdenite from the Dexing porphyry Cu-Au deposit of Jiangxi Province, China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(Suppl.): A882.
- McCuaig T C and Kerrich R. 1998. P-T-t-deformation-fluid characteristics of lode gold deposits: Evidence from alteration systematics [J]. *Ore Geology Reviews*, 2: 381-453.
- Robert F and Poulsen K H. 2001. Vein formation and deformation in greenstone gold deposits [J]. *Society of Economic Geologists Review*, 14: 111-155.
- Rollinson H R. 1993. Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation [M]. Longman Scientific and Technical Press. 1-352.
- Shu L S, Shi Y S and Guo L Z. 1995. Plate-terranic tectonic and dynamics of collision orogenic at the middle segment of Jiangnan orogenic belt [M]. Nanjing: Nanjing University Pub. House. 94-120 (in Chinese with English abstract).
- Simmons S F, Sawkins F J and Schlutter B T. 1987. Mantle-derived helium in two Peruvian hydrothermal ore deposits [J]. *Nature*, 329: 429-432.
- Stuart F M, Burnard P G, Taylor R P and Turner G. 1995. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluids: He-Ar isotopes in fluid inclusions from Dae W-Mo mineralization, South Korea [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 4663-4673.
- Taylor H P Jr. 1974. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposit [J]. *Econ. Geol.*, 69: 843-883.
- Tolstikhin I N. 1987. A review: Some recent advances in isotope geochemistry of light noble gases [A]. In: Alexander E C Jr and Ozima M, ed. *Terrestrial noble gases* [M]. Tokyo: Japan Scientific Press. 33-62.
- Wan C L. 1997. Mineralization characteristics and mineralization control on the Jinshan gold deposit [J]. *Jiangxi Geology*, 9, 1-6 (in Chinese with English abstract).
- Wang K Y, Ling M Y and Lu Z Y. 1999. Geology and origin of the Jinshan gold deposit in Jiangxi and discussion on its genesis [J]. *Geology and Prospecting*, 35(2): 17-20 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Zhao Z H, Jian P, Xu J F, Bao Z W and Ma J L. 2004. SHRIMP U-Pb zircon geochronology and Nd-Sr isotope geochemistry of the Dexing granodiorite porphyries [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 315-324 (in Chinese with English abstract).
- Wang X Z, Liang H Y, Shan Q, Cheng J P and Xia P. 1999. Metallogenic age of the Jinshan gold deposit and Caledonian gold mineralization in South China [J]. *Geological Reviews*, 45(1): 19-23 (in Chinese with English abstract).
- Wei X L. 1995a. The geological features and gold mineralization in Jinshan gold deposit [J]. *Mineral Resources and Geology*, 9(6): 471-480 (in Chinese with English abstract).
- Wei X L. 1995b. Exploration history and potential prospect of the Jinshan gold deposit [J]. *Geological Exploration for Non-Ferrous Metals*, 4(5): 283-288 (in Chinese).
- Wei X L. 1996. The geological characteristics of ductile shear zone hosted gold deposit at Jinshan, Jiangxi [J]. *Geology of Jiangxi*, 10(1): 52-64 (in Chinese).
- Zeng J N, Fan Y X and Ma X. 2001. The geochemistry of ore-forming fluid of Jinshan gold deposit, Jiangxi [J]. *Gold Geology*, 7(1): 26-32 (in Chinese with English abstract).
- Zhang W H and Tan T L. 1998. Relationship between organic fluids and gold mineralization in the Jinshan gold deposit, Jiangxi Province [J]. *Mineral Deposits*, 17(1): 15-24 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 华仁民, 李晓峰, 张开平, 邱德同, 杨凤根. 2002. 江西金山金矿成矿过程流体作用地球化学 [J]. *南京大学学报 (自然科学)*, 38(3): 408-417.
- 黄宏立, 杨文思. 1990. 赣东北金山金矿的地质特征及矿床成因 [J]. *地质找矿论丛*, 5(2): 29-39.
- 季俊峰, 刘英俊, 孙承轶, 邱德同. 1994a. 江西金山剪切带型金矿床两类矿石的地球化学特征——兼论两阶段成矿机制 [J]. *地球化学*, 3: 226-232.
- 季俊峰, 孙承轶, 郑晴. 1994b. 江西金山剪切带型金矿床中含金石英脉的成矿特征 [J]. *地质论评*, 40(4): 361-367.
- 江西省地质矿产局. 1984. 江西省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社. 1-921.
- 江西银山铜铅锌金银矿床编写组. 1996. 江西银山铜铅锌金银矿床 [M]. 北京: 地质出版社. 1-380.

- 李晓峰,毛景文,王登红,罗辅勋. 2004. 四川大渡河金矿田成矿流体来源的氢氦硫氢氧同位素示踪[J]. 地质学报, 78(2): 403-410.
- 李晓峰,王春增,易先奎,冯佐海,王义天. 2007. 德兴金山金矿田不同尺度构造特征及其与成矿作用的关系[J]. 地质论评, 3(6): 774-782.
- 刘英俊,沙鹏,朱凯军. 1989. 江西德兴地区中元古界双桥山群含金建造的地球化学研究[J]. 桂林冶金地质学院学报, (2): 115-126.
- 刘英俊,孙承轅,马东升. 1993. 江南金矿及其成矿地球化学背景[M]. 南京: 南京大学出版社. 61-84.
- 舒良树,施央申,郭令智. 1995. 江南中段板块-地体构造与碰撞造山运动学[M]. 南京: 南京大学出版社. 1-174.
- 万昌林. 1997. 试论金山金矿成矿特征与成矿控制[J]. 江西地质, 9: 1-6.
- 王可勇,梁敏鑫,卢作祥. 1999. 江西金山金矿矿床地质特征及矿床成因探讨[J]. 地质与勘探, 35(2): 17-20.
- 王强,赵振华,简平,许继峰,包志伟,马金龙. 2004. 德兴花岗闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和 Nd-Sr 同位素地球化学[J]. 岩石学报, 20(2): 315-324.
- 王秀璋,梁华英,单强,程景平,夏萍. 1999. 金山金矿成矿年龄测定及华南加里东成金期的讨论[J]. 地质论评, 45(1): 19-25.
- 韦星林. 1995a. 金山金矿田地质特征及成矿地质作用[J]. 矿产与地质, 9(6): 471-480.
- 韦星林. 1995b. 金山金矿田发现过程及其找矿前景[J]. 有色金属矿产与勘查, 4(5): 283-288.
- 韦星林. 1996. 江西金山韧性剪切带型金矿地质特征[J]. 江西地质, 10(1): 52-64.
- 曾键年,范永香,马宪. 2001. 江西金山金矿床成矿流体地球化学[J]. 黄金地质, 17(1): 26-32.
- 张文淮,谭铁龙. 1998. 江西省金山金矿有机流体与金矿的关系[J]. 矿床地质, 17(1): 15-23.