

庐枞盆地高硫化型浅成低温热液成矿系统:来自矾山明矾石矿床地质特征和硫同位素地球化学的证据*

范裕¹ 周涛发^{1,2} 袁峰¹ 唐敏惠³ 张乐骏^{1,2} 马良¹ 谢杰¹

FAN Yu¹, ZHOU TaoFa^{1,2}, YUAN Feng¹, TANG MinHui³, ZHANG LeJun^{1,2}, MA Liang¹ and XIE Jie¹

1. 合肥工业大学资源与环境工程学院,合肥 230009

2. Centre of Excellence in Ore Deposit(CODES), University of Tasmania, Private Bag 79, Hobart, Australia

3. 安徽省公益性地质项目管理中心,合肥 230001

1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

2. Centre of Excellence in Ore Deposit(CODES), University of Tasmania, Private Bag 79, Hobart, Australia

3. Academy of Geological Survey of Anhui Province, Hefei 230001, China.

2010-10-02 收稿, 2010-11-17 改回.

Fan Y, Zhou TF, Yuan F, Tang MH, Zhang LJ, Ma L and Xie J. 2010. High sulfidation epithermal hydrothermal system in Lu-Zong volcanic basin: Evidence from geological characteristics and sulfur isotope data of Fanshan alunite deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12):3657–3666

Abstract The Luzong Mesozoic volcanic basin is located in the Lower Yangtze River fault-depression zone, where is the northern margin of the Yangtze Block. The volcanic and intrusive plutons occur widely in Lu-Zong Basin, including four formations of volcanic rocks such as, Longmenyuan Formation, Zhuangqiao Formation, Shuangmiao Formation and Fushan Formation and 34 intrusive plutons. A lot of metallic and nonmetallic deposits such as iron, copper, gold, lead, zinc, uranium, alunite and anhydrite deposits occur in the basin. The acid alteration widely developed in the north part of the basin, indicating the existence of high sulfidation epithermal hydrothermal system. We carried out detailed study on the biggest Fanshan alunite deposit in Lu-Zong Basin in order to identify the characteristics of this high sulfidation epithermal hydrothermal system. Alunite orebody mainly distributes in the volcanic pyroclastic rocks. The orebody is lensoid or layer and consistent with volcanic rock. The type of ore are mostly pyrite-quartz-alunite, and the mainly K-alunite are dominate. The alteration minerals include quartz, kaoline and sericite. The $\delta^{34}\text{S}$ values of alunite is 20.29‰ ~ 23.18‰, with average values of 21.86‰, The $\delta^{34}\text{S}$ values of pyrite is -7.06‰ ~ -8.36‰, with average values of -7.49‰. The $\Delta^{34}\text{S}_{\text{alunite-py}}$ value is 29.35‰, indicating the alunite is formed by magmatic fluid and volcanic rocks. The formed temperature of alunite calculated by $\Delta^{34}\text{S}_{\text{alunite-py}}$ value is 264°C. According to the geological characteristics and sulfur isotope, we deduced the existence of high sulfidation epithermal hydrothermal system in the Lu-Zong Basin. The widely dispersed acid alteration may be formed in the later stage of porphyry-like iron deposit.

Key words Alunite; High sulfidation epithermal hydrothermal system; Sulphur isotope; Porphyry-like type iron deposits; Lu-Zong Basin

摘要 庐枞中生代火山盆地位于长江中下游断陷带内,地处扬子板块的北缘。庐枞盆地内火山岩和侵入岩分布广泛,包括龙门院、砖桥、双庙和浮山四组火山岩以及34个侵入岩体。盆地内产出一系列铁、铜、铅、锌、铀等金属矿床,同时还大量产出以明矾石和硬石膏为代表的非金属矿床。庐枞盆地北部砖桥组火山岩内中酸性硫酸盐蚀变广泛发育,指示盆地内存在高硫化型浅成低温热液系统。本文以盆地北部矾山明矾石矿床为研究对象,查明了矾山明矾石矿体主要赋存在火山碎屑岩内,矿体呈似层状,产状基本上与围岩一致,矿石类型以黄铁矿-石英-明矾石矿石为主,明矾石主要为钾明矾石,主要蚀变类型包

* 本文受国家自然科学基金项目(40803015,40830426)、国家重点基础研究发展规划973项目(2007CB411405)、安徽省地质勘查专项基金项目(2007-1)、澳大利亚塔斯马尼亚大学国家优秀矿床研究中心科研基金(CODES2009 P2-3)和新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0324)联合资助。

第一作者简介:范裕,男,1982年生,博士,副教授,主要从事矿床学和地球化学方面的科研工作,E-mail: fan_yu9@tom.com

括明矾石化、硅化、高岭土化和绢云母化。明矾石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围为 20.29‰~23.18‰, 平均值为 21.86‰, 黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围为 -7.06‰~-8.36‰, 平均值为 -7.49‰, 明矾石和黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值计算 $\Delta^{34}\text{S}_{\text{Alun-Py}}$ 为 29.35‰, 指示矾山明矾石为岩浆热液与火山岩地层水岩作用的产物, 硫同位素温度计计算得出明矾石形成温度为 264℃。通过相关对比研究, 本文认为庐枞盆地内存在高硫化型低温热液系统, 系统中广泛发育的酸性蚀变很可能是玢岩铁矿成矿系统的组成部分, 是玢岩铁矿系统成矿气液不断作用并演化到了最晚阶段的产物。

关键词 明矾石; 高硫化型浅成低温热液系统; 硫同位素; 玢岩铁矿; 庐枞盆地

中图法分类号 P611.1

浅成低温热液型金矿床是世界上最为重要的金矿床类型(Rye, 2005), 自 20 世纪 80 年代被人们发现和研究以来, 一直是国际矿床学界研究的热点之一(Heald *et al.*, 1987; 芮宗瑶等, 1995; Hedenquist *et al.*, 1998, 2000; 张德全等, 2003; 江思宏等, 2004; Deyell and Dipple, 2005; Deyell *et al.*, 2005)。Heald *et al.* (1987) 根据矿床地质特征和成矿流体的特点将浅成热液型金矿床分为高硫化型和低硫化型两个亚类, 其中高硫化型浅成热液型金矿床中酸性硫酸盐蚀变(明矾石、石英、高岭石、地开石、叶腊石和黄铁矿矿物组合)广泛发育, 是该类矿床的显著识别特征(Rye *et al.*, 1992; Rye, 1993, 2005)。通过对酸性硫酸盐蚀变的野外地质特征、矿物共生组合、地球化学特征以及年代学研究, 能较好地阐明高硫化型浅成热液系统的特征、性质、发生和发展演化及成矿作用过程, 同时, 酸性硫酸盐蚀变对斑岩型铜金矿床勘探具有直接的指示意义(Dandis and Rye, 2005; Rye, 2005)。近年来, 在长江中下游成矿带陆相火山岩盆地中玢岩型铁矿外围强烈的酸性硫酸盐蚀变引起人们的重视, 并成为玢岩铁矿的重要找矿标志。

庐枞中生代火山盆地处于长江中下游断陷带内, 地处扬子板块的北缘, 庐枞断裂带的南段(图 1), 是长江中下游成矿带中最重要的中生代火山岩盆地和矿集区之一(常印佛等, 1991; 翟裕生等, 1992; 唐永成等, 1998; 周涛发等, 2008, 2010; 董树文等, 2010)。盆地内广泛发育橄榄安粗质火山侵入岩, 并产出一系列铁、铜、铅、锌、铀等金属矿床, 同时还大量发育以明矾石、硬石膏为代表的非金属矿床。近年来, 随着庐枞地区找矿工作取得突破, 庐枞地区成为长江中下游成矿带的研究热点, 不同学者对岩浆岩的时空格架、源区、演化、深部过程、典型矿床地质特征和成矿作用以及盆地地壳结构和深部控矿因素等方面开展了较深入的研究, 并取得了一系列重要成果(任启江等, 1991; 王德滋等, 1996; 刘洪等, 2002; Wang *et al.*, 2006; 周涛发等, 2007, 2008, 2010; 袁峰等, 2008; 范裕等, 2008; Zhou *et al.*, 2008; 董树文等, 2010)。

庐枞盆地北部砖桥组火山岩内酸性硫酸盐蚀变广泛发育, 形成明矾石矿床和矿点共计 200 多处; 盆地内大型玢岩型铁矿床罗河铁矿床和泥河铁矿床内以高岭石-黄铁矿-明矾石-硬石膏为代表的酸性蚀变带广泛发育, 厚度可达 100~300m。上述地质现象均指示盆地内存在高硫化型浅成低温热液系统。迄今为止, 盆地内高硫化型浅成低温热液系统尚未被识别和重视, 前人(任启江等, 1991)仅对酸性蚀变岩进

行了初步的描述性工作。高硫化型浅成低温热液系统的特征、性质、发展的演化过程等相关研究尚未开展, 高硫化型浅成低温热液系统与盆地内玢岩型铁矿床成矿流体系统的关系有待研究。这严重影响了人们对庐枞盆地及区域成矿作用和成矿规律的深入认识。为此, 本文在作者已有的相关研究工作的基础上, 以庐枞盆地内矾山明矾石矿床为主要研究对象, 通过深入细致的野外地质研究, 确定了矿床酸性蚀变岩的岩石学和矿物学特征, 并对明矾石进行了硫同位素研究, 确定了矾山明矾石矿床的成因, 分析了酸性蚀变系统与盆地内玢岩铁矿成矿作用之间的关系, 为探讨长江中下游地区火山岩盆地内酸性蚀变与成矿作用关系提供了新的证据。

1 庐枞盆地地质概况

庐枞盆地处于安徽省庐江县(庐)和枞阳县(枞)之间, 为 3 组深大断裂控制(图 1), 盆地基底东浅西深, 属于继承式的中生代陆相盆地(任启江等, 1991), 火山岩出露面积约 800km²。出露的沉积地层主要为中侏罗统罗岭组(J₂)陆相碎屑沉积岩, 该沉积岩与火山岩系呈不整合接触。火山岩由老至新分为龙门院组、砖桥组、双庙组和浮山组, 各组之间均为喷发不整合接触(任启江等, 1991; 周涛发等, 2008), 构成 4 个旋回。各旋回的火山活动均由爆发相开始, 此后溢流相逐渐增多, 最后以火山沉积相结束, 喷发方式由裂隙-中心式向典型的中心式喷发演化。火山岩类由熔岩、碎屑熔岩、火山碎屑岩及次火山岩组成, 火山碎屑岩的总量高于熔岩类。4 组火山岩在空间上大致呈同心环状分布, 自盆地边缘至盆地中心依次出露龙门院组、砖桥组、双庙组和浮山组。龙门院组主要分布在盆地边缘, 以角闪粗安岩为主; 砖桥组主要分布在庐枞火山岩盆地中部, 以辉石粗安岩为主, 构成了庐枞盆地火山岩的主体部分; 双庙组主要分布在庐枞盆地中部和南部, 以粗面玄武岩为主; 浮山组仅在庐枞盆地中部零星分布, 出露面积较小, 以粗面质火山岩为主(图 1)。

庐枞盆地内部有 34 个侵入岩岩体分布(周涛发等, 2010), 侵入岩体的形成与区域火山活动有着极为密切的关系(图 1), 这些岩体按岩性主要分为 3 种, 一种为二长岩体, 主要分布在盆地的北部, 出露面积较大的岩体有巴家滩岩体, 龙桥岩体和罗岭岩体等, 第二种为正长岩体, 出露面积较大的岩体有土地山岩体、凤凰山岩体等, 第三种为 A 型花岗岩, 出露面积较大的岩体有城山岩体, 花山岩体、黄梅尖岩体

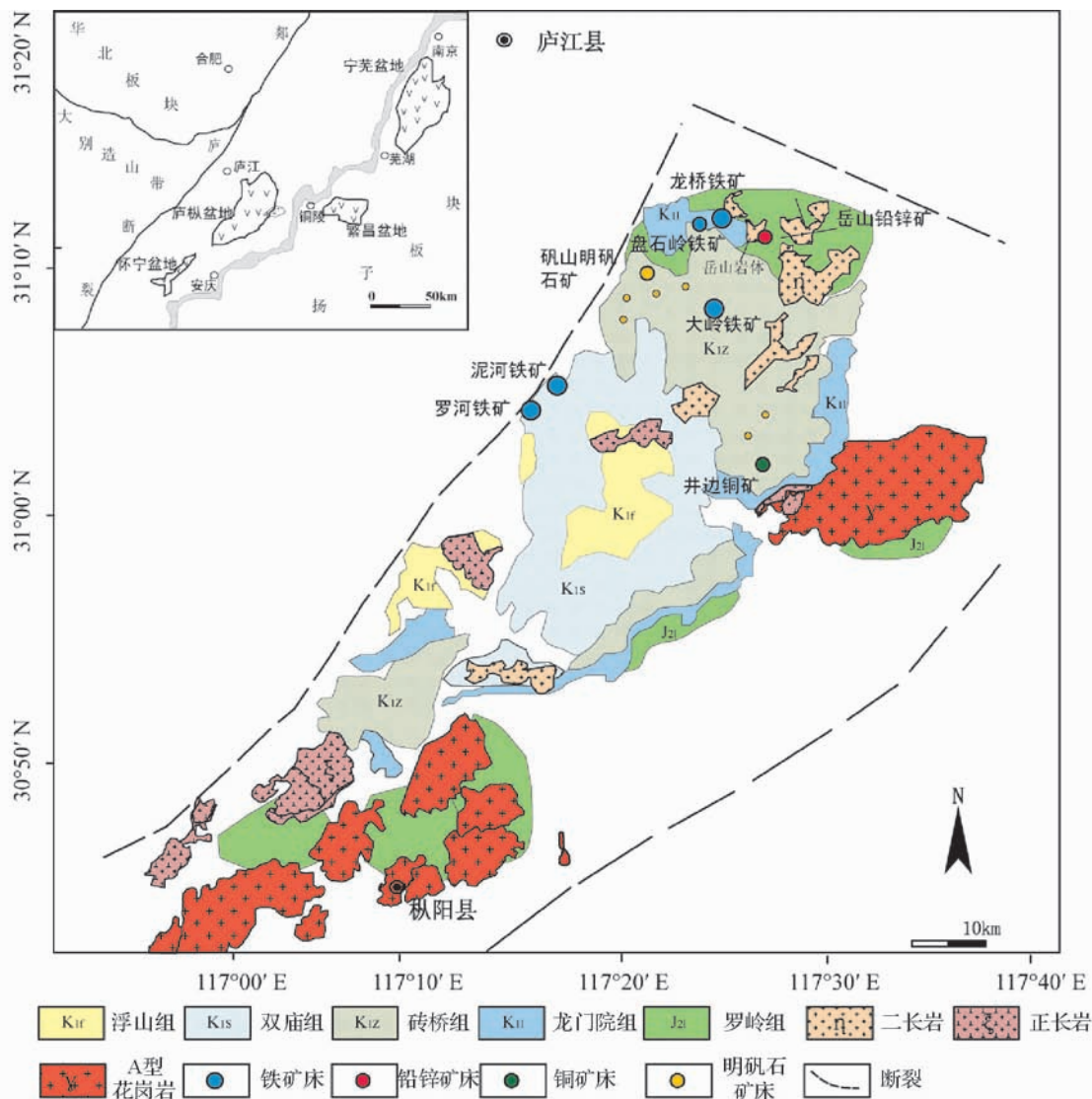


图1 庐枞盆地地质略图

Fig. 1 Geological sketch map of Lu-Zong volcanic basin

等(周涛发等,2007;范裕等,2008)。

盆地内成矿作用主要发生在砖桥旋回,形成一系列铁、铜、铅、锌矿床以及明矾石矿床,主要包括四种类型矿床(周涛发等,2010): I. 热液脉型铅锌矿床,以岳山铅锌矿床为代表; II. 玢岩型铁矿床,包括4个亚类:(1)龙桥式铁矿床,如龙桥铁矿床、马鞭山铁矿床;(2)罗河式铁矿床,如罗河铁矿床、泥河铁矿床;(3)大岭式铁矿床,如大岭铁矿床;(4)盘石岭式铁矿床,如盘石岭铁矿床; III. 热液脉型铜矿床,以井边铜矿床、拔茅山铜矿床为代表; IV. 明矾石-硬石膏矿床(图1)。

2 矾山矿床地质特征

矾山明矾石矿区位于庐枞盆地中部,距庐江县城约

27km,矾山矿区的地质调查工作始于1933年,原安徽省地矿局327地质队于1953年至1966年期间,开展了矾山矿区明矾石矿系统勘查工作,探明明矾石矿石储量7318万吨,平均品位为40.39%,为大型明矾石矿床,矿床内伴生镓380.3吨,平均品位0.00052%,达到中型镓矿床规模。矿床共计31个矿体,主要矿体有9个(安徽省地矿局327地质队,1956①)。

2.1 地层

矾山矿区内出露地层主要为白垩系下统砖桥组的火山岩,自下而上依次为安山岩、粗安岩和火山碎屑岩组成

① 安徽省地矿局327地质队. 1956. 安徽庐江矾山明矾石矿区地质勘探总结报告, 1-225

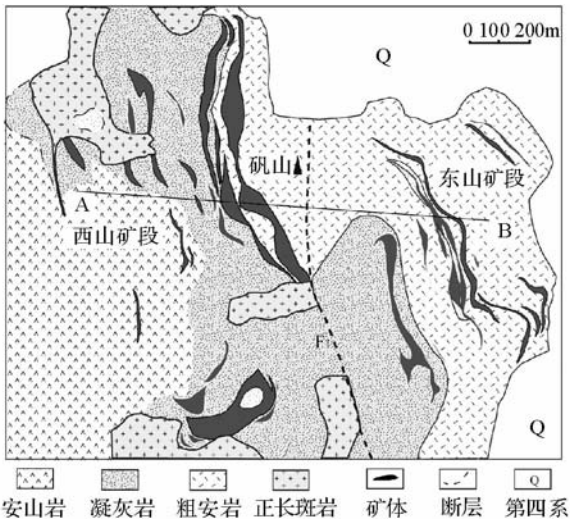


图2 矾山明矾石矿区地质图(据安徽省地勘局 327 地质队,1956 修改)

Fig.2 Geological map of Fanshan ore district

(图2)。安山岩分布于矿区西部,厚约 200m,走向 $320^{\circ} \sim 355^{\circ}$,倾向南西,倾角 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$,与上覆凝灰岩呈假整合接触。安山岩呈深灰色,灰黑色,斑状结构,块状构造。斑晶含量约 30%,主要为斜长石、钾长石和角闪石,基质为微晶斜长石和玻璃质组成。斜长石斑晶粒径约 $0.3 \sim 2.0\text{mm}$,呈自形-半自形板状,具有明显的环带结构。钾长石呈半自形长板状,含量较少,粒径约 2mm,角闪石呈褐色,半自形粒状,具有明显的暗化边。大部分角闪石蚀变强烈,只保留少量的残晶及晶形。矿区内安山岩均发育中等强度的高岭土化、明矾石化、绿泥石化、绢云母化和硅化蚀变。安山岩内产出若干透镜状小明矾石矿体(图3)。

火山碎屑岩主要由沉角砾凝灰岩、凝灰质粉砂岩和沉含砾凝灰岩组成,具有粗细变化的韵律层,整合覆盖于安山岩之上,分布于矿区中部,走向 $340^{\circ} \sim 350^{\circ}$,倾向南西,倾角 $30^{\circ} \sim 38^{\circ}$,厚约 200m。火山碎屑岩层是明矾石矿体的主要赋矿围岩(图2)。

粗安岩主要分布于矿区东部,走向 $330^{\circ} \sim 340^{\circ}$,倾向西南,倾角 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$,厚度约 300m,与下覆的凝灰岩呈假整合接触。粗安岩呈黄褐色、肉红色,斑状结构、块状构造。斑晶主要由钾长石和少量斜长石与黑云母组成,钾长石斑晶含量

约 30%,呈自形板状,粒径约 $0.5 \sim 1.0\text{mm}$,常见有钠长石双晶和卡纳复合双晶,斜长石斑晶粒径约 $0.3 \sim 2.0\text{mm}$,呈自形-半自形板状,具有明显的环带结构。黑云母斑晶呈褐色,自形-半自形粒状,具有明显的暗化边。粗安岩发育了不同程度的硅化、明矾石化、高岭土化、叶腊石化、绢云母化等。粗安岩内发育若干透镜状明矾石矿体。

2.2 构造

矿区内构造主要由火山熔岩和火山碎屑岩构成的单斜构造,走向为 $320^{\circ} \sim 355^{\circ}$,倾向西南,倾角约 $25^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 。矿区内产出主要断裂为矾山正断层 F_1 ,穿切矿体及火山岩地层,将矿区分割为东山和西山两个矿段,为成矿后构造。断层倾向南东,倾角约 70° ,最大断距约 200m(图2)。

2.3 岩浆岩

矿区内侵入岩主要为正长斑岩,呈小岩株产出于矿区西北、西南及中部地区。正长斑岩穿切破坏明矾石矿体和火山岩地层,为成矿的侵入岩。正长斑岩呈肉红色,斑状结构,块状构造,岩石的主要矿物为正长石(75%)、斜长石(15%)、石英(5%)及少量暗色矿物。正长石斑晶呈他形,泥化较发育,粒径 $0.3 \sim 1.0\text{mm}$,斜长石含量较少,呈板状,石英他形粒状,充填于长石颗粒间隙中,粒径为 0.5mm 。正长斑岩局部发育有高岭土化、绢云母化。

2.4 矿化特征

(1) 矿体特征

矾山矿区分为东山、西山和马石岭三个矿段,矿体形状主要为似层状和透镜状,其中东山矿段的矿体比较稳定,多为似层状,而西山矿段和官马石岭矿段则以透镜状为主。矿体产状基本上与围岩一致,倾角为 $25^{\circ} \sim 40^{\circ}$,矿体与围岩之间呈渐变过渡关系。矿体厚度通常为 $20 \sim 50\text{m}$,最厚约 110m,长度约 $150 \sim 950\text{m}$,延深约 $100 \sim 400\text{m}$ 。明矾石矿体平均品位为 $32.5\% \sim 39\%$,富矿平均品位大于 45%,主要赋存于火山碎屑岩中,贫矿平均品位 $20\% \sim 35\%$,多产于安山岩和粗安岩中(安徽省地勘局 327 地质队,1956)。

(2) 矿石特征

矿石结构主要为细粒状结构,明矾石、石英等呈他形细粒状,粒度仅 $0.001 \sim 0.01\text{mm}$,少量明矾石呈自形叶片状,粒



图3 矾山明矾石矿床剖面图(据安徽省地勘局 327 地质队,1956 修改)

Fig.3 Profile map of Fanshan alunite deposit

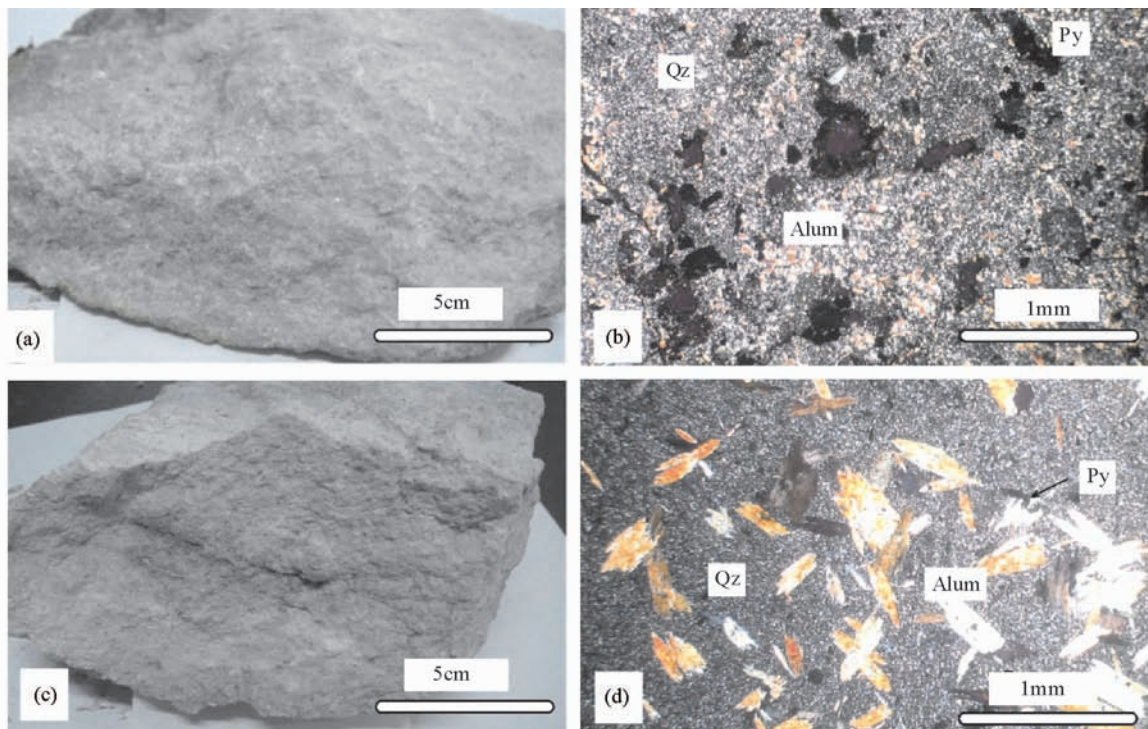


图4 明矾石矿石手标本及镜下照片

(a)、(b)-块状明矾石矿石,明矾石呈极细粒;(c)、(d)-块状明矾石矿石,明矾石呈中粒自形竹叶状晶体. Py-黄铁矿; Alum-明矾石; Qz-石英

Fig. 4 alunitic ore sample from Fanshan deposit

(a), (b)-massive alunitic ore, alunitic is minor grain; (c), (d)-massive alunitic ore, alunitic is medium-grain and lamellar grain. Py-pyrite; Alum-alunitic; Qz-quartz

径约0.1~10mm 浸染状分布于矿石中(图4);部分贫矿石具残余结构,即残余有原岩的碎屑结构或斑状结构。矿石构造主要为块状构造,矿石中明矾石以他形细粒状,密集分布于矿石中。

矿石的组成矿物较简单,主要矿物为明矾石、石英,次要矿物有高岭石、黄铁矿、褐铁矿、绢云母、叶腊石等,金红石少见。明矾石通常呈他形细粒状,产于石英晶粒之间,矿石中明矾石含量约20%~90%。石英是矿石中主要脉石矿物,呈他形粒状,粒度与明矾石相近,其含量与明矾石成反比关系。高岭石通常呈细粒聚集状不均匀分布或成脉状存在于矿石中,其含量与明矾石成反比例关系。黄铁矿呈他形粒状或自形立方体,浸染状或细脉状分布于矿石中,含量2%~10%。褐铁矿为黄铁矿风化的产物;绢云母、叶腊石和金红石含量较低,仅在局部产出。

2.5 围岩蚀变

矿区内砖桥组火山岩普遍受到强烈的热液蚀变,主要蚀变类型包括明矾石化、硅化、高岭土化和绢云母化、其次有绿泥石化、叶腊石化、黄铁矿化和赤铁矿化。明矾石化强烈地段即为矿体。从矿体至围岩,大致有如下蚀变分带硅化带→硅化+明矾石化带→明矾石+高岭石带→绢云母+绿泥

石带。

3 测试样品及测试方法

本次研究在矿石样品手标本观察的基础上,磨制厚度约为0.2mm 双面抛光的薄片进行显微镜下矿相学观察,并选择代表性矿石挑选黄铁矿和明矾石单矿物进行硫同位素分析,磨制探针片进行电子探针分析。

电子探针分析是在中国科学院地质与地球物理研究所完成的。首先将样品制成标准的电子探针薄片,镜下观察后,选好要分析的区域做上标记。然后在探针片的表面镀膜后进行分析明矾石矿物的主要元素分析。分析仪器型号为JXA-8100,加速电压15kV,束流20nA。

单矿物分选工作在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。样品首先经过破碎,经浮选和电磁选等方法挑选出单颗粒黄铁矿和明矾石,然后在双目镜下挑纯。 $\delta^{34}\text{S}$ 同位素测试在中国地质科学院矿产资源研究所稳定同位素地球化学实验室进行。黄铁矿样品硫同位素的提取流程为:以 Cu_2O 和 V_2O_5 作为混合氧化剂,在高温、真空条件下与黄铁矿反应制取 SO_2 ;明矾石样品中硫同位素的提取流程为:明矾石经碳酸钠—氧化锌半熔法转化为纯净的 BaSO_4 ,再用

表 1 矾山明矾石矿床明矾石探针分析数据 (wt%)

Table 1 Electron probe analysis data of alunite from Fanshan deposit (wt%)

序号	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SO ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Cr ₂ O ₃	Total
1	0.274	41.72	33.54	0.821	2.402	0.045	0.003	78.93
2	0.140	40.96	32.47	0.713	3.758	0.038	0.014	78.10
3	0.187	43.58	31.97	1.411	2.688	0.101	0.068	80.04
4	0.242	41.35	32.29	1.617	2.525	0.088	0.104	78.21
5	0.222	42.29	31.48	2.659	2.552	0.037	0.044	79.29
6	0.235	39.68	32.50	0.791	4.154	0.071	0.059	77.54
7	0.280	38.94	33.71	0.422	0.446	3.134	0.065	76.99
8	0.524	40.87	33.56	0.265	4.816	0.050	0.018	80.23
9	0.253	42.94	30.78	1.243	2.706	0.076	0.046	78.09
10	0.478	44.79	30.96	2.899	2.326	0.155	0.008	81.66
11	0.122	42.86	31.70	0.123	2.288	0.036	0.029	77.26
12	0.142	43.62	30.93	0.000	2.506	7.223	0.000	87.18
13	0.210	40.69	31.12	0.471	4.368	0.016	0.046	76.96
14	0.190	39.78	31.17	0.044	5.419	0.000	0.000	76.67
15	0.258	41.30	32.58	0.290	3.770	0.000	0.017	78.23
16	0.174	43.42	32.26	0.680	3.345	0.037	0.049	79.99
17	0.166	43.91	31.60	0.045	2.896	0.025	0.020	78.69
18	0.220	39.49	31.92	0.000	4.775	0.020	0.205	76.65
19	0.317	41.98	31.20	0.074	3.525	0.019	0.030	77.17
20	0.275	40.91	30.11	0.031	3.036	0.383	0.009	74.79
21	0.285	42.91	31.87	0.303	3.314	0.000	0.082	87.56
22	0.274	41.76	30.52	2.598	2.657	0.051	0.028	77.89
23	0.27	43.59	30.80	0.34	2.07	0.33	0.04	77.45
24	0.35	43.95	31.51	0.34	3.07	0.00	0.00	79.33
25	0.48	43.23	30.12	0.34	3.34	0.04	0.00	77.61

V₂O₅ 氧化剂将 BaSO₄ 转化成 SO₂; 全岩样品取约 5g, 加热至 1000℃, 释放 SO₂。³⁴S/³²S 值使用气体同位素质谱计分析硫同位素组成。质谱仪型号为德国产 MAT-251, 以 V-CDT 为标准, 分析精度为 ±0.2‰。

4 测试结果

4.1 电子探针分析结果

他形细粒状明矾石的粒径都过小 (< 10μm), 本次工作主要对叶片状明矾石进行探针分析。25 个明矾石单矿物电子探针分析结果见表 1。采用孙红娟等 (2008) 晶体化学式的计算方法, 以 8 个氧原子为基础 (Jambor, 1999), 计算步骤如下: (1) 以各氧化物组分的质量分数除以各氧化物组分的分子量, 从而得到各氧化物组分的分子数; (2) 根据各氧化物组分中阳离子和氧原子的比例关系, 分别计算各氧化物组分的氧原子数 Xi 和阳离子数 Yi; (3) 氧原子数 Xi 总和为 ΣXi, 以 8 个氧原子数为基准时的换算系数为: ΣXi/8, 将阳离子数 Yi 分别除以换算系数, 得出阳离子原子数及明矾石的分子式为:



明矾石理论分子式为 KAl₃(SO₄)₂(OH)₆, K₂O、Al₂O₃、

SO₃ 和 H₂O 的理论值分别为 11.37%、36.92%、38.66%、13.05%。相对理论值来说, 矾山矿床中明矾石富 Al, 贫 K, 明矾石中 K/Na 比值为 4.6 ~ 14.2, 为钾明矾石, 说明矿物是以含钾为主的, Na 对 K 的置换不是很强烈。

4.2 硫同位素分析结果

明矾石和黄铁矿单矿物硫同位素特征见表 2, 6 件黄铁矿-石英-明矾石矿石中的明矾石的 δ³⁴S 值范围为 20.29‰ ~ 23.18‰, 平均值为 21.86‰, 黄铁矿 δ³⁴S 值范围为 -7.06‰ ~ -8.36‰, 平均值为 -7.49‰, 明矾石和黄铁矿 δ³⁴S 平均值计算 Δ³⁴S_{Alun-Py} 为 29.35‰。

5 讨论

5.1 明矾石的成分特征

矾山矿床中明矾石的 K/Na 比值特征与 Pascua-Lama 矿床典型的岩浆热液明矾石类似 (K/Na 比值为 10.5 ~ 14.2; Deyell *et al.*, 2005)。这种明矾石主要沉淀于 K/Na 比值相对较高的流体。研究表明形成温度超过 200℃ 的明矾石 (岩浆-热液明矾石) 一般含有较多的 K, K/Na > 3 (Aoki *et al.*, 1993)。K/Na 比值是影响本矿床 Na、K 置换最主要的因素。

表3 矾山明矾石矿床与典型高硫型浅成低温热液矿床对比

Table 3 comparison between Fanshan alunite deposit and typical high sulfidation epithermal hydrothermal deposit in the world

矿床	赋矿围岩	蚀变分带	硫同位素(‰)	成矿温度(℃)	与斑岩矿床关系	资料来源
Summitville	英安岩	硅化带→石英+明矾石 →石英+高岭石+粘土	$\delta S_{Alun} = 20.5 \sim 24.6$ $\delta S_{Py} = -3$	200~400	深部为斑岩型矿床	Stoffregen and Alpers, 1987
Red Mountain	英安岩	明矾石+石英+黄铁矿 →粘土质及青磐岩化→粘土质、蒙脱石、长石	$\delta S_{Alun} = 17.6 \sim 24.9$ $\delta S_{Py} = -5.8 \sim -8.1$	200~390	深部为斑岩型矿床	Deyell et al., 2005
El Indio-Pascua	流纹岩	硅化→明矾石+硅化→ 高岭石+地开石+叶腊石 →伊利石/蒙脱石→绢云母	$\delta S_{Alun} = 13 \sim 25$; $\delta S_{Py} = -3 \sim -6$	190~350	深部为斑岩矿床	Hedenquist et al., 2000; Deyell et al., 2005
Julcani	英安岩	硅化→石英+明矾石+ 黄铁矿→高岭石+石英+ 黄铁矿	$\delta S_{Alun} = 22.5 \sim 25.2$, $\delta S_{Py} = -1.2 \sim 1.9$	210~290	深部为斑岩矿床	Petersen et al., 1977
矾山	凝灰岩、 安山岩	硅化带→硅化+明矾石 化→明矾石+高岭石→绢 云母+绿泥石	$\delta S_{Alun} = 16.38 \sim 22.98$ $\delta S_{Py} = -8.06$	260~290	推测深部 有斑岩体	本文

高温酸性气液流经富含长石类矿物的安山岩、凝灰岩等火山岩和有利容矿构造(岩石破碎、裂隙发育、空隙度大的围岩)中,上述的交代、分解作用也进行得比较充分、彻底,易形成粒度大、品位高的明矾石矿体。由于同层的火山碎屑岩成分均匀的,而在同层内形成的pH值也基本一致,所以形成了均一的层状、似层状明矾石矿体。热液呈酸性或强酸性时,有利于形成明矾石。当气液继续上移,不断的淋滤火山岩层,硫酸根浓度也在不断减小,当酸度下降时,就出现了高岭石、绢云母、绿泥石等矿物(图6)。

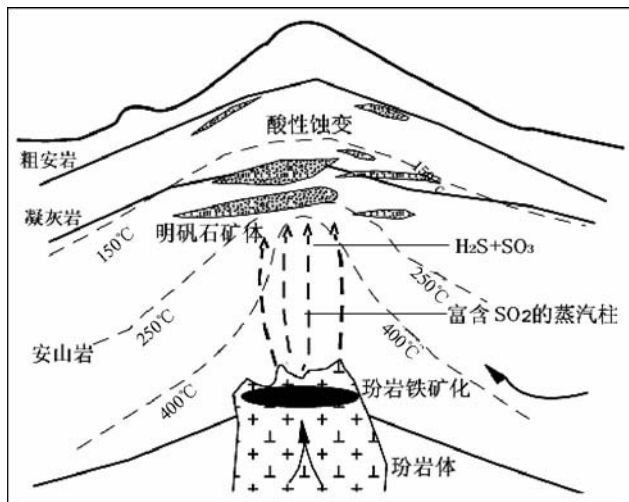


图6 庐枞盆地酸性蚀变成因模式

Fig. 6 Genesis model acid alteration in Lu-Zong Basin

6 结论

(1) 矾山明矾石矿床的矿化蚀变特征指示庐枞盆地内存在典型的高硫化型浅成低温蚀变系统。

(2) 矾山矿床内明矾石的分子式为 $(Na_{0.073}K_{0.444}Al_{0.321})(Al_3)\{(S_{1.821}Si_{0.019}Al_{0.16})_2O_8\}(OH)_6$, 明矾石的 $\delta^{34}S$ 值范围为 20.29‰~23.18‰, 平均值为 21.86‰, 黄铁矿 $\delta^{34}S$ 值范围为 -7.06‰~-8.36‰, 平均值为 -7.49‰, $\Delta^{34}S_{Alun-Py}$ 为 29.35‰, 明矾石形成温度为 264℃, 表明矾山明矾石矿床为岩浆热液与火山岩水岩作用的产物, 流体为岩浆热液来源。

(3) 庐枞盆地内广泛发育的酸性蚀变很可能是玢岩铁矿成矿系统的组成部分, 是玢岩岩浆热液演化到了最晚阶段的产物。矾山明矾石矿床的深部可能存在隐伏的玢岩体及玢岩型铁矿床。

References

- Aoki M, Comsti EC, Lazo FB and Matsuhisa Y. 1993. Advanced argillic alteration and geochemistry of alunite in an evolving hydrothermal system at Baguio, northern Luzon Philippines. *Resource Geology*, 43: 155-164
- Chang YF, Liu XP and Wu YC. 1991. The Copper-Iron Belt of the Lower and Middle Reaches of the Changjiang River. Beijing: Geological Publishing House, 71-76 (in Chinese)
- Chu XL, Chen JS and Wang SX. 1986. Study of fraction mechanism of sulfur isotope and physicochemical conditions of alteration and ore formation in Luohe iron deposit, Anhui. *Scientia Geologica Sinica*,

- 26(3): 189-195(in Chinese with English abstract)
- Dandis GP and Rye RO. 2005. Characterization of gas chemistry and noble-gas isotope ratios of inclusion fluids in magmatic-hydrothermal and magmatic-steam alunite. *Chemical Geology*, 215: 155-184
- Deyell CL and Dipple GM. 2005. Equilibrium mineral-fluid calculations and their application to the solid solution between alunite and natroalunite in the EI Indio-Pascua belt of Chile and Argentina. *Chemical Geology*, 215: 219-234
- Deyell CL, Rye RO, Landis GP and Bissig T. 2005. Alunite and the role of magmatic fluids in the Tambo high-sulfidation deposit, EI Indio-Pascua belt, Chile. *Chemical Geology*, 215: 185-218
- Dong SW, Xiang HS, Gao R, Lv QT, Li JS, Zhan SQ, Lu ZW and Ma LC. 2010. Deep structure and ore formation within Lujiang-Zongyang volcanic ore concentrated area in Middle to Lower Reaches of Yangtze River. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2529-2542(in Chinese with English abstract)
- Fan Y, Zhou TF, Yuan F, Qian CC, Lu SM and Cooke DR. 2008. LA-ICP MS zircon U-Pb ages of the A-type granites in the Lu-Zong (Lujiang-Zongyang) area and their significances. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1715-1724(in Chinese with English abstract)
- Heald P, Foley K and Hayba DO. 1987. Comparative anatomy of volcanic hosted epithermal deposits-Acid sulphate and adularia sericite types. *Economic Geology*, 80: 12-26
- Hedenquist JW, Arribas A and Reynolds J. 1998. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines. *Economic Geology*, 93(4): 373-404
- Hedenquist JW, Arribas AJ and Gonzalez UE. 2000. Exploration for epithermal gold deposit. *Economic Geology*, 13: 245-277
- Jambor JL. 1999. Nomenclature of the alunite super group. *Canadian Mineralogist*, 37: 1323-1341
- Jiang SH, Nie FJ, Zhang Y and Hu P. 2004. The latest advances in the research of epithermal deposits. *Earth Science Frontiers*, 11(2): 401-413(in Chinese with English abstract)
- Liu H, Qiu JS, Luo QH, Xu XS, Ling WL and Wang DZ. 2002. Petrogenesis of the Mesozoic potashrich volcanic rocks in the Luzhong basin, Anhui Province; Geochemical constraints. *Geochimica*, 31(2): 129-140(in Chinese with English abstract)
- Ningwu Project Group. 1978. The Porphyry Iron Deposit of Ningwu. Beijing: Geological Publishing House, 1-320(in Chinese)
- Ohmoto H and Rye RO. 1979. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. New York: Wiley Inter. Sci. Pub., 509-567
- Petersen U, Noble DC, Arenas ML and Goodell PC. 1977. Geology of the Julcani mining district, Peru. *Economic Geology*, 72: 931-949
- Ren QJ, Liu XS, Xu ZW, Hu SX and Hu WX. 1991. Mesozoic Volcano-Tectonic Depression and Its Mineralizing Process in Lujiang-Zongyang Area, Anhui Province. Beijing: Geological Publishing House, 1-206(in Chinese)
- Rui ZY, Zhang HT, Wang LS, Chen RY, Jin BL, Jin FZ, Wan YS, Zhou YC and Meng QL. 1995. Porphyry-epithermal copper-gold deposits in Yanbian area, Jilin province. *Mineral Deposits*, 14(2): 99-126(in Chinese)
- Rye RO, Bethke PM and Wasserman MD. 1992. The isotope geochemistry of acid sulfate alteration. *Economic Geology*, 87: 225-262
- Rye RO. 1993. The evolution of magmatic fluids in the epithermal environment; The stable-isotope perspective. *Economic Geology*, 88: 733-753
- Rye RO. 2005. A review of the stable-isotope geochemistry of sulfate minerals in selected igneous environments and related hydrothermal systems. *Chemical Geology*, 215(1-4): 5-36
- Stoffregen RE and Alpers CN. 1987. Woodhouseite and svanbergite in hydrothermal ore deposits; Products of apatite destruction during advanced argillic alteration. *Canadian Mineralogist*, 25: 201-211
- Sun HJ, Peng TJ and Liu Y. 2008. Calculation of crystal chemical formula of montmorillonite and classification. *Journal of Synthetic Crystals*, 37(2): 350-355(in Chinese with English abstract)
- Tang YC, Wu YC, Chu GZ, Xing FM, Wang YM, Cao FY and Chang YF. 1998. Geology of Copper-Gold Polymetallic Deposits in the along-Changjiang Area of Anhui Province. Beijing: Geological Publishing House, 60-85(in Chinese)
- Wang DZ, Ren QJ, Qiu JS, Chen KR, Xu ZW and Zeng JH. 1996. Characteristics of volcanic rocks in the shoshonite province, eastern China and their metallogenesis. *Acta Geologica Sinica*, 70(1): 23-34(in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Wyman DA, Xu JF, Zhao ZH, Jian P, Xiong XL, Bao ZW, Li CF and Bai ZH. 2006. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. *Lithos*, 89: 424-446
- Yuan F, Zhou TF, Fan Y, Lu SM, Qian CC, Zhang LJ, Duan C and Tang MH. 2008. Source, evolution and tectonic setting of Mesozoic volcanic rocks in Lu-Zong basin, Anhui Province. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1691-1702(in Chinese with English abstract)
- Zhai YS, Yao SZ and Lin XD. 1992. Regularities of Metallogenesis for Copper(Gold) Deposits in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Area. Beijing: Geological Publishing House, 1-120(in Chinese)
- Zhang DQ, She HQ, Li DX and Feng CY. 2003. The porphyry-epithermal metallogenic system in the Zijinshan region, Fujian Province. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 253-261(in Chinese with English abstract)
- Zhou TF, Song MY, Fan Y, Yuan F, Liu J, Wu MA, Qian CC and Lu SM. 2007. Chronology of the Bajiatan intrusions in the Luzong Basin, Anhui Province and its significance. *Acta Petrologica Sinica*, 23: 2379-2386(in Chinese with English abstract)
- Zhou TF, Fan Y, Yuan F, Lu SM, Shang SG, Cooke DR, Meffre S and Zhao GC. 2008. Geochronology of the volcanic rocks in the Lu-Zong (Lujiang-Zongyang) Basin and its significance. *Science in China (Series D)*, 51(10): 1470-1482
- Zhou TF, Fan Y and Yuan F. 2008. Advances on petrogenesis and metallogeny study of the mineralization belt of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River area. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1665-1678(in Chinese with English abstract)
- Zhou TF, Fan Y, Yuan F, Song CZ, Zhang LJ, Qian CC, Lu SM and Cooke DR. 2010. Temporal-spatial framework of magmatic intrusions in Luzong volcanic basin in East China and their constrain to mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2694-2714(in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 常印佛,刘湘培,吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带. 北京:地质出版社,71-76
- 储雪蕾,陈锦石,王守信. 1986. 罗河铁矿的硫同位素分馏机制和矿床形成的物理化学条件的研究. *地质科学*,26(3):189-195
- 董树文,项怀顺,高锐,吕庆田,李建设,战双庆,卢占武,马立成. 2010. 长江中下游庐江-枞阳火山岩矿集区深部结构与成矿作用. *岩石学报*,26(9):2529-2542
- 范裕,周涛发,袁峰,钱存超,陆三明, Cooke DR. 2008. 安徽庐江-枞阳地区 A 型花岗岩的 LA-ICP MS 定年及其地质意义. *岩石学报*, 24(8):1715-1724
- 江思宏,聂凤军,张义,胡朋. 2004. 浅成低温热液型金矿床研究最新进展. *地学前缘*,11(2):401-413
- 刘洪,邱检生,罗清华,徐夕生,凌文黎,王德滋. 2002. 安徽庐枞中生

- 代富钾火山岩成因的地球化学制约. 地球化学, 31(2): 129-140
- 宁芜玢岩铁矿编写组. 1978. 宁芜玢岩铁矿. 北京:地质出版社, 1-320
- 任启江, 刘孝善, 徐兆文, 胡受奚, 胡文瑄. 1991. 安徽庐枞中生代火山构造洼地及其成矿作用. 北京:地质出版社, 1-206
- 芮宗瑶, 张洪涛, 王龙生, 陈仁义, 金伯禄, 金逢洙, 王玉胜, 周永昶, 孟庆丽. 1995. 吉林延边地区斑岩型浅成热液型金铜矿床. 矿床地质, 14(2): 99-126
- 孙红娟, 彭同江, 刘颖. 2008. 蒙脱石的晶体化学式计算与分类. 人工晶体学报, 37(2): 350-355
- 唐永成, 吴言昌, 储国正, 邢凤鸣, 王永敏, 曹奋扬, 常印佛. 1998. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质. 北京:地质出版社, 60-85
- 王德滋, 任启江, 邱检生, 陈克荣, 徐兆文, 曾家湖. 1996. 中国东部橄榄安粗岩的火山特征及其成矿作用. 地质学报, 70(1): 23-34
- 袁峰, 周涛发, 范裕, 陆三明, 钱存超, 张乐骏, 段超, 唐敏惠. 2008. 庐枞盆地中生代火山岩的起源、演化及形成背景. 岩石学报, 24(8): 1691-1702
- 翟裕生, 姚书振, 林新多. 1992. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律. 北京:地质出版社, 1-120
- 张德全, 余宏全, 李大新, 丰成友. 2003. 紫金山地区的斑岩-浅成热液成矿系统. 地质学报, 77(2): 253-261
- 周涛发, 宋明义, 范裕, 袁峰, 刘珺, 吴明安, 钱存超, 陆三明. 2007. 安徽庐枞盆地中巴家滩岩体的年代学研究及其意义. 岩石学报, 23(10): 2379-2386
- 周涛发, 范裕, 袁峰. 2008. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展. 岩石学报, 24(8): 1665-1678
- 周涛发, 范裕, 袁峰, 宋传中, 张乐骏, 钱存超, 陆三明, Cooke DR. 2010. 庐枞盆地侵入岩的时空格架及其对成矿的制约. 岩石学报, 26(9): 2694-2714

简 讯

2010年10月30日,孙贤铄基金会在北京大学世纪大讲堂举行的“2010年全国岩石学与地球动力学”研讨会上,由孙枢院士介绍了2009年孙贤铄奖得主,孙贤铄先生的遗孀孙庆萼女士代表孙贤铄基金会为中国科学技术大学的赵子福教授颁发了第四届孙贤铄奖,以表彰他在同位素地球化学研究方面所做出的贡献。

随后,孙贤铄基金会在北京大学地学楼3221会议室召开会议。出席会议的委员有:孙枢院士(主持),孙庆萼女士、李曙光院士、翟明国院士、郑永飞院士、李献华研究员、宋述光教授、孙卫东研究员、姚玉鹏处长、张立飞教授、张有学教授、钟孙霖教授、周新民教授等13位委员出席。会议投票评选了第五届孙贤铄奖得主。张立飞教授通报了孙贤铄基金的财务状况。

现场投票结果与未参加会议的委员网上投票结果综合评定,西北大学地质系的袁洪林教授当选第五届孙贤铄奖,以表彰他在同位素和微量元素微区原位分析方法方面的贡献。

袁洪林 男,1974年9月生,西北大学地质学系教授,博士。主要学术成就有:(1)首次建立锆石原位微区 Hf 同位素、U-Pb 定年和微量元素同时分析的 LA-MC-ICPMS 和 LA-Q-ICPMS 联用方法,对推动锆石 Hf 同位素地球化学及地壳 Hf 同位素演化研究有重要意义;(2)首次提出二阶段剥蚀法,可在锆石同一原位点上进行 U-Pb 定年和微量元素分析,发展了 LA-Q-ICPMS 锆石定年和微量元素示踪方法,对推动锆石微区定年和合理解释以及地球化学研究有重要意义。已发表论文 79 篇,译著 1 部,其中 SCI 论文 57 篇,SCI 论文他引超过 1000 次。