

安徽省东至县查册桥金矿地质特征及 硫铅同位素示踪

胥飞, 聂张星, 沈欢喜, 钱祥, 石磊

(安徽省地质矿产勘查局 311 地质队, 安徽 安庆 246003)

摘要: 东至县查册桥金矿位于扬子陆块北缘, 矿床规模达中型。为了解成矿物质来源, 对查册桥金矿矿石进行了硫、铅同位素分析。结果显示: $\delta(^{34}\text{S})$ 变化范围为 $1.8 \times 10^{-3} \sim 18.1 \times 10^{-3}$, 平均值为 11.09×10^{-3} , 较集中分布在 $10 \times 10^{-3} \sim 15 \times 10^{-3}$ 之间, 分布宽泛; 矿石硫化物矿物 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值介于 $17.954 \sim 19.748$ 之间, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值介于 $15.608 \sim 15.786$ 之间, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值介于 $38.107 \sim 39.411$ 之间, 它们的 μ 值 $9.43 \sim 9.77$; ω 值 $32.63 \sim 38.83$; $\omega(\text{Th})/\omega(\text{U})$ 值介于 $3.31 \sim 3.93$, $\Delta\beta$ 值 $18.45 \sim 30.06$; $\Delta\gamma$ 值 $22.96 \sim 57.97$ 。硫、铅同位素特征表明查册桥金矿床成矿物质主要来源于上地壳, 其形成与陆内造山作用和岩浆作用密切相关。

关键词: 金矿床; 地质特征; 硫同位素; 铅同位素; 造山作用; 安徽省

中图分类号: P618.51 **文献标识码:** A

0 引言

安徽省东至县查册桥金矿地处长江中下游成矿带安庆—贵池矿集区南侧, 是近年安徽省在东至地区发现的规模较大的金多金属矿床地之一, 目前该矿床规模达中型。

查册桥金矿区分为 3 个矿段、多处金多金属矿点。在“安徽省东至县查册桥—西峰尖金铜多金属矿普查”勘查过程中, 结合“安徽省东至县查册桥—西峰尖金铜多金属矿成矿条件及控矿因素研究”项目, 开展了成岩成矿同位素地球化学、同位素年代学和流体包裹体地球化学等专项研究工作, 对矿区内的多处金多金属矿床(点)的地质特征及成矿作用取得了许多认识^[1-5]。本文基于上述地质勘查工作及研究项目的资助, 开展对查册桥金矿床地质特征及硫铅同位素示踪研究。

1 区域地质背景

查册桥金矿位于扬子陆块北缘, 大别造山带与江南造山带之间的过渡带上(图 1), 该带俗称“江南过渡带”。区域上大体以高坦断裂作为构造分界, 划分为下扬子前陆带和江南隆起带两个次级构造单元, 并与陆内造山作用具有较好的耦合关系。下扬子前陆带对应为大别造山带的前陆变形带, 江南隆起带属中生代的隆起带。江南过渡带在成矿特征上具有沿江铜铁硫金成矿带和皖南钨钼多金属成矿带的过渡叠加特征, 是相对独立的成矿带。该带北侧便是重要的长江中下游成矿带^[6-7]。区域性高坦断裂经过查区中部, 东至断裂与葛公镇断裂分别位于查区西部与东部, 前两者控制着岩浆岩带在区域上的展布; 其中沿高坦断裂带及两侧, 区域物化探异常呈带状展布, 铜钨金多金属矿床点亦随其分布, 查册

收稿日期: 2019-09-25; 责任编辑: 王传泰

基金项目: 安徽省国土资源厅项目“安徽省东至县查册桥—西峰尖金铜多金属矿普查”及“安徽省东至县查册桥—西峰尖金铜多金属矿成矿条件及控矿因素研究”(编号: 2012-1-28)联合资助。

作者简介: 胥飞(1986—), 男, 工程师, 资源与勘查工程专业, 从事矿产地质勘查工作。通信地址: 安徽省安庆市迎江区菱湖南路 21 号, 安徽省地质矿产勘查局 311 地质队; 邮政编码: 246003; E-mail: xufei311@163.com

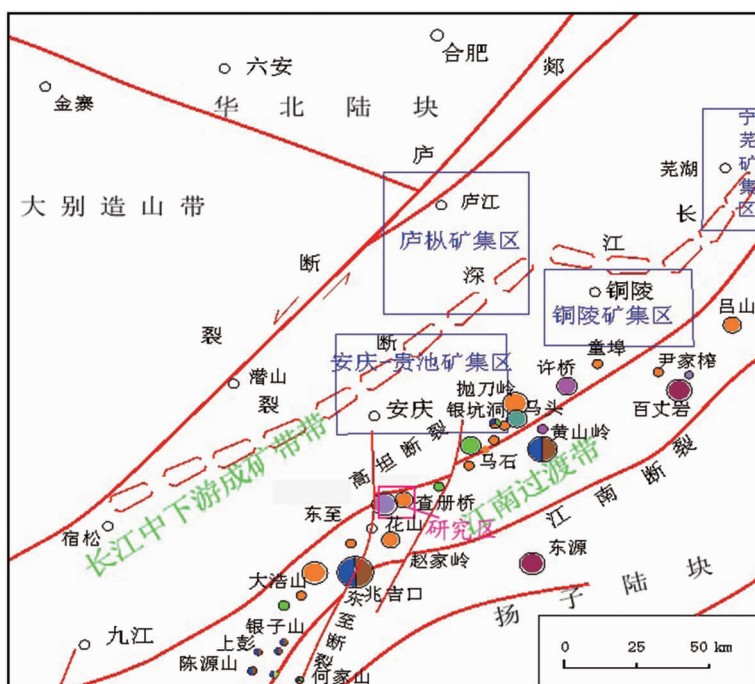


图1 东至地区构造略图(附部分矿床点)^[1]

Fig. 1 Tectonic sketch map in the Dongzhi region (ore deposits-points)

桥金矿就受该断裂控制。东至断裂同样具有重要的控岩控矿作用,花山锑金矿、赵家岭金矿、兆吉口铅锌矿、万年灯金矿点等矿床(点)分布东至断裂带及两侧。区内燕山期岩浆活动强烈,以中酸性侵入岩为主,岩石类型多,大、中、小型岩体均有出露。与成矿关系密切的岩浆作用主要有两期,一是燕山中期 142 Ma—156 Ma^[1];二是燕山晚期 125 Ma—130 Ma^[8]。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质特征

查册桥金矿区主体位于三岗尖—杨美桥背斜核部及北西翼,紧邻西侧为花山锑金矿(中型),东侧为铜锣尖铜金矿(小型)。矿区内包括牛头高家、路源、程檀等金矿段及东边、姚村多个金矿点(图2)。

区内出露地层从南华系休宁组至志留系坟头组。岩性主要为一套钙泥质、泥硅质砂、碎屑岩建造,包含多个有利成矿的高背景值地层,如震旦系蓝田组底部层位及休宁组、皮园村组,寒武系黄柏岭组 and 荷塘组黑色岩系,奥陶系五峰组黑色页岩等。其中,矿区牛头高家矿段金矿体赋矿层位主要是奥陶系五峰组、红花园组与志留系坟头组;程檀矿段金矿体赋矿层位主要是南华系休宁组、南垞组与震旦系

蓝田组;路源矿段金矿体赋矿层位主要是寒武系黄柏岭组与杨柳岗组。

区内地质构造主要表现为断裂、褶皱以及逆冲推覆/滑覆等构造。矿区金矿受构造控制明显,金多金属矿矿体主要赋存于构造破碎带中:一是沿奥陶系/志留系间的低角度逆冲—推覆断层界面分布,如牛头高家金矿段浅部为红土型金矿,深部见原生构造角砾岩型及浸染状大理岩型金矿,沿该断层破碎带东西两侧尚分布有金龙、姚村两个红土型金矿(化)点;二是寒武系内受高坦断裂(区内称花山—洋湖断裂)控制的锑金矿,花山锑金矿主要赋存于其次级近东西向张性断裂构造破碎带内;三是受北东向叠瓦状逆冲推覆断层带控制的金多金属矿,如程檀金矿段见多个金矿体产于断层破碎带中;东边矿点矿体则主要受北东向兰程顺逆冲—推覆断层控制,该断层南西段发现有层控矽卡岩型钨钼矿及蚀变岩型金矿。

区内岩浆岩见多期次燕山中—晚期的浅成岩体,呈岩株、岩枝及岩脉侵入,岩性包括花岗斑岩、花岗闪长岩、花岗闪长斑岩、闪长玢岩及英安玢岩等,岩石蚀变强烈,围岩具不同程度接触变质,局部见矽卡岩化、大理岩化。岩体的侵入主要受东西向(花山—洋湖断裂)及北东向(兰程顺)断层带控制,形成近东西向及北东向两个构造岩浆岩带。本区中生代总体

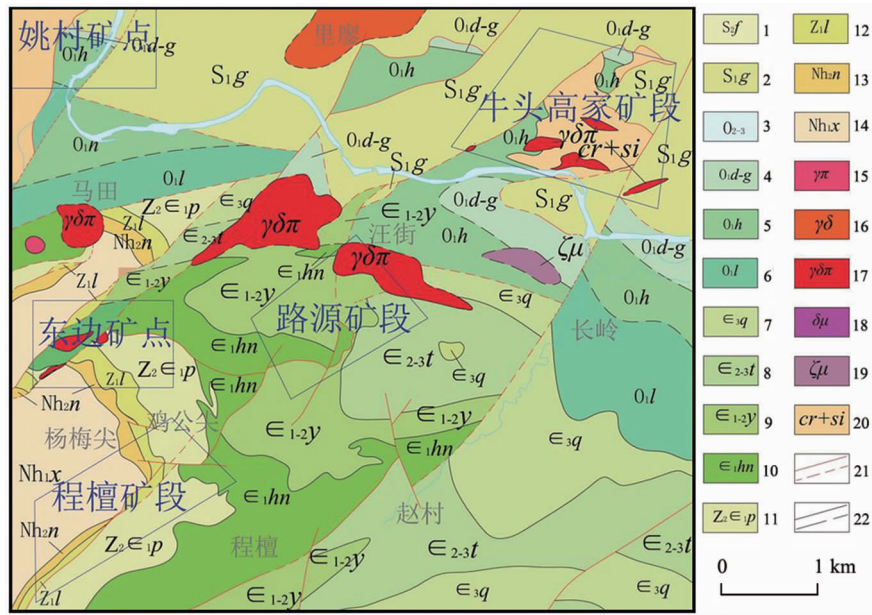


图 2 查册桥金矿矿区地质图(局部)

Fig. 2 Geological map of the Zhaceqiao gold deposit (part)

1. 志留统坟头组; 2. 下志留统高家边组; 3. 奥陶系中-上统;
4. 下奥陶统东至组—牯牛潭组; 5. 下奥陶统红花园组; 6. 下奥陶统仑山组;
7. 上寒武统青坑组; 8. 中-上寒武统团山组; 9. 中-下寒武统杨柳岗组; 10. 下寒武统黄柏岭组;
11. 下寒武-上震旦统皮园村组; 12. 下震旦统蓝田组; 13. 上南华统南沱组; 14. 下南华统休宁组;
15. 燕山期花岗斑岩; 16. 燕山期花岗闪长岩; 17. 燕山期花岗闪长斑岩;
18. 燕山期闪长岩; 19. 燕山期英安岩;
20. 含硅化岩岩块红土; 21. 实/推测断层; 22. 实/推测地质界线

上与长江中下游地区成岩成矿作用过程及特征一致,主要表现为扬子型中酸性岩体的侵入,以 I 型侵入岩为主,多为中、浅成小型斑(玢)岩体,具埃达克岩特征,并引起相关的成矿作用,矿化以铜金多金属为主。查册桥金矿区岩浆岩的锆石 U-Pb 加权平均年龄为 $142.8 \text{ Ma} \pm 2.3 \text{ Ma}$ 至 $148.3 \text{ Ma} \pm 1.7 \text{ Ma}$,反映本区燕山早期岩浆活动至少持续约 6 Ma,该期岩浆岩活动是本区一次重要的成矿时期^[1,9]。

2.2 矿体特征

查册桥矿区目前初步圈定金矿体 30 个。其中,牛头高家矿段圈定金矿体 4 个,程檀矿段圈定金矿体 5 个,路源矿段圈定金矿体 17 个,东边及姚村等矿点圈定金矿体数条。

矿区主矿体特征如下:

NAu1 号矿体。属于牛头高家矿段内主矿体,矿体总体呈北西向展布,赋存于浅表残积层及氧化带中,属氧化型金矿体;深部见少量原生矿体,赋存于东至组泥质瘤状灰岩与红花园组大理岩层间硅化构造角砾岩中。矿体以氧化矿体为主,长度 830 m,宽 160~320 m,在剖面上呈似层状、透镜状,局部有

分枝、复合的现象。铅直厚度 1~31.23 m,赋存标高为 -42.75 m—+124.14 m。金品位一般为 $w(\text{Au}) = 0.53 \times 10^{-6} \sim 2.9 \times 10^{-6}$,最高品位 3.41×10^{-6} ,矿体平均品位 $w(\text{Au}) = 1.45 \times 10^{-6}$ 。

CAu2 号矿体。属于程檀矿段主矿体,规模属大型,总体呈北东—南西向展布,赋存于 F_{78} 断层破碎带及其影响带中,南西侧矿体出露浅表部,北东侧矿体向深部延伸见厚大原生矿;矿体赋存标高为 +19 m—+362 m;长度 1100 m,倾向延伸 20~200 m;受北东向断层及其次级构造裂隙控制,总体走向 40° ,倾向南东,倾角 $55^\circ \sim 75^\circ$,多为 $65^\circ \sim 70^\circ$;真厚度 1.01~17.23 m,在剖面上呈似层状、透镜状,局部有分枝、复合的现象,金品位介于 $w(\text{Au}) = 0.50 \times 10^{-6} \sim 19.34 \times 10^{-6}$,矿体平均 $w(\text{Au})$ 为 3.44×10^{-6} 。

CAu3 号矿体。属于程檀矿段矿体,总体呈北东—南西向展布,位于 CAu2 上方,受 F_{78} 断层影响,产在次级构造裂隙中,属原生盲矿体;矿体赋存标高为 +61.1 m—+257.4 m;长度 240 m,倾向延伸 40~150 m,规模属中小型;受北东向断层的次级构造裂隙控制,总体走向 40° ,倾向南东,倾角 $60^\circ \sim 70^\circ$;真

厚度 2.66~6.82 m,在剖面上呈似层状,大透镜状;金品位 $w(\text{Au}) = 1.00 \times 10^{-6} \sim 13.70 \times 10^{-6}$,平均 2.01×10^{-6} 。

2.3 矿石特征

查册桥金矿矿石工业类型分地表红土型氧化类型金矿石和深部微细粒浸染型金矿石。其中,牛头高家矿段主要为红土型氧化类型金矿石,深部见原生硫化矿石;程檀与路源矿段主要为原生硫化物矿石,浅地表有少量氧化型矿石。

根据矿石成分及结构构造特征不同,程檀、路源矿段矿石自然类型主要有:构造角砾岩金矿石(图 3a)、碎裂岩化粉砂质泥岩金矿石、碎裂岩化花岗闪长斑岩金矿石、碎裂岩化灰质白云岩金矿石等;牛头高家矿段矿石自然类型主要有:黏土夹强风化硅化岩型金矿石(图 3b)、黏土型金矿石、褐铁矿化硅化岩型金矿石、褐铁矿化角砾岩型金矿石。

牛头高家矿段及姚村矿点矿石结构主要为松散状粉粒结构、角砾状结构、泥质结构、泥粒结构、胶状结构;程檀和路源矿段及东边矿点矿石结构主要为碎裂结构、角砾状结构(图 3c)、半自型晶结构、它形粒状结构、鳞片状变晶结构、斑状结构、压碎结构等。

矿石矿物主要有黄铁矿、褐铁矿,少量磁黄铁

矿、闪锌矿、方铅矿,偶见、毒砂、自然金、黄铜矿、自然银、银金矿;主要脉石矿物有石英、方解石、铁白云石、绢云母、碳酸盐类及黏土类矿物(图 3d)。

2.4 矿物组合与成矿阶段

依据矿石矿物共生组合特征,查册桥金矿初步划分 3 个成矿阶段:Ⅰ阶段以石英为主—少量硫化物阶段,以岩石整体硅化形成硅化帽+少量黄铁为主要特征,金矿化较弱;Ⅱ阶段为大量硫化物—金—石英阶段,为区内主要金成矿阶段,硫化物主要为黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿;Ⅲ阶段为硫化物—石英—大量碳酸盐阶段,以大量碳酸盐细脉和少量乳白色纯净硅质脉为主要特征,同为重要成矿阶段之一。

2.5 围岩蚀变

查册桥矿区围岩蚀变主要有褐铁矿化、黄铁矿化、碳酸盐化、硅化、绢云母化等,其中硅化、黄铁矿化至少包括两期,碳酸盐化、硅化、褐铁矿化、黄铁矿化与金矿化关系密切。牛头高家矿段矿体围岩主要为黏土夹强风化硅化岩(角砾岩),局部为花岗闪长斑岩岩体、白云石大理岩,矿体与顶板围岩差异不明显,为逐渐过渡关系;程檀矿段矿体围岩主要为碎裂岩化长石石英砂岩、碎裂岩化粉砂质泥岩;路源矿段

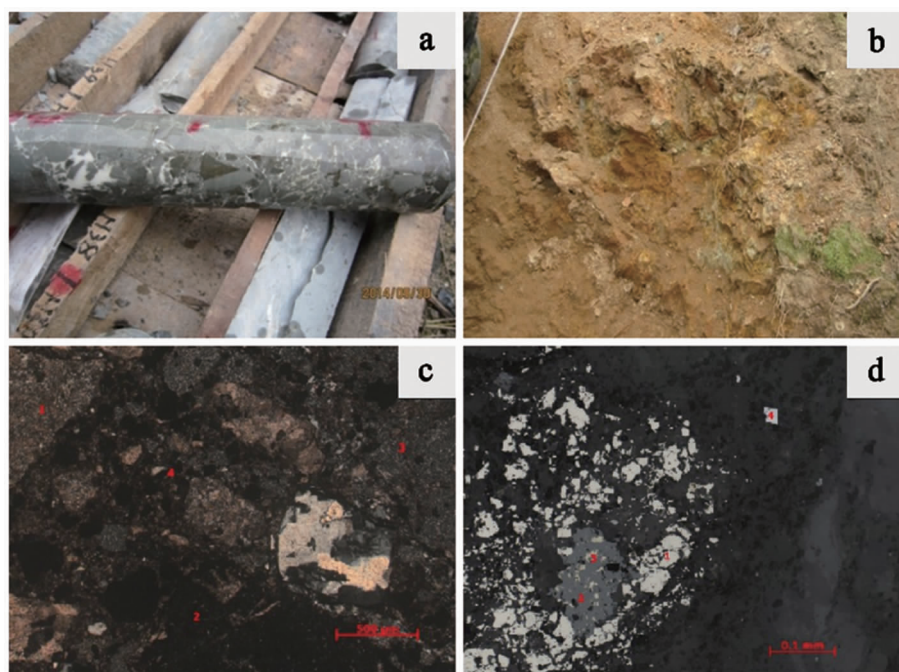


图 3 查册桥金矿矿石特征和显微照片

Fig. 3 Photographs and microphotographs of ore feature in Zhaceqiao gold deposit

a. 构造角砾岩型金矿石; b. 强风化褐铁矿化构造角砾岩型金矿石(氧化矿);

c. 角砾状结构(1. 硅质白云岩角砾, 2. 碳质板岩角砾, 3. 含白云石硅质板岩角砾, 4. 胶结物);

d. 它形粒状结构(1. 黄铁矿, 2. 闪锌矿, 3. 黄铜矿, 4. 毒砂)

矿体围岩主要为碎裂岩化泥灰岩、碎裂岩化粉砂质泥岩,围岩均不同程度具金矿化,蚀变也与矿体无明显差异。

3 硫铅同位素特征

硫、铅同位素组成在矿床研究中对成矿物质来源具有指导意义。硫是成矿热液中最主要的矿化剂,而金的产出与黄铁矿等金属硫化物关系密切,研究含金硫化物中硫的组成变化可了解矿床中硫的来源、成矿元素迁移和沉淀机理,为矿床成因和成矿物理化学条件提供指示作用。铅同位素不仅具有计时性,而且具有追踪性;追踪性在研究矿体成因、物质来源等方面已得到广泛应用^[10]。

3.1 样品采集加工与测试

(1)样品采集加工

本次样品的采取均选取矿段内具一定金品位的矿石。硫同位素样品共 19 件。其中,牛头高家矿段 9 件,程檀矿段 10 件。铅同位素样品共 16 件。其中,牛头高家矿段 8 件,程檀矿段 7 件,路源矿段采取了 1 件;因路源矿段资源量少,且靠近程檀矿段,本次将其并入程檀矿段。

本次获取的目标矿物样品为黄铁矿、辉锑矿、闪锌矿、方铅矿,并在廊坊岩拓地质服务有限公司进行样品加工和单矿物挑选工作。

(2)测试方法

硫同位素样品测试工作由核工业北京地质研究院分析测试中心同位素室和中国科学院地球化学研究所完成。方法流程:将待测单矿物样品磨至 200 目以下,样品的前处理在矿床地球化学开放研究实验室进行,不同的硫化物分别加不同比例的 CuO 后置于马弗炉内,在 1000℃ 真空条件下反应 15 min,将 S 氧化成 SO₂;S 同位素组成在 MAT252 型质谱仪上测定,相对误差<0.2×10⁻³。

铅同位素测试工作由核工业北京地质研究院分析测试中心同位素室完成,所用测试仪器为 Isoprobe-T 热电离质谱计,相对误差小于 2σ。具体分析流程:首先将样品放入聚四氟乙稀坩埚中,加入氢氟酸、高氯酸溶样;样品分解后将其蒸干,加入盐酸溶解蒸干,加入 0.5 mL HBr 溶液溶解样品进行铅的分离;然后把溶解好的样品倒入预先处理好的强碱性阴离子交换树脂中进行铅的分离,用 0.5 mL HBr 溶液淋洗树脂,再用 2 mL HCl 溶液淋洗树脂,

最后用 6 mL HCl 溶液解脱,将解脱溶液蒸干备质谱测定;最后用热表面电离质谱法进行铅同位素测量。

3.2 硫同位素测试结果

根据硫同位素测试结果进行统计,查册桥金矿硫化物硫同位素组成如表 1 所述。

从表 1 可知,查册桥金矿矿石样品中的硫化物 δ(³⁴S_{V-CDT}) 值的变化范围为 1.8×10⁻³~18.1×10⁻³,平均值为 11.09×10⁻³,较集中分布在 10×10⁻³~15×10⁻³ 区间。其中,牛头高家矿段硫化物 δ(³⁴S_{V-CDT}) 值变化范围为 1.8×10⁻³~13.7×10⁻³,平均值为 8.14×10⁻³,较集中分布在 6×10⁻³~7×10⁻³ 之间;程檀矿段硫化物 δ(³⁴S_{V-CDT}) 值变化范围为 7.4×10⁻³~18.1×10⁻³,平均值为 13.74×10⁻³,较集中分布在 14×10⁻³ 左右;程檀矿段 δ(³⁴S_{V-CDT}) 值大于牛头高家。此外,本次硫化物中辉锑矿样品数量偏少,但也能大体说明其 δ(³⁴S_{V-CDT}) 值相对黄铁矿中的 δ(³⁴S_{V-CDT}) 值高一些。

表 1 查册桥金矿硫化物硫同位素组成
Table 1 Sulfur isotopic composition of sulfides
in Zhaceqiao gold deposit

序号	样号	矿物	δ(³⁴ S _{V-CDT})/10 ⁻³	备注
1	CT-Fes	黄铁矿	15	程檀
2	ZK04-Sb	辉锑矿	14.7	
3	ZK04-Zn	闪锌矿	11.1	
4	CT-Sb3	辉锑矿	18	
5	CT-Sb1	辉锑矿	18.1	
6	CZK0005-S1	黄铁矿	7.4	
7	ZT2	黄铁矿	12.3	
8	ZT4	黄铁矿	12.8	
9	CZK0303-S2	黄铁矿	14.4	
10	CZK0303-S1	黄铁矿	13.6	
11	ZKN0301-S1	黄铁矿	6.1	牛头高家
12	ZKN0301-S2	黄铁矿	1.8	
13	LC-S	黄铁矿	13.7	
14	ZKN0303-S-Pb	黄铁矿	6.8	
15	ZKN001-01	黄铁矿	11.2	
16	ZKN001-02	黄铁矿	9.6	
17	ZK02-1	黄铁矿	6.4	
18	ZK02-2	黄铁矿	7.4	
19	ZT8	黄铁矿	10.3	

3.3 铅同位素测试结果

根据铅同位素测试结果进行统计,查册桥金矿硫化物铅同位组成如表 2 所述。

查册桥金矿矿石样品中的 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 值介于 17.954~19.748 之间;²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 值介于 15.608~15.786 之间,变化范围很小;²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 值介于 38.107~39.411 之间,相对较集中;μ 值介于 9.43~

表 2 查册桥金矿矿石铅同位素组成及相关参数

Table 2 Lead isotope composition and characteristic parameters of ore in Zhaceqiao gold deposit

样号	样品名	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	μ	ω	$w(\text{Th})/w(\text{U})$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$	备注
ZKN001-Pb1	黄铁矿	18.579	15.719	38.722	9.68	37.87	3.79	25.69	39.47	
ZKN001-Pb2	黄铁矿	19.027	15.786	39.411	9.77	38.82	3.85	30.06	57.97	
ZK02-Pb1	黄铁矿	18.366	15.639	38.544	9.55	37.56	3.81	20.47	34.69	
ZK02-Pb2	黄铁矿	18.268	15.657	38.549	9.59	38.32	3.87	21.64	34.83	牛头
ZK02-Pb3	黄铁矿	18.941	15.732	38.707	9.67	36.02	3.6	26.54	39.07	高家
ZK02-Pb4	黄铁矿	19.748	15.777	38.885	9.7	33.28	3.32	29.47	43.85	
ZKN0303-Pb1	黄铁矿	18.948	15.608	38.16	9.43	32.81	3.37	18.45	24.38	
ZKN0301-Pb1	黄铁矿	18.498	15.719	38.56	9.69	37.65	3.76	25.69	35.12	
ZKD0303-1	黄铁矿	18.818	15.672	38.388	9.57	34.86	3.53	22.62	30.51	
CTZK21-1	方铅矿	19.202	15.754	38.299	9.69	33.39	3.33	28.04	28.56	
CTZK21-2	黄铁矿	19.055	15.669	38.107	9.54	32.63	3.31	22.42	22.96	
CTC1001-1	闪锌矿	17.954	15.618	38.325	9.56	38.83	3.93	19.13	29.26	程檀
ZK04-1	闪锌矿	18.207	15.711	38.289	9.71	38.08	3.8	25.25	28.72	
ZK04-2	辉锑矿	18.52	15.676	38.46	9.6	36.72	3.7	22.84	32	
CT-1	黄铁矿	18.493	15.67	38.429	9.59	36.68	3.7	22.49	31.61	
ZKL0101L-1	黄铁矿	18.531	15.687	38.499	9.62	36.92	3.71	23.6	33.48	路源

9.77 之间,平均值 9.62; ω 值介于 32.63~38.83 之间,平均值 36.28; $w(\text{Th})/w(\text{U})=3.31\sim 3.93$,平均值 3.65; $\Delta\gamma$ 、 $\Delta\beta$ 值分别介于 22.96~57.97、18.45~30.06 之间。

4 讨论

4.1 硫同位素特征

硫具有三种不同的 ^{34}S 储库^[11]。其中,幔源硫,其 $\delta(^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}})$ 值约为 $0\pm 3\times 10^{-3}$;海水硫,其 $\delta(^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}})$ 值为 $+20\times 10^{-3}$;具有强还原的沉积硫,其 $\delta(^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}})$ 值为负。查册桥金矿区 19 件硫化物样品 $\delta(^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}})$ 值变化范围为 $1.8\times 10^{-3}\sim 18.1\times 10^{-3}$,分布较为分散,变化范围较大(见表 1);说明矿区载金硫化物中硫来源广泛,具明显的混合来源特征。这与矿区氢-氧、碳-氧同位素研究结果一致。它们证明矿区成矿流体成分来自多源,金矿床的形成经历了多个流体成矿阶段。此外,查册桥矿区牛头高家矿段 $\delta(^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}})$ 值明显小于程檀矿段的 $\delta(^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}})$ 值,其原因可能与两者在成矿空间展布或受控矿构造不同有关;牛头高家矿段主体位于近东西向高坦断裂成矿带上,该带形成时期较早,且切割较深,成矿流体更具有深源特征;程檀矿段主体位于北东向叠瓦状逆冲推覆断层带上,形成时间较晚,切割相对较浅,可能历经成矿作用时间长、阶段多。杨书桐^[12]对东至地区不同时代地层中星散状沉积型黄铁矿的硫同位素进行了系统研究,区内沉积岩中

$\delta(^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}})$ 值变化范围 $12\times 10^{-3}\sim 23\times 10^{-3}$ 。牛头高家矿段硫化物中 $\delta(^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}})$ 的平均值为 8.14×10^{-3} ,远小于区内沉积岩;程檀矿段 $\delta(^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}})$ 均值为 13.74×10^{-3} ,接近区内沉积岩。由于影响 $\delta(^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}})$ 值变化的主要因素并非成矿溶液成分,而是成矿溶液迁移过程中硫同位素的动力分馏(扩散分馏),这也说明程檀矿段中硫元素可能历经更加长远的迁移过程,在后期迁移过程中接触了地层硫。

4.2 铅同位素特征

铅同位素用于示踪成矿物质的方法有多种,本次主要采用构造模式图解法、特征参数对比法及 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 成因分类图解法来进行探讨示踪成矿物质。

将本次测试样品的铅同位素分析结果数据(见表 2)投到铅同位素构造模式图^[13-14] 中(图 4),其主要落在上地壳演化线上和上地壳与造山带演化线之间(图 4a),这表明成矿物质均与俯冲造山活动有关。在后期还有部分深源下地壳或幔源物质加入成矿(图 4b)。

将本次测试样品的铅同位素特征值 $\Delta\gamma$ 、 $\Delta\beta$ 数据(见表 2)投入到 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 成因分类图解^[13,15] 中(图 5),从该图解可知:①各类型矿石铅主要投影在上地壳与地幔混合的俯冲带区岩浆作用铅的范围内,个别的数据点进入上地壳铅源区域内,说明矿区的铅主要为上地壳铅和少量幔源铅的混合铅。②矿区内两金矿段铅同位素数据点在图中集中分布,说明大的成矿环境比较接近,但又略有不同。其中,牛头高家数据点具有呈现线性延展的趋势,暗示出矿区不同类型矿石的铅具有相关性,推测是同期成矿作用

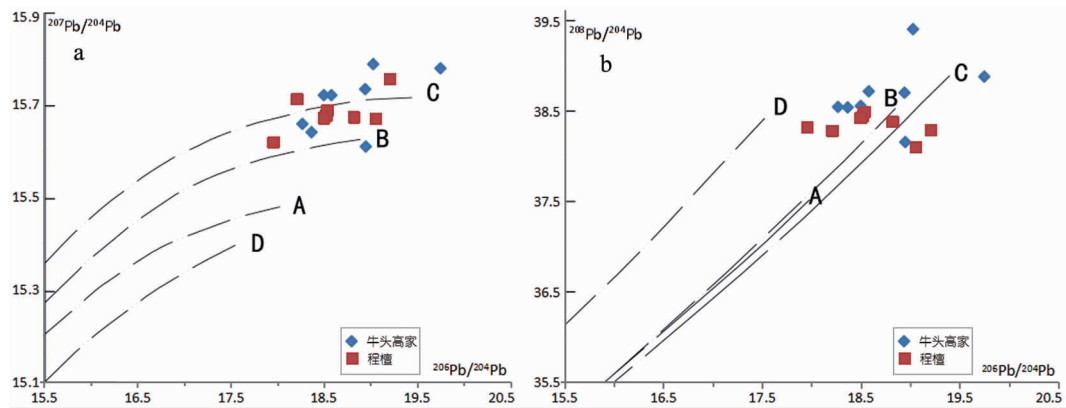


图 4 查册桥金矿铅同位素构造模式图

(底图据文献[13-14])

Fig. 4 Lead isotope tectonic pattern in Zhacheqiao gold deposit

A. 地幔; B. 造山带; C. 上地壳; D. 下地壳

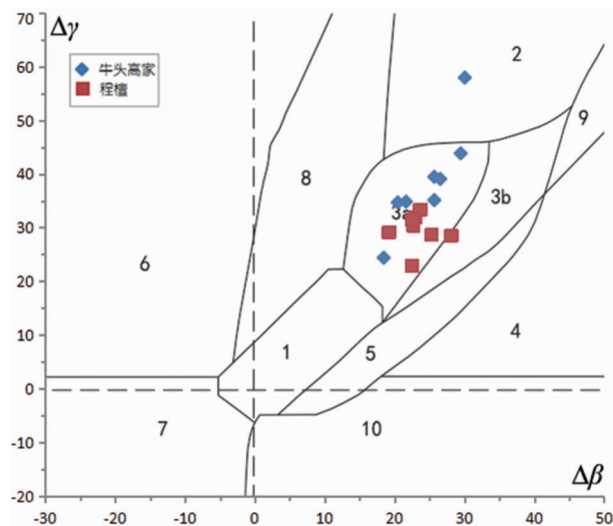
的产物;程檀矿段数据点集中但有向沉积作用靠近趋势,推测程檀矿段成矿期次不同,具多期叠加成矿的特征,且成矿时间及周期长于牛头高家。这也与区内成矿岩浆岩锆石 U-Pb 测年结果趋势一致,牛头高家与成矿有关的花岗闪长斑岩其值为 $148.3 \text{ Ma} \pm 1.7 \text{ Ma}$,而程檀矿段为 $142.8 \text{ Ma} \pm 2.3 \text{ Ma}$,两者相差了约 6 Ma。同时,不排除经历了后期(约 128

Ma)的岩浆作用。

铅同位素源区特征值,尤其是 μ 值的变化能提供地质体经历地质作用的信息,反映铅的来源。具有高 μ 值(>9.58)的铅通常被认为是来自 U、Th 相对富集的上部地壳物质^[16]。查册桥矿区本次测试样品的矿石铅同位素 μ 值介于 9.43~9.77 之间,平均值 9.62,相对集中,高于地壳原始铅 μ 值(9.58)范围,表明铅源具有下地壳物质特征。另外,本次测试样品的矿石铅同位素 ω 值介于 32.63~38.83 之间,平均值 36.28,略低于平均地壳铅的 ω 值(36.84); $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值的平均值为 3.65,小于地壳 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值(约为 4)。本次测试样品的矿石铅同位素参数 μ 、 ω 和 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值所反映的现象略有不同,显示了区内铅来源较广泛,具有复杂性。

4.3 成矿物质来源

综合上述查册桥矿区矿石矿物中硫同位素特征、铅同位素参数特征和构造模式图解及 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 图解信息,反映其成矿物质主要来源于岩浆热液,部分来自围岩地层。此外,查册桥矿区中岩浆岩继承锆石年龄数据中有几颗最大核部年龄在 $2021 \text{ Ma} \pm 47.4 \text{ Ma}$ — $116 \text{ Ma} \pm 38.5 \text{ Ma}$,另普遍存在一组 670~900 Ma 左右的年龄值,在邻区花山梯金矿、兆吉口铅锌矿等也有上述两组年龄值^[17-19]存在,说明本区岩浆上侵过程中,捕获了大量基底岩层中的岩浆锆石。反映了晋宁期(或早期)古远古基底等俯冲物质再循环到中生代岩浆参与成矿作用中去^[20-21]。结合大地构造位置、区域地质特征及岩浆性质分析认为,本区的金矿成矿过程较为复杂,可能经历了多

图 5 查册桥金矿铅同位素 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 图解

(底图据文献[13,15])

Fig. 5 Lead isotope $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ diagram of Zhacheqiao gold deposit

1. 地幔源铅; 2. 上地壳铅;
3. 上地壳与地幔混合的俯冲带铅(3a. 岩浆作用, 3b. 沉积作用);
4. 化学沉积型铅; 5. 海底热水作用铅; 6. 中深变质作用铅;
7. 深变质下地壳铅; 8. 造山带铅;
9. 古老页岩上地壳铅; 10. 退变质铅

期叠加改造作用,同时具有了长江中下游成矿带和江南造山带成矿特征。但金矿的形成与燕山期岩浆作用关系最为密切,成矿物质主要来源于岩浆热液,而岩浆岩具壳幔混熔特征^[22-23],因此查册桥及邻区具有很大的找矿潜力。

5 结语

本次通过对安徽省东至县查册桥金矿床地质特征、矿石硫化物矿物的硫铅同位素组成分析,得出以下结论:

(1)根据矿区地质特征及同位素测定结果来看,安徽省东至县查册桥金矿是一严格受构造控制的金矿床,可能受江南造山带挤压影响进行初始的金元素等成矿物质富集,并且在后期经历了与长江中下游主成矿时期的岩浆成矿作用。

(2)结合矿区成矿流体和同位素地球化学及年代学等研究成果,认为矿床成矿物质主要来自岩浆热液,部分来自围岩地层。区内岩浆活动除了本身携带了成矿元素外,还对先期形成的矿源层、含矿岩系、甚至矿床(化)中的成矿元素起着改造与萃取作用。

(3)查册桥金矿床硫铅同位素示踪结果表明,金矿床成矿物质来源比较复杂。铅主要来自上地壳及混染了少量幔源铅的混合铅,金矿形成与陆内造山作用和岩浆作用密切相关。结合矿区所处的大地构造位置,同时具有了长江中下游成矿带和江南造山带成矿特征,说明查册桥金矿及邻区具有很大的找矿潜力。

致谢: 本文是安徽省国土资源厅《安徽省东至县查册桥—西峰尖金铜多金属矿普查》项目及其所属《安徽省东至县查册桥—西峰尖金铜多金属矿成矿条件及控矿因素研究》专题取得的成果,项目工作中得到了众多同事的帮助,在此表示衷心的感谢。

参考文献:

[1] 聂张星,石磊,古黄玲,等. 江南过渡带东至查册桥金矿⁴⁰Ar-³⁹Ar年代学及成矿条件研究[J]. 大地构造与成矿学, 2017, 41(3): 502-515.

[2] 胥飞,钱祥,聂张星,等. 安徽省东至县程檀金矿成矿流体地球化学研究[J]. 矿产与地质, 2019, 33(6): 956-963.

[3] 沈欢喜,石磊. 安徽省东至县牛头高家金矿地质特征及找矿意义[J]. 地质调查与研究, 2016, 39(1): 24-30.

[4] 石磊,聂张星,钱祥,等. 安徽省东至县牛头高家金矿硫铅同位素示踪性浅析[J]. 矿产与地质, 2015(2): 284-288.

[5] 聂张星,钱祥,石磊,等. 安徽省东至县牛头高家金矿地质特征及找矿意义[J]. 安徽地质, 2012(3): 107-110.

[6] 常印佛,刘湘培,吴言昌. 长江中下游铜铁成矿带[M]. 北京:地质出版社, 2012: 1-102.

[7] 周涛发,范裕,袁峰,等. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展[J]. 岩石学报, 2008, 24(8): 1665-1678.

[8] 徐晓春,刘雪,张赞赞,等. 安徽东至兆吉口铅锌矿区岩浆岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质科学, 2014, 49(2): 431-455.

[9] 聂张星,石磊,古黄玲,等. 皖南东至查册桥金矿岩浆岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 2016, 90(6): 1146-1166.

[10] 黄建军,黄斌,任小华,等. 铅同位素在煎茶岭金矿快速追踪定位打靶中的应用[J]. 黄金科学技术, 2002, 10(1): 33-39.

[11] Rollison G. Volumetric closed chemical transfer system [P]. United States Patent 5199472, 1993.

[12] 杨书桐. 皖南东至金矿化域 Au-As-Sb 组合中各元素地质特征差异性研究[J]. 地质与勘探, 1992, 12(11): 49-53.

[13] 朱炳泉. 地球科学中同位素体系理论与应用兼论中国大陆壳幔演化[M]. 北京:科学出版社, 1998: 1-330.

[14] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics—the model [J]. Tectonophysics, 1981, 75(1): 135-162.

[15] Chaussidon M, Lorand J P. Sulphur isotope composition of orogenic spinel lherzolite massifs from Ariege (N E Pyrenees France): An ion microprobe study [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1990, 54: 2835-2846.

[16] 吴开兴,胡瑞忠,毕献武,等. 矿石铅同位素示踪成矿物质来源综述[J]. 地质地球化学, 2002, 30(3): 73-79.

[17] 薛怀民,马芳,宋永勤,等. 江南造山带东段新元古代花岗岩组合的年代学和地球化学:对扬子与华夏地块拼合时间与过程的约束[J]. 岩石学报, 2010, 26(11): 3125-3224.

[18] 曹达旺,陈永明,乐成生. 东至县兆口铅锌多金属矿成矿地质特征及找矿方向[J]. 上海地质, 2010, 31(增刊): 206-209.

[19] 杨书桐. 皖南花山金矿化域蚀变岩体的地质地球化学特征及成因探讨[J]. 安徽地质, 1993(1): 42-48.

[20] 聂张星,李敏,沈欢喜,等. 安徽省东至地区金矿类型及找矿方向[J]. 安徽地质, 2013(3): 137-143.

[21] 邢凤鸣,徐祥,李志昌. 长江中下游早元古代基底的发现及意义[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1883-1886.

[22] 赵玲,陈志洪. 皖南谭山岩体的锆石定年及地质意义[J]. 资源调查与环境, 2014, 35(3): 185-191.

[23] 嵇福元,李音平,周栗,等. 皖南地区微细浸染型金矿地球化学特征[J]. 江苏地质, 1991(3): 137-143.

Geological features and sulfur and lead tracer isotopes of the Zhaceqiao gold deposit in Dongzhi county of Anhui province

XU Fei, NIE Zhangxing, SHEN Huanxi, QIAN Xiang, SHI Lei

(No. 311 Geological Team, Anhui Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration,
Anqing 246003, Anhui, China)

Abstract: Zhaceqiao gold deposit in Dongzhi County located at the north margin of Yangtze Block, It is a medium-sized gold deposit. Sulfur and Lead isotopes of ores from Zhaceqiao deposit were analyzed to understand the source of metallogenic materials, Results show that the $\delta(^{34}\text{S}_{\text{V-CTD}})$ range from 1.8×10^{-3} to 18.1×10^{-3} with an average value of 11.09×10^{-3} . They have a wide distribution and mainly distribute from 10×10^{-3} to 15×10^{-3} . The ranges of $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios of ore minerals are $17.954 \sim 19.748$, $15.608 \sim 15.786$ and $38.107 \sim 39.411$. The range of μ is from 9.43 to 9.77, The range of ω is from 32.63 to 38.83, The range of $w(\text{Th})/w(\text{U})$ is from 3.31 to 3.93, The range of $\Delta\beta$ is from 18.45 to 30.06, The range of $\Delta\gamma$ is from 22.96 to 57.97. These Sulfur and Lead isotopic features suggest that the Zhaceqiao gold deposit metallogenic materials are mainly derived from upper crust, It is closely related to intracontinental orogenesis and magmatism.

Key Words: gold deposit; geological features; sulfur isotope; lead isotope; orogeny; Anhui province