

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2021.01.005

皖东凤阳地区中家山铅锌(金银)矿床 硫铅同位素组成及意义

康丛轩^{1,2,3}, 杨献忠¹, 蔡逸涛¹

(1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京 210016;

2. 城市地下空间探测评价工程技术创新中心, 南京 210016;

3. 河海大学地球科学与工程学院, 南京 211100)

摘要: 中家山铅锌(金银)矿床位于蚌埠隆起东部。通过矿石微观矿物分析、主要金属矿物电子探针分析及硫化物硫、铅同位素组成分析,探讨中家山铅锌(金银)矿床的成矿物质来源,初步分析了其成矿机制。研究表明,中家山铅锌(金银)矿床黄铁矿接近变质成因类型,Ag以类质同象形式存在,并可能包含银黝铜矿等独立银矿物,闪锌矿具有层控型特征;硫化物 $\delta(^{34}\text{S})$ 值介于 $4.2 \times 10^{-3} \sim 6.1 \times 10^{-3}$ 之间,正向偏离陨石硫,显示多源的特征。矿床的成矿物质可能来源于地幔或围岩;铅同位素 μ 值为 $9.23 \sim 9.39$,说明矿石铅来源于深部地壳或者上地幔,成矿作用与岩浆活动有关,成矿物质具有壳幔混源特征。矿床的形成可能与中高温热液作用有关,岩体岩浆源区为古老的地下地壳物质,强烈的壳幔作用会有幔源物质底侵,成矿元素丰度较高的变质基底地层(五河群)部分熔融和幔源物质的加入。

关键词: 中家山铅锌(金银)矿床;矿石矿物成分;硫铅同位素;成矿物质来源;安徽省

中图分类号: P618.42 **文献标识码:** A

0 引言

研究区地处华北准地台金银铜铅锌成矿区,五河—凤阳金成矿带。蚌埠地区的金多金属矿大多数赋存在五河群地层中,其中又以在西崮堆组岩石中居多。已有研究认为五河岩群西崮堆组是本区金矿的赋矿层位^[1-4]。近几年来对江山铅锌金银矿床、中家山铅锌(金银)矿床等的研究表明,五河—凤阳地区金矿的赋矿层位不仅赋存于五河群西崮堆组岩层中,在五河群庄子里组(江山铅锌金银矿床)、小张庄组(中家山铅锌矿床)、峰山李组(毛山金矿床)岩层中均有金矿床赋存^[5]。蚌埠地区的金多金属矿主要分布在庐断裂带的次级韧性剪切带内及其附近。已知铅锌等多金属矿床(点)分布在区域内近东西向

构造线与北北东向构造的交汇处,也反映出研究区构造控矿的多样性。前人较多的研究成果显示,本区的成矿作用时代大致与胶东半岛金矿主要成矿时代(120 Ma \pm 10 Ma)或小秦岭地区金矿成矿时代(112 Ma \pm 7 Ma)一致^[6-9]。本区金铅锌多金属矿并不是形成于韧性剪切带变形期间,而是在韧性剪切带向地壳浅部抬升进入韧—脆性和脆性变形域之后才形成的。但是,韧性剪切带作为成矿作用期前已经形成的构造,其各向异性特征对成矿期间岩浆及热液活动的空间分布仍然具有比较重要的影响甚至控制作用^[5]。

前人对本区金矿床的研究成果较丰富,但该矿区金的成矿作用可能与铅锌矿成矿作用存在显著差异,或根本非同—成因。铅锌矿成矿规律的研究对查明本区矿床成因和成矿类型并指导进一步找矿具有重要意义。因此,笔者从中家山铅锌(金银)矿床

收稿日期: 2020-08-24; **责任编辑:** 王传泰

基金项目: 安徽省公益性地质调查基金项目(编号:2014-K-5)资助。

作者简介: 康丛轩(1985—),男,博士研究生,高级工程师,主要从事工程地质及矿物、岩石、矿床学研究。通信地址:江苏省南京市中山东路534号,中国地质调查局南京地质调查中心;邮政编码:210016;E-mail:kangcongquan@sina.com

中矿石主要矿物的显微特征入手,通过电子探针分析、金属硫化物硫铅同位素研究,以期为深入讨论研究区铅锌多金属矿床成矿机制、找矿方向提供参考。

1 区域地质背景

五河—凤阳地区位于淮河中下游,大地构造位置上处于华北板块东南缘(图1),主要赋矿地层为新太古代变质结晶基底五河岩群,岩性主要为一套变质的火山-沉积岩系,原岩由酸性-超基性火山岩、凝灰岩、杂砂岩、泥灰岩及少量铁质碧玉岩组成。变质基底具有较高的含金丰度,西垵堆岩组、峰山李岩组、张庄岩组是金矿赋存的主要层位;本区北北东向、近南北向、北西西向和北东向断裂发育,为区内重要的控矿构造;岩浆活动以燕山晚期中酸性-碱性小岩体为主,岩脉局部出露,另有少量古元古代侵入体,分布于怀远、蚌埠、凤阳至五河一带,呈东西向带状侵入于五河岩群中。

研究区主要金属矿产有金、铅锌(银)、铁等,其中金矿以小型为主,金矿点众多,矿化类型以石英脉型和构造蚀变岩型为主。铅锌(银)矿化点分布较多,矿化类型多为层控型、热液型及接触交代型。本区铁矿以小型为主,矿化类型以(沉积)变质型为主,

少量热液型。该地区与金有关矿床、点(矿化点)共有20多处。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质

中家山铅锌(金银)矿区地处蚌埠隆起东端南翼与郯庐断裂带西缘交会复合部位。矿区地势起伏不大,第四系黏土、亚黏土大面积覆盖,局部基岩出露。本区出露地层主要为新太古界五河群西垵堆组和小张庄组,岩性为黑云微斜长片麻岩、变粒岩。地层受断裂控制总体走向北东,倾向东南(图2)。

矿区构造主要表现为北东向及北西西向两组断裂,为一系列张、压扭性断裂,也是矿区的容控矿构造,断裂带内均发生矿化蚀变。

区内岩浆岩不发育,仅见一些细小岩脉,主要有煌斑岩和闪长玢岩以及充填于构造带中的石英岩^[11]。

2.2 围岩蚀变

区内围岩蚀变的类型主要有褐铁矿化、黄铁矿化、方铅矿化、闪锌矿化、孔雀石化、黄铜矿化、硅化、绢英岩化及碳酸盐化等。蚀变分带不明显,自矿体向上、下盘依次为方铅矿化、闪锌矿化、黄铁矿化、硅化、绢英岩化、碳酸盐化。其中,在铅锌硫化矿化

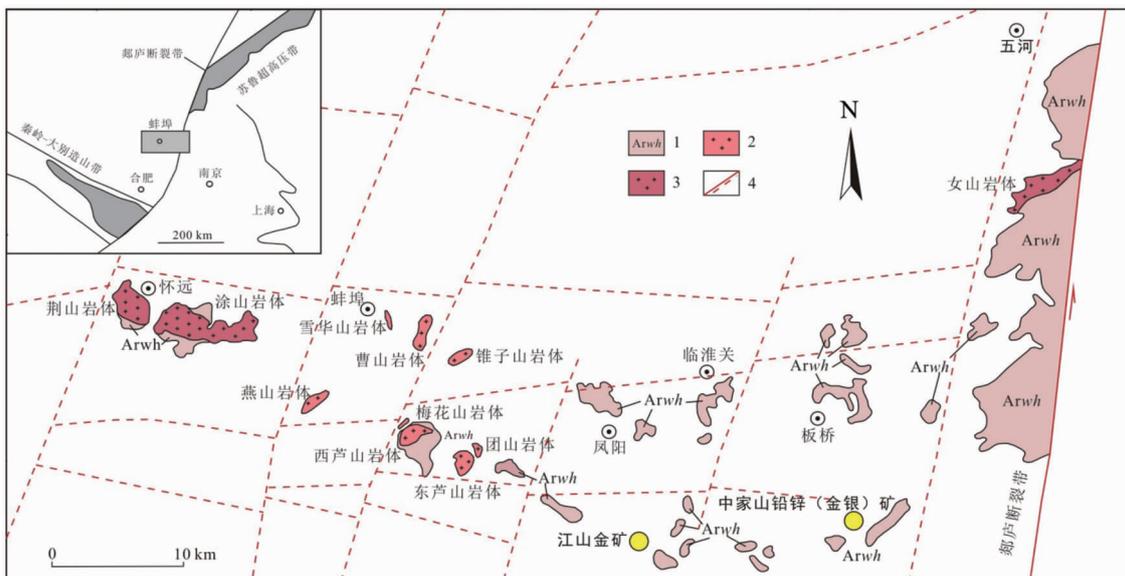


图1 中家山铅锌(金银)矿床区域地质简图(据1:20万地质图、文献[10],修编)

Fig.1 Regional geological sketch of Zhongjiashan lead-zinc (gold-silver) deposit

1. 五河群;2. 早白垩世侵入体;3. 其他侵入体;4. 断裂构造

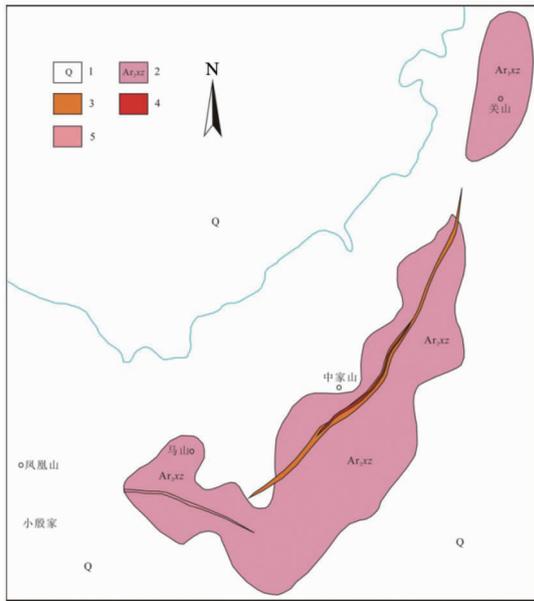


图 2 中家山铅锌(金银)矿床地质简图
(据文献[5],修编)

Fig. 2 Geological sketch of Zhongjiashan lead-zinc (gold-silver) deposit

- 1. 第四系; 2. 五河群小张庄组; 3. 构造蚀变岩带;
- 4. 多金属矿体; 5. 多金属矿化体

强的部位铁锰矿化发育;黄铁矿化一般与铅锌矿化同时出现;硅化与构造、岩浆活动及铅锌矿化关系密切,在构造蚀变带内出现,硅化强的部位常形成铅锌矿化;碳酸盐化一般出现在铅锌矿化带内,是一种近

矿围岩的重要蚀变^[12-13]。

2.3 矿体特征

中家山铅锌(金银)矿床,是受北北东向—北东向及北西向两组构造挤压破碎带控制的脉状半隐伏的以铅、锌为主,共(伴)生金、银的构造蚀变岩型矿床。依据构造蚀变带地质特征、矿化特征和空间分布特征,中家山铅锌(金银)矿床划分为三个矿段,即北东部的中家山矿段,中部的马山矿段和南西部的凤凰山矿段。马山矿段构造蚀变带由 4 条近似平行的含矿构造蚀变带组成。自西向东间距变大。矿床矿体产出稳定,形态较规则。矿体围岩主要为浅粒岩和黑云母斜长片麻岩(图 3),由于受到构造活动的影响,近矿围岩多次破碎形成碎裂岩,多分布于破碎带两旁。当岩石破碎,黄铁矿化、硅化等蚀变作用增强后,形成碎裂蚀变带。

2.4 矿石特征

矿石自然类型主要有 4 种:含铅构造角砾岩型矿石,含铅、锌构造角砾岩型矿石,含铅、锌、银构造角砾岩型矿石及含铅锌金构造角砾岩型矿石。主要矿石矿物多为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿及黄铜矿。

矿石扫描电镜样品总体为黄铁矿与石英脉共生。样品电镜下显微影像显示黄铜矿、黄铁矿晶型较差(图 4a),充填于石英脉之内,见少量碳酸盐矿物(CaCO₃)及少量重晶石(BaSO₄)沿石英脉充填(图 4b);结合能谱分析,认为黄铜矿有两次充填,后期充填晶型略好。

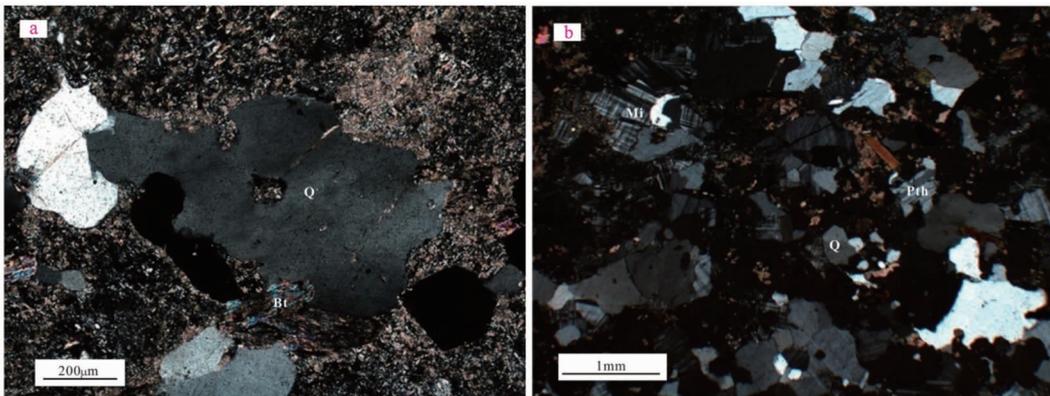


图 3 中家山铅锌(金银)矿床围岩显微特征

Fig. 3 Microscopic characteristics of the surrounding rocks of Zhongjiashan lead-zinc (gold-silver) deposit

- a. 浅粒岩:变余斑状结构,视域中心为一具有熔蚀晶洞和港湾的石英变余斑晶,晶洞和港湾中充填新生变质矿物;
- b. 黑云斜长片麻岩:条纹长石和微斜长石
- Q. 石英; Bt. 黑云母; Mi. 微斜长石; Pth. 条纹长石

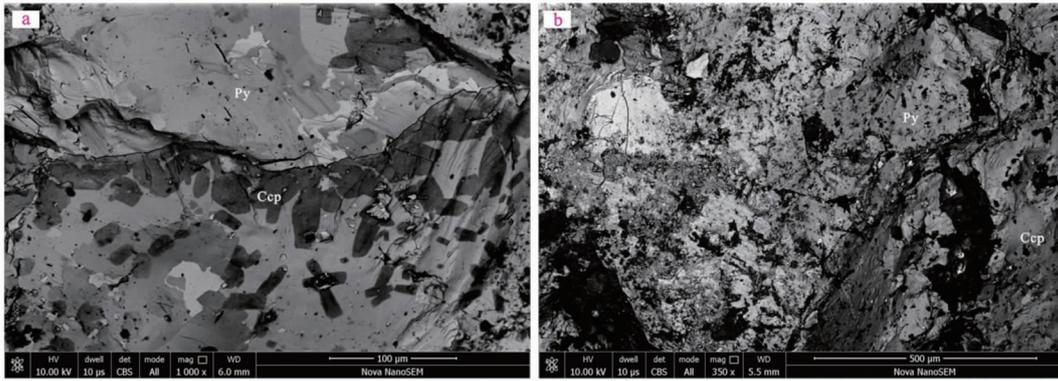


图4 中家山铅锌(金银)矿床矿石电镜下特征

Fig. 4 Characteristics of the ore under scanning electron microscope

Ccp. 黄铜矿; Py. 黄铁矿

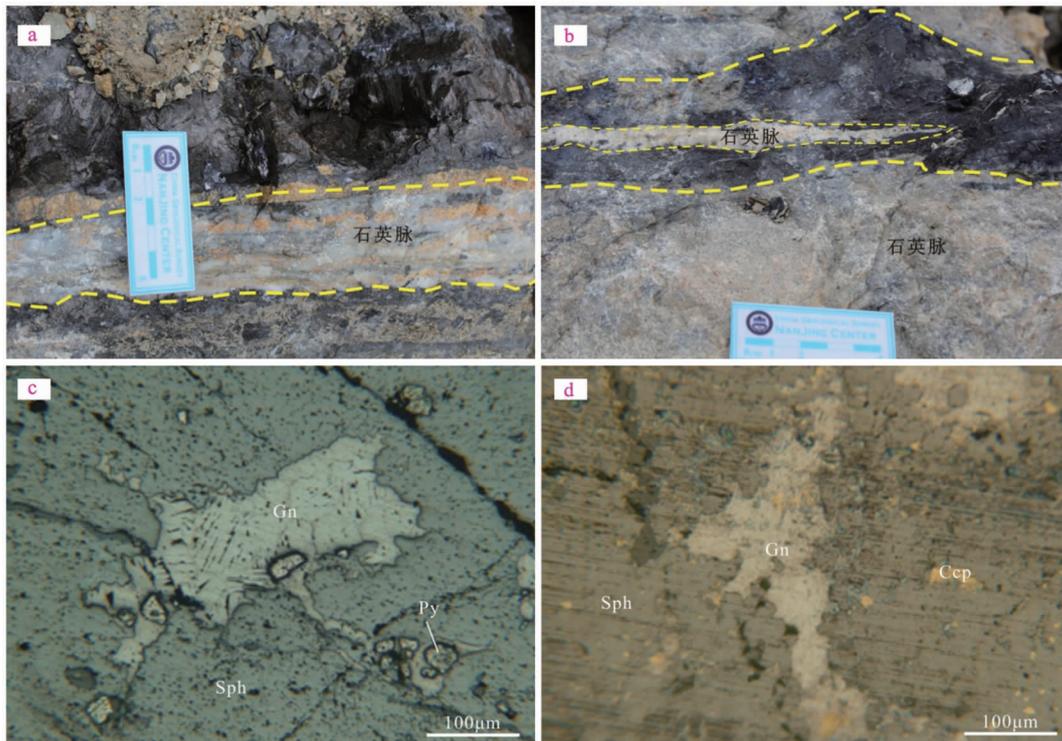


图5 中家山铅锌(金银)矿床矿石标本及镜下显微特征

Fig. 5 Ore samples and microscopic characteristics of Zhongjiashan lead-zinc (gold-silver) deposit

Gn. 方铅矿; Sph. 闪锌矿; Ccp. 黄铜矿; Py. 黄铁矿

矿石结构主要为他形一半自形鳞片状、粒状变晶结构、破裂结构、碎粒结构、碎粉结构及糜棱结构,其次有填隙结构、包含结构、固溶体分离结构、斑状结构、文象结构等。矿石构造主要有块状构造、角砾状构造、条带状构造、浸染状构造。

矿石中金属矿物主要有闪锌矿、方铅矿、自然金、自然银、黄铜矿、黄铁矿、褐铁矿、黝铜矿、硫铜银矿等(图5);脉石矿物主要有石英、微斜长石、黑云母、

方解石、绢云母等。主要有用组分为铅、锌,共(伴)生有益组分为金、银。Pb的平均品位 $w(\text{Pb})=3.04\%$, Zn平均品位 $w(\text{Zn})=3.92\%$, Au平均品位 $w(\text{Au})=1.82 \times 10^{-6}$, Ag平均品位 $w(\text{Ag})=60.5 \times 10^{-6}$ 。

3 样品采集与分析方法

在野外进行样品采集,在观察分类基础上选择

代表性样品进行磨片和单矿物提取。本次采取成矿期矿石样品 4 套,通过双目镜进行单矿物挑选。对矿片进行电子探针分析、扫描电子显微镜(SEM)微观分析,单矿物进行硫、铅同位素分析。

扫描电子显微镜(SEM)微观分析在核工业北京地质研究院测试中心完成,仪器为 Oxford Instruments 能谱仪,环境温度 22℃,湿度 45%。成矿期矿石样品单矿物电子探针分析工作,分别由国土资源部华东矿产资源监督检测中心和合肥工业大学电子探针实验室完成。

硫、铅同位素分析在核工业北京地质研究院测试中心完成。挑选多金属硫化物矿石样品进行粉碎,使用双目镜,挑选黄铁矿、方铅矿和闪锌矿单矿物,保证纯度在 99% 以上;超声波清洗掉矿物表面粘附粉尘之后,用玛瑙钵研磨至 200 目,送实验室测试。硫同位素使用 S-ISTP01 方法,元素分析仪配套硫同位素质谱仪测 $\delta(^{34}\text{S})$ 值。铅同位素使用 Pb-IRM01 方法,仪器采用 Phoenix 热表面电离质谱仪,测试精度为 $\pm 0.2 \times 10^{-3}$ 。

4 分析结果

4.1 主要金属矿物成分

成矿期矿石样品进行的单矿物电子探针分析测试结果,见表 1、表 2 和表 3 所述。

黄铁矿的化学式为 FeS_2 ,理论上主要元素 $w(\text{S})$ 和 $w(\text{Fe})$ 应为 53.45% 和 46.55%, $w(\text{S})/w(\text{Fe})$ 应为 2。电子探针分析结果(表 1)显示, $w(\text{Fe}) = 45.12\% \sim 46.09\%$,平均为 45.63%; $w(\text{S}) = 52.62\% \sim 54.00\%$,平均为 53.26%,略低于标准值,说明有较多杂质混入。 $w(\text{S})/w(\text{Fe}) = 1.15 \sim 1.18$ 。 $w(\text{S})/w(\text{Fe})$ 值与温度的关系比较密切,低温或沉积成因的 $w(\text{S})/w(\text{Fe})$ 值较大,中高温常是硫亏损,暗示其形成可能与中高温热液作用有关^[2,14]。 $w(\text{Co}) = 0.03\% \sim 0.17\%$, $w(\text{Ni})$ 仅有一个测点报出数据 0.04%,接近于变质成因黄铁矿。 $w(\text{Co})/w(\text{Ni}) = 2$,指示矿床受到岩浆后期热液改造。

方铅矿主量元素 $w(\text{Pb}) = 82.75\% \sim 86.66\%$, $w(\text{S}) = 12.89\% \sim 14.17\%$,微量元素 Cu、Zn、Ag、Fe 含量较低(表 2)。Ag 在方铅矿中以类质同象取代铅或以独立矿物形式(自然银、银黝铜矿、辉银矿和硫锑铅银矿)等被包裹。微量元素 $w(\text{Ag}) = 0.05\% \sim 0.17\%$,指示本区方铅矿中 Ag 以类质同象形式存在。由 $w(\text{Cu}) = 0.07\% \sim 2.95\%$, $w(\text{Zn}) = 0.02\% \sim 1.79\%$, $w(\text{Fe}) = 0.08\% \sim 0.84\%$,推测可能方铅矿中包含银黝铜矿等独立银矿物。

闪锌矿中 $w(\text{Zn}) = 67.41\% \sim 68.61\%$,平均 67.77%; $w(\text{S}) = 33.10\% \sim 33.87\%$,平均 33.52%; $w(\text{Fe}) = 0.04\% \sim 0.36\%$ (表 3),平均 0.12%,具有层控型闪锌矿特征^[15-16]。

表 1 中家山铅锌(金银)矿床矿石中黄铁矿电子探针分析结果

Table 1 Electron microprobe analysis of pyrite of the ore

样品编号	矿物	Fe	S	Cu	Co	Ni	Zn	Cr
DZJ-1.1	黄铁矿	45.81	53.93	—	0.08	—	0.08	0.01
DZJ-1.2	黄铁矿	45.67	53.63	—	0.06	—	0.08	0.02
DZJ-1.3	黄铁矿	45.51	52.96	—	0.03	—	0.04	—
DZJ-1.4	黄铁矿	45.32	52.95	0.03	0.03	—	0.04	—
DZJ-1.5	黄铁矿	45.64	53.03	0.03	0.12	—	0.05	—
DZJ-1.6	黄铁矿	45.44	53.17	—	0.17	—	—	0.03
DZJ-1.7	黄铁矿	45.12	52.77	0.04	0.10	—	0.01	0.01
DZJ-1.8	黄铁矿	45.89	52.62	0.17	0.08	0.04	0.05	0.02
DZJ-1.9	黄铁矿	45.78	54.00	0.01	0.09	—	0.11	—
DZJ-1.10	黄铁矿	46.09	53.55	0.04	0.05	—	0.16	—

量单位: $w_B/\%$ 。“—”表示未测出或低于检测限。

表2 中家山铅锌(金银)矿床矿石中方铅矿电子探针分析结果

Table 2 Electron microprobe analysis of galena of the ore

样品编号	矿物	Pb	S	Cu	Zn	Ag	Ti	Fe
DZJ-2.1	方铅矿	82.75	14.17	2.95	1.79	0.17	0.002	0.57
DZJ-2.2	方铅矿	85.45	13.21	—	0.08	—	0.008	0.11
DZJ-2.3	方铅矿	86.36	13.42	0.07	1.44	—	—	—
DZJ-3.1	方铅矿	86.16	13.67	—	1.26	0.05	0.040	0.82
DZJ-3.2	方铅矿	84.95	13.33	—	0.02	—	—	0.11
DZJ-3.3	方铅矿	85.60	13.43	0.10	—	0.05	—	0.84
DZJ-3.4	方铅矿	86.66	12.89	—	0.02	—	0.004	0.08

量单位: $w_B/\%$ 。“—”表示未测出或低于检测限。

表3 中家山铅锌(金银)矿床矿石中闪锌矿电子探针分析结果

Table 3 Electron microprobe analysis of sphalerite of the ore

样品编号	矿物	Zn	S	As	Co	Mo	Fe	Au
DZJ-2.1	闪锌矿	67.67	33.87	—	0.06	0.47	0.04	0.05
DZJ-2.2	闪锌矿	67.63	33.10	0.01	—	0.37	0.05	—
DZJ-2.3	闪锌矿	67.54	33.42	—	—	0.45	0.11	0.05
DZJ-3.1	闪锌矿	67.41	33.58	0.01	0.03	0.39	0.36	0.07
DZJ-3.2	闪锌矿	68.61	33.62	0.05	0.02	0.48	0.07	0.05

量单位: $w_B/\%$ 。“—”表示未测出或低于检测限。

表4 中家山铅锌(金银)矿床金属硫化物硫、铅同位素特征

Table 4 S and Pb isotope characteristics of the metal sulfide minerals from Zhongjiashan lead-zinc (gold-silver) deposit

样号	矿物	$\delta(^{34}\text{S})/10^{-3}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	T/Ma	μ	ω	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
DZJ-1.1	黄铁矿	6.1	16.995	15.454	37.619	1008	9.39	40.20	14.20	49.07
DZJ-1.2	方铅矿	4.3	16.986	15.434	37.556	993	9.35	39.74	12.74	46.60
DZJ-1.3	方铅矿	4.2	17.041	15.450	37.593	972	9.37	39.70	13.59	46.63
DZJ-1.4	方铅矿	5.0	16.939	15.375	37.356	964	9.23	38.47	8.59	39.65

4.2 硫、铅同位素

本次测试样品选自中家山铅锌(金银)矿床多金属硫化物矿石,选择黄铁矿和方铅矿进行硫、铅同位素分析,分析数据见表4所述。

(1) 硫同位素

从表4可知,中家山铅锌(金银)矿床多金属硫化物 $\delta(^{34}\text{S})$ 值为 $4.2 \times 10^{-3} \sim 6.1 \times 10^{-3}$, 平均值为 4.9×10^{-3} 。其中,黄铁矿 $\delta(^{34}\text{S})$ 值 6.1×10^{-3} , 方铅矿 $\delta(^{34}\text{S})$ 值为 $4.2 \times 10^{-3} \sim 5.0 \times 10^{-3}$, 平均值为 4.5×10^{-3} 。数据显示中家山铅锌(金银)矿床硫同位素 $\delta(^{34}\text{S})$ 的值 $\delta(^{34}\text{S})_{\text{Py}} > \delta(^{34}\text{S})_{\text{Gn}}$, 表明在成矿过程中硫化物结晶时,溶液中及溶液中已结晶硫化物间硫同位素已达到平衡分馏^[17-20], 金属矿物的 $\delta(^{34}\text{S})$ 标准差变化范围较小,说明硫源相对单一。

(2) 铅同位素

中家山铅锌(金银)矿床多金属硫化物矿石中黄铁矿和方铅矿的铅同位素分析结果(表4)显示,该矿床 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 总体为 16.939~17.041, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 总体为 15.375~15.454, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 37.356~37.619, 变化范围总体较小。根据铅同位素 $\Delta\beta$ — $\Delta\gamma$ 图解

(图6),中家山铅锌(金银)矿床金属硫化物铅同位素落在造山带铅范围。一般地讲,铅同位素低 μ 值(小于 9.58 或 9.74)的铅来自于下部地壳或上地幔,或来自其他构造单元中基本处于封闭的体系^[19], 矿床的形成一般与岩浆活动有密切关系,而且在成矿过程中基本没有受到地壳物质的混染;铅同位素高 μ 值的铅(大于 9.58 或 9.74)来自上地壳。结合 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解(图6b),暗示了中家山铅锌(金银)矿床的铅来自于下地壳。一般化学沉积岩和花岗岩富铀铅 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 18$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 15.3$)、贫钍铅 ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} < 39$), 而变质岩铅同位素贫铀铅^[21]。从中家山铅锌(金银)矿床铅同位素推测,其铅源可能与沉积岩或花岗岩关系较为密切。

5 成矿物质来源

从中家山铅锌(金银)矿床中黄铁矿电子探针数据来看,主量元素及 $w(\text{S})/w(\text{Fe})$ 略小于标准值,报

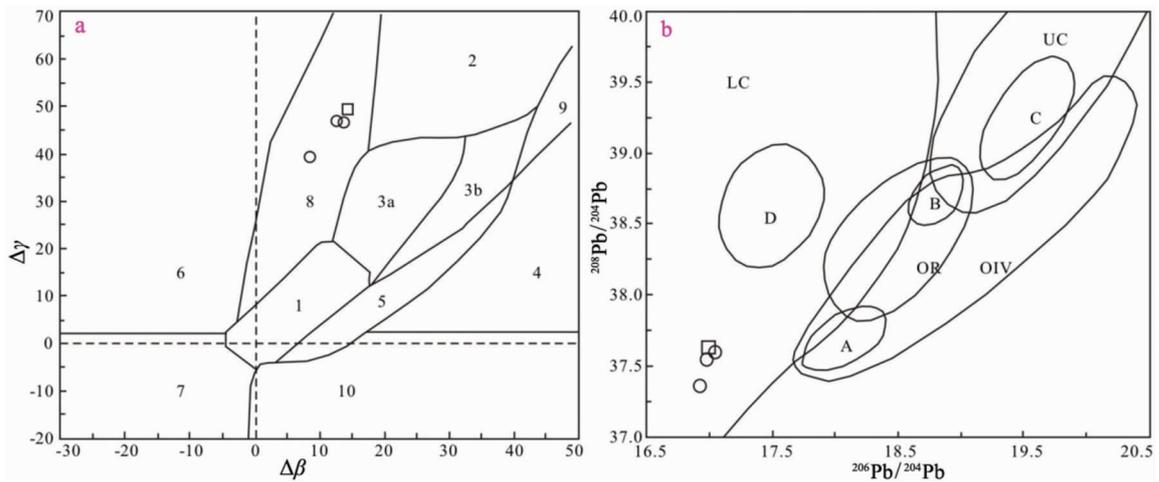


图 6 中家山铅锌(金银)矿矿石矿物铅同位素 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 图解(a)、铅同位素 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造环境判别图(b)

(a 图底据文献[22];b 图底据 R E Zartman 和 B R Doe,1981)

Fig. 6 Pb isotope $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ plot (a) and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ geotectonic environment discrimination plot (b) of ore minerals of Zhongjiashan Lead-zinc (gold-silver) deposit

图 a 中: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

图 b 中:A、B、C、D 区域分别为样品投影点在 OIV、OR、UC、LC 区域的相对集中区;

LC. 下地壳;UC. 上地壳;OIV. 洋岛火山岩;OR. 造山带

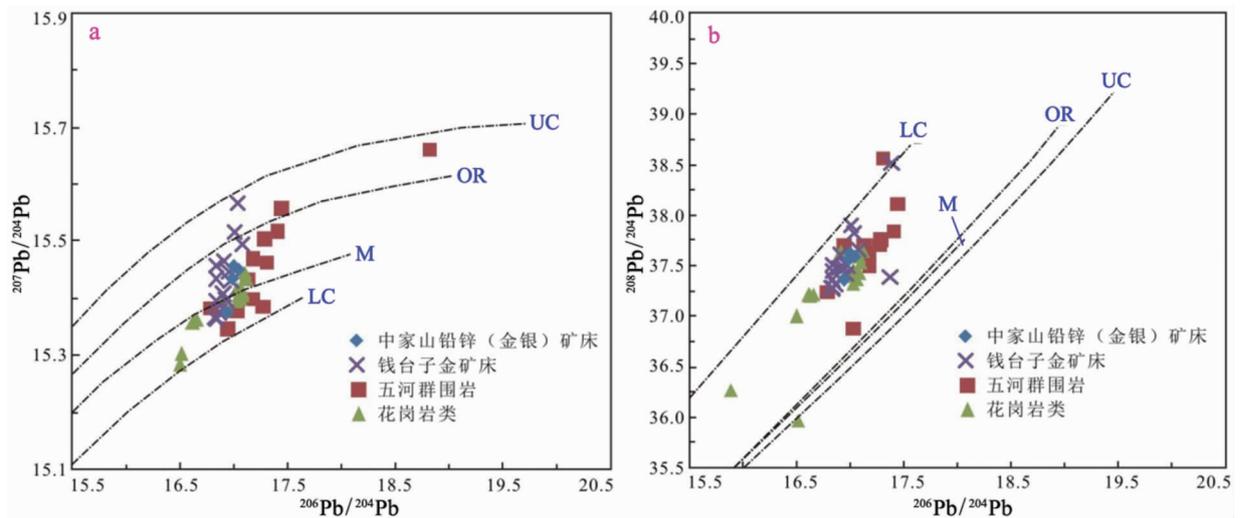


图 7 中家山铅锌(金银)矿床围岩、岩体及矿石铅同位素增长曲线(图底据 R E Zartman 和 B R Doe,1981)

Fig. 7 Lead isotope growth curves of the surrounding rock, rock mass and ore minerals, in Zhongjiashan lead-zinc (gold-silver) deposit

LC. 下地壳;UC. 上地壳;M. 地幔;OR. 造山带

出的 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})=2$, $w(\text{Co})=0.03\% \sim 0.17\%$, 说明矿床的黄铁矿接近变质成因类型,后期受到中高温的岩浆期后热液的改造,并有较多的杂质加入。矿区 Ag 以类质同象形式存在,并可能包含银黝铜矿等独立银矿物。闪锌矿具有层控型特征。

通过硫化物硫同位素的示踪作用可判断矿床的成矿物质来源^[19]。中家山铅锌(金银)矿床硫化物 $\delta(^{34}\text{S})$ 值为 $4.2 \times 10^{-3} \sim 6.1 \times 10^{-3}$, 平均值为 4.9×10^{-3} , 正向偏离陨硫硫。矿床中硫同位素变化较大,为地壳硫,显示多源的特征,成矿物质可能来自地

幔,也可能部分来自于围岩。

中家山铅锌(金银)矿床铅同位素 μ 值为9.23~9.39,平均9.34,低于标准值,位于地幔(8.92)和造山带(10.87)^[23]之间,结合铅同位素 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 图,说明矿石铅来源于深部地壳或者上地幔,成矿作用与岩浆活动有关。 ω 值为38.47~40.20,平均39.53,超出正常铅的范围(35.55±0.59),也可以说明成矿物质具有壳幔混源特征。通过五河群变质围岩和五河—凤阳地区相关岩体铅同位素增长曲线(图7)分析,总体上矿石铅与围岩铅具有相似的分布特征,围岩样品岩性为五河群斜长角闪岩、紫苏辉石麻粒岩及黑云斜长片麻岩(据文献[1-2];董法先等,1995),表明两者有同源性;矿石铅与区域上花岗质岩浆岩的分布也类似,花岗岩类样品主要取自磨盘山钾长花岗岩、涂山—荆山二长花岗岩、陶山二长花岗岩、毛山花岗质岩脉、淮光花岗闪长岩及西芦山正长花岗岩。²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb—²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb图解(图7a)投影点多集中于下地壳和造山带之间,说明本地区铅具有多源性;²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb—²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb图解(图7b)显示,投影点落在下地壳和地幔之间,说明矿石铅和围岩铅具有深源性,成矿过程中的成矿物质可能来源于下地壳和地幔^[5]。

自三叠纪末期扬子陆块与华北陆块碰撞、拼接以来,以发育大型逆冲、推覆构造和郯庐断裂带大规模走滑平移为标志,五河—凤阳地区经历了复杂的构造变形,并产生了系列的岩浆作用^[24-27]。中家山铅锌(金银)矿床赋矿层位为五河群小张庄组,也说明本区新太古界五河群是重要的赋矿地层。区域上的中酸性岩体与成矿有着密切的联系。稳定同位素研究显示,成矿流体活动与岩浆活动密切相关,岩体岩浆源区为古老的下地壳物质,强烈的壳幔作用会有幔源物质底侵,成矿元素丰度较高的变质基底地层(五河群)部分熔融和幔源物质的加入,为矿床的形成奠定了充分的物质基础。

6 结论

通过对中家山铅锌(金银)矿床矿石中黄铁矿、方铅矿、闪锌矿电子探针主量元素分析及其硫铅同位素特征分析,得出以下结论:

(1)中家山铅锌(金银)矿床中黄铁矿主量元素及 $w(S)/w(Fe)$ 略小于标准值,报出的 $w(Co)/w(Ni)=2$,说明矿床的黄铁矿接近变质成因类型,后期受到中高温的岩浆期后热液的改造,并有较多

的杂质加入。矿区Ag以类质同象形式存在,并可能包含银黝铜矿等独立银矿物。闪锌矿的元素组成具有层控型特征。

(2)中家山铅锌(金银)矿床硫化物 $\delta(^{34}S)$ 值介于 $4.2\times 10^{-3}\sim 6.1\times 10^{-3}$ 之间,平均值为 4.9×10^{-3} ,正向偏离陨硫。矿床中硫同位素变化较大,为地壳硫,显示多源的特征,成矿物质可能来自地幔,也可能部分来自于围岩。铅同位素 μ 值为9.23~9.39,平均9.34,低于标准值,说明矿石铅来源于深部地壳或者上地幔,成矿作用与岩浆活动有关,成矿物质具有壳幔混源特征。

(3)中家山铅锌(金银)矿床的形成可能与中高温热液作用有关。新太古界五河群是重要的赋矿地层,扬子陆块与华北陆块碰撞、拼接为成矿提供了动力和空间,成矿流体活动与岩浆活动密切相关,岩体岩浆源区为古老的下地壳物质,强烈的壳幔作用会有幔源物质底侵,成矿元素丰度较高的变质基底地层(五河群)部分熔融和幔源物质的加入。

致谢:野外考察过程中,南京地质调查中心张定源研究员和张晓东高级工程师给予了指导和帮助,论文写作期间与南京地质调查中心肖凡助理研究员的讨论为本文提供了更多思路,在次一并表示感谢!

参考文献:

- [1] 涂荫玖,陈成涛,唐良贵. 江淮北部前寒武纪变质岩系划分及构造特征[J]. 中国区域地质,1992(3):248-256.
- [2] 涂荫玖,陈成涛. 蚌埠—五河地区绿帘带金矿地质特征及控矿因素[J]. 矿床地质,1993,12(1):38-47.
- [3] 刘青. 安徽五河荣渡金矿床成矿控制因素[J]. 云南地质,2007,26(3):309-314.
- [4] 曹达旺. 五河朱顶富金矿的成矿特征及控矿因素[J]. 安徽地质,1998,8(4):16-21.
- [5] 安徽地矿局312地质队,中国地质大学(北京). 五河—凤阳地区金、铅、锌成矿规律与找矿方向研究成果报告[R]. 安徽,蚌埠:安徽地矿局312地质队,2013.
- [6] 范宏瑞,谢奕汉,赵瑞. 小秦岭含金石英脉复式成因的流体包裹体证据[J]. 科学通报,2000,45(5):537-542.
- [7] 范宏瑞,谢奕汉,翟明国. 豫陕小秦岭脉状金矿床三期流体运移成矿作用[J]. 岩石学报,2003,19(2):260-266.
- [8] 王义天,毛景文,叶安旺. 小秦岭地区中深部含金石英脉的同位素地球化学特征及其意义[J]. 矿床地质,2005,24(3):270-279.
- [9] 李厚民,叶会寿,毛景文. 小秦岭金(钼)矿床辉钼矿铼-钨年代及其地质意义[J]. 矿床地质,2007,26(4):417-423.
- [10] 宋利宏,朱光,赵田,等. 华北克拉通东南部蚌埠隆起晚中生代花岗岩类岩体内变形记录与构造意义[J]. 地质论评,2016,62(2):400-418.

- [11] 邱瑞龙, 徐祥, 黄得志. 华北地块东南缘蚌埠地区荆山岩体同位素年龄及其地质意义[J]. 安徽地质, 1999, 9(3): 161-164.
- [12] 黄先觉. 安徽省凤阳县江山铅锌金矿地质特征分析[J]. 大科技, 2015, 26(2): 162-163.
- [13] 杨本忠. 安徽凤阳中家山铅锌矿地质特征及找矿方向[J]. 能源研究与管理, 2018, 9(1): 9-12.
- [14] 陈光远, 孙岱生, 邵伟. 胶东金矿成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1989.
- [15] Lin Y, Cook N J, Ciobanu C L. Trace and minor elements in sphalerite from base metal deposits in South China: A LA-ICP-MS study [J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 39: 188-217.
- [16] 张刚阳. 藏南金锑多金属成矿带成矿模式与找矿前景研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
- [17] Ohmoto H. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits [J]. *Economic Geology*, 1972, 67(5): 551-578.
- [18] Ohmoto H, Rye R O. Isotopes of sulfur and carbon [M]. In: Barnes H L, ed. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*; 2nd edition. New York: John Wiley and Sons, 1979: 509-567.
- [19] 沈渭洲. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 原子能出版社, 1987: 23-70.
- [20] 张理刚. 莲花山斑岩型钨矿床的氢、氧、硫、碳和铅同位素地球化学[J]. 矿床地质, 1985, 4(1): 54-63.
- [21] Chen H Y, Bao J X, Zhang Z J, et al. The isotope tracing of the sources of ore metals and fluids in the Wangfeng gold deposit, Xinjiang: A contribution to collisional orogenic metallogenesis [J]. *Science in China (Series D)*, 2000, 30(Supp): 45-52.
- [22] 朱炳泉, 李献华, 戴漳漠, 等. 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.
- [23] Doe B R, Zartman R E. Plumb tectonic, the phanerozoic [M]. In: Barnes H L, ed. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. 2nd edition. New York: Wiley-Interscience, 1979: 22-70.
- [24] 童劲松, 路玉林, 管运才, 等. 皖东地区燕山期高镁中酸性侵入岩地球化学特征及动力学意义[J]. 中国地质, 2008, 35(1): 18-31.
- [25] 任纪舜, 赵磊, 徐芹芹, 等. 中国的全球构造位置和地球动力系统[J]. 地质学报, 2016, 90(9): 2100-2108.
- [26] Kang C X, Yang X Z, Cai Y T. Geological and geochemical characteristics of Middle Jurassic granites in Bengbu uplift, Southeast of North China craton [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*. 2017, 91(supp. 1): 83-85.
- [27] 康丛轩, 杨献忠, 蔡逸涛. 华北克拉通东南缘蚌埠隆起带早白垩世晚期二长花岗岩成因及动力学背景[J]. 地质学报, 2018, 92(4): 687-703.

S-Pb isotopic composition of Zhongjiashan Pb-Zn (Au-Ag) deposit in Fengyang area, eastern Anhui province and its significance

KANG Congxuan^{1,2,3}, YANG Xianzhong¹, CAI Yitao¹

1. Nanjing Center of Geological Survey, CGS, Nanjing 210016, China;

2. Engineering Innovation Center for Urban Underground Space Exploration and Evaluation, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Nanjing 210016, China;

3. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The Zhongjiashan lead-zinc (gold-silver) deposit is located at the eastern end of the Bengbu uplift. Based on identification of ore minerals under microscope, electron probe analysis of the main metal minerals and analysis of S, Pb isotopes of sulfides source material of the ore deposit is discussed and the metallogenic mechanism analyzed. The results shows that pyrite of the deposit is close to the metamorphic pyrite. Ag exists in the form of isomorphism and possibly there is independent silver mineral, such as silver tetrahedrite. Sphalerite has stratabound characteristics. Value of $\delta(^{34}\text{S})$ of the sulphide is $4.2 \times 10^{-3} \sim 6.1 \times 10^{-3}$ and is positively deviated from meteoric sulphur that is characteristic of multiple sources. The ore-forming material may come from the mantle, or partly from the surrounding rock. Lead isotope μ value is 9.23~9.39, indicating that the ore lead comes from the deep crust or upper mantle, the mineralization is related to magmatic activity, and the ore-forming material is characterized by crust-mantle mixed source. Formation of the deposit may be related to the high temperature hydrothermal process. The source area of magmatic rock body is consisted of palaeo lower crust material. Strong crust-mantle process resulted in the mantle material diaper, partial melt of the ore element-rich metamorphic basement strata (Wuhe Group) and incorporation of mantle material.

Key Words: Zhongjiashan Lead-zinc (gold and silver) deposit; composition of ore minerals; S-Pb isotopes; source of ore-forming material; Anhui province