

Study on the Origin of Metallogenic Materials of Tumuya Lead Zinc Silver Polymetallic Deposit in Neixiang, Henan Province

Yongjun Shao^{1,2*}, Yang Cai^{1,2}, Qingquan Liu^{1,2}

¹Key Laboratory of Nonferrous Metal Mineralization Prediction and Geological Environment Monitoring of Ministry of Education, Central South University, Changsha Hunan

²School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan

Email: *shaoyongjun@126.com, 798224555@qq.com

Received: Aug. 29th, 2018; accepted: Sep. 19th, 2018; published: Sep. 26th, 2018

Abstract

The Tumuya Pb-Zn-Ag deposit, a large fault-controlled lode deposit in Neixiang County, Henan province, occurs in the Erlangping Terrane, northern East Qinling Orogen, which belongs to the Pb-Zn-Ag polymetallic deposit controlled by the fault structure. The average value of the $\delta^{34}\text{S}$ is 5.8‰, of which the sulfur isotope composition of different minerals is smaller, and the $\delta^{34}\text{S}$ value generally shows $\text{Py} > \text{Sph} > \text{Gn}$, indicating that the source of sulfur is a mixed source; the average values of 206Pb/204Pb, 207Pb/204Pb and 208Pb/204Pb in the ore lead isotope were 18.402, 15.666 and 38.823, respectively, which indicates that the source of lead material has the characteristics of the upper crust or the sediment.

Keywords

Tumuya Pb-Zn-Ag Deposit, Basic Geology of Ore Deposits, S-Pb Isotope, Henan Province

河南内乡土木崖铅锌银多金属矿床成矿物质来源探讨

邵拥军^{1,2*}, 蔡洋^{1,2}, 刘清泉^{1,2}

¹中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南 长沙

²中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙

Email: *shaoyongjun@126.com, 798224555@qq.com

*通讯作者。

摘要

河南省内乡县北部土木崖铅锌银多金属硫化物矿床位于秦岭造山带北侧的二郎坪地体内，受区域性大断裂控制明显，矿床硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 的平均值为5.8‰，其中不同矿物的硫同位素组成变化范围较小，且 $\delta^{34}\text{S}$ 值总体上显示处黄铁矿 > 闪锌矿 > 方铅矿的规律，表明硫的来源为混合来源；矿石铅同位素中的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的平均值分别是18.402、15.666和38.823，表明铅物质来源具有上地壳或者沉积物的特点。

关键词

土木崖铅锌银矿床，矿床基础地质，硫铅同位素，河南

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

内乡土木崖铅锌银多金属矿床位于秦岭造山带东段北坡(图 1)，赋矿地层主要为下古生界的二郎坪群，

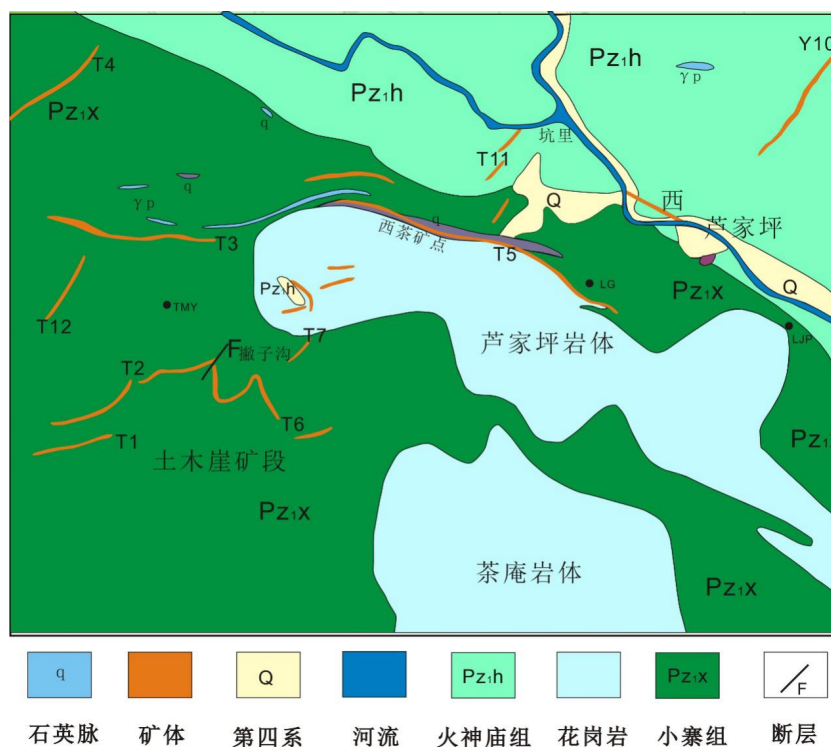


Figure 1. Geological map of the lead-zinc-silver polymetallic sulphide in Tumuya [3]
图 1. 土木崖铅锌银多金属硫化物区域地质图[3]

为一套巨厚的海相火山沉积岩系[10], 矿区构造活动发育, 主要受区域性的朱夏断裂及其次生断裂控制, 岩浆侵入运动频繁, 尤其是印支期和燕山期。多期次的岩浆侵入活动以及区域变质作用[9], 为铅锌银多金属矿床的形成提供了十分有利的条件。

2. 研究区地质特征

矿区位于秦岭褶皱系北秦岭褶皱带, 区域造山作用影响, 区内断裂及褶皱发育。矿区出露的地层由老到新为: 早元古界秦岭群、中元古界宽坪群、早古生界二郎坪群、晚三叠统、晚白垩其中, 古生界二郎坪群是区域内主要的赋矿地层, 主要的研究对象。区域内岩浆侵入活动频繁强烈且伴随有不少火山喷发作用, 岩浆作用基本贯穿整个地质演化历史。岩浆岩广泛发育, 种类多, 岩石类型以花岗岩类为主, 并发育有基性岩和碱性岩, 产状多为岩基、岩株和岩脉[1] [2]。

研究区出露的地层主要为下古生界二郎坪群(Pz1er)以及周边的古元古界秦岭群(Pt1qn)

1、下古生界二郎坪群(Pz1er)是区域内最主要的岩石-地层-构造单元。该套地层矿区出露的地层为小寨组(Pz1x)及其下伏的火神庙组(Pz1h), 呈断层接触关系。

1) 小寨组(Pz1x): 为一组沉积-变质岩系, 沉积有较多的陆缘碎屑物且含有少量的碳质, 主要分布在矿区的西南部, 主要岩性为碳质绢云母片岩, 夹有少量二云石英片岩、黑云母石英片岩和斜长角闪岩。矿物主要成分为石英、黑云母、绢云母及少量碳质。

2) 火神庙组(Pz1h): 为一套由海相火山喷发形成的、分异较完全的细碧-角斑岩系, 位于矿区的中北部, 岩性主要为基性的变细碧岩以及相应的凝灰岩, 其主要矿物成分为钠质斜长石和角闪石, 次要矿物为辉石、黑云母、白云母和绿泥石等; 副矿物为磁铁矿和榍石。

2、古元古界秦岭群(Pt1qn): 分布于矿区外围南侧, 自下而上分为雁岭沟组(Pt1y)、石槽沟组(Pt1sh)、与北侧二郎坪群大庙组(Pz1d)呈断层接触关系。

整个矿区褶皱构造都不甚发育, 多数褶皱为单斜褶皱, 且走向比较接近, 为北西向, 由于受断层作用的影响较大, 地层的局部产状变化较大[1]。矿区的断裂构造为一些次级断裂, 分布在朱夏断裂和瓦穴子断裂之间, 其走向多为北东向、北西向, 断裂带规模较大, 长几百米到近千米不等, 断裂构造早期为压扭性, 晚期为张扭性。在断裂带的中心部位岩石破碎强烈, 且硅化较为强烈, 形成了硅化的构造角砾岩, 与断裂带内的碎裂岩形成了构造蚀变破碎带, 也是矿区内的主要容矿构造。

3. 矿床特征

3.1. 矿体特征

土木崖矿床位于矿区中部, 出露地层主要为二郎坪群火神庙组的细碧角斑岩, 矿体严格受断裂破碎蚀变岩带控制, 矿体产出形态也受蚀变带控制, 多为脉状、透镜状, 矿体中心部位为多金属硫化物石英脉, 矿体品位较高, 矿化富集明显, 矿脉向两侧逐渐变为多金属硫化物石英黄铁蚀变岩, 矿体品位降低, 蚀变岩中的矿体界线要以取样分析结果确定。

3.2. 矿石特征

矿石矿物类型比较简单, 绝大部分矿石矿物为金属硫化物, 少部分为氧化物, 基本不含硫酸盐矿物和碳酸盐矿物。矿区内常见的矿石矿物有方铅矿、闪锌矿、黄铁矿和黄铜矿, 少量的毒砂、磁黄铁矿、辉银矿和褐铁矿等。脉石矿物多为石英、斜长石、方解石、绿泥石、绿帘石、黑云母和绢云母。矿石结构有方铅矿闪锌矿黄铁矿的自形-半自形粒状结构、早期自形黄铁矿后期受力形成的碎裂结构、黄铁矿填充闪锌矿裂隙的填隙结构、闪锌矿与黄铜矿的固溶体分离结构、方铅矿与辉银矿的包含结构、方铅矿

闪锌矿与早期黄铁矿之间交代残余结构及交代熔蚀结构等；矿石构造则为块状构造、浸染状构造、细脉状构造以及少量的条带状构造。矿石自然类型为石英脉型和蚀变岩两类，这两类还可再细分为浸染状矿石、块状矿石和角砾状矿石。

3.3. 围岩蚀变

矿区围岩蚀变类型较少，常见的类型有硅化、绢云母化、碳酸盐化和绿泥石化，其中硅化基本分布在矿区，与成矿密不可分。

硅化：是矿区最重要的蚀变类型，空间上分布广泛，时间上则伴随着整个热液成矿阶段，早期硅化表现为石英脉，石英颗粒大，晶形完整、纯净无杂质，基本不含矿物。中期则表现为细粒的石英集合体切穿早期的石英脉，此阶段大量矿物质得到了富集，形成了很多金属硫化物矿物。晚期硅化多伴随有碳酸盐化，为细脉或者网脉状(图 2(b))。

绢云母化：主要发生在成矿作用的早期，绢云母多为集合体且颗粒十分细小，多与石英颗粒分布在一起，其为黑云母褪色蚀变而成(图 2(a))。

绿泥石化：常见于矿体边部的围岩上，形成于成矿作用的中后期，为成矿热液交代基性围岩中的斜长石、角闪石和黑云母等矿物所形成(图 2(c))。

碳酸盐化：主要发生在成矿作用之后，为热液蚀变的产物，多表现为晚期的方解石细脉穿切早期的石英脉，整体蚀变强度一般，与矿化关系不大(图 2(d))。

3.4. 成矿期次

结合前人研究和野外勘查，以及镜下观察到的矿物的组构和共生组合，可以将芦家坪银金多金属矿床大致早、中、晚三个阶段的成矿过程。

成矿早阶段(石英 - 黄铁矿阶段)，成矿物质开始初步富集，并生成了少量的黄铁矿等矿物质。本阶段的石英为乳白色，石英变形严重，可见明显的波状消光现象以及可见有明显的压扁拉长现象。石英多被绢云母交代，形成核幔结构(图 3(a))。

成矿中阶段(石英 - 多金属硫化物阶段)，本阶段成矿物质大量富集，是成矿的主要阶段。在此阶段，形成了大量的多金属硫化物的矿物，这些硫化物往往沿早期矿物的裂隙或者边部穿插、充填、交代、溶蚀早期金属矿物，常见有方铅矿闪锌矿沿早期黄铁矿的裂隙或边部分布，还可见有黄铁矿包含小颗粒的闪锌矿。本阶段也是银金等矿物质富集的主要阶段，含银矿物主要是辉银矿和银黝铜矿，与方铅矿关系密切；含金矿物则与本阶段的黄铁矿关系密切(图 3(b))。

成矿晚阶段(石英 - 碳酸盐阶段)，本阶段基本上没有成矿物质的加入，主要发育有大量的方解石细脉，对成矿基本没有贡献(图 3(c))。

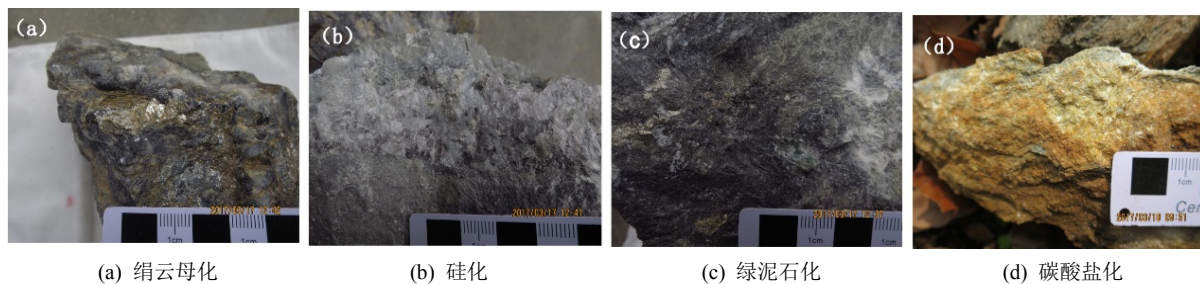


Figure 2. Main types of surrounding rock alterations
图 2. 主要围岩蚀变类型

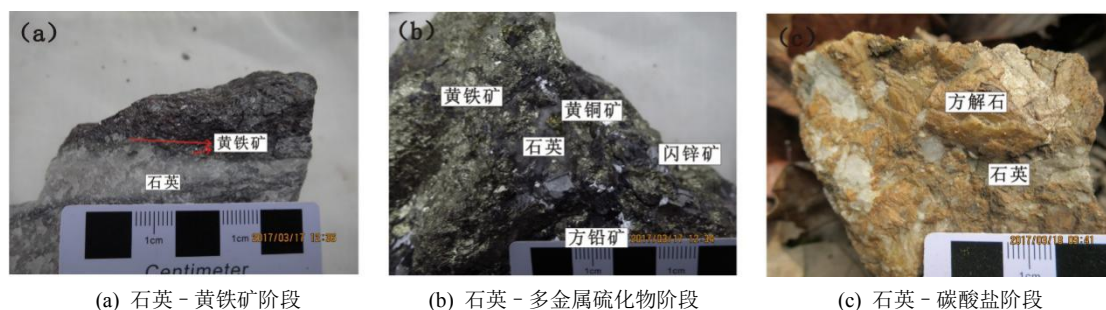


Figure 3. Metallogenic stage
图3. 成矿阶段

4. 样品采集与测试

研究对象为内乡铅锌银多金属矿床的硫化物矿石，选取不同中段的方铅矿闪锌矿和黄铁矿矿石，取纯度 95% 以上的单矿物，研磨至 200 目粒度以下送往国土资源部同位素实验室。将硫同位素样品混合一定比例的氧化铜粉末，在高温真空环境下提取 SO_2 ，利用 MAT-251 型质谱仪，采用 V-CDT 标准，其分析精度可以达到 0.1‰。对于铅同位素样品，用 HNO_3 或者 HCl 溶液溶解后，通过阴离子交换反应提取出铅元素，蒸干后使用磷酸提取固体铅样品做发射剂质谱测试，同样采用 MAT-261 型质谱仪测试，最终的同位素分馏程度可达 1‰ 以上[5]。

5. S、Pb 同位素组成及结果分析

5.1. S 同位素组成及分析

本文对河南内乡北部土木崖铅锌银矿床的 9 件矿石样品中的硫化物矿物进行了硫同位素的分析，具体结果见表 1。

根据对内乡北部土木崖铅锌银矿床的野外勘查和镜下观察，发现本区的硫多以金属硫化物的形式存在，未见硫酸盐矿物，而金属硫化物主要为黄铁矿 - 闪锌矿 - 方铅矿的矿物共生组合，银的硫化物很少，故这个共生组合可以基本代表矿区硫的组成[4] [13]。根据表 1 可知，硫化物中的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值为 5.8‰，显示为较低的正值，黄铁矿中的 $\delta^{34}\text{S}$ 的平均值为 6.95‰，变化范极差为 0.1‰；闪锌矿中的 $\delta^{34}\text{S}$ 的平均值为 6.1‰，极差为 0.2‰；方铅矿中的 $\delta^{34}\text{S}$ 的平均值为 4.25‰，极差为 0.1‰。3 种矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值极差均较小，其平均值显示出黄铁矿闪锌矿方铅矿依次递减的特征，表明在成矿流体中的硫同位素分馏已经基本达到平衡。可以用黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值代替成矿流体的总硫组成[11] [14]，即成矿流体的总硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 +7.2‰。由于矿区的矿石绝大多数都为金属硫化物，未见硫酸盐矿物，可以认为是硫化物矿床。金属硫化物矿床中硫源有很多种，可细分以下 4 类[7] [12]：①地幔和深部地壳硫来源， $\delta^{34}\text{S}$ 值约为 0‰~5‰；②海水硫酸盐来源，现代海水硫同位素值一般为 ± 21 ‰，含量比较稳定；③生物成因硫来源，一般认为硫同位素未达到平衡，硫同位素含量变化范围较大。；④混合硫， $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 5‰~21‰，此类硫的同位素数值变化范围大但分馏达到了平衡。矿区 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 4.2‰~7‰，硫同位素分馏达到平衡，结合硫化物矿床硫来源的数据，可以初步认为硫的来源为混合来源，可能是地幔硫(深部硫)与沉积硫酸盐(海相沉积物或者蒸发岩；5%~35%)的变质脱水的混合作用，这些均需要硫酸盐建造的存在，而硫酸盐建造总是存在于比碳酸盐沉积的更高盐度的蒸发盆地上，结合矿区地质概况，矿区基本不含碳酸盐地层，矿区附近的秦岭群含有碳酸盐地层，可以为成矿提供足够的硫元素，综合认为矿区的硫元素来源于下地幔，矿区的岩浆岩和附近的秦岭群也可以提供部分硫元素。

根据前文可知，矿区含硫矿物主要为黄铁矿方铅闪锌等金属硫化物，未见硫酸盐矿物，且硫元素的同

位素分馏基本达到了平衡，采用闪锌矿 - 方铅矿和黄铁矿 - 方铅矿两组矿物对，结合前人计算出的同位素平衡分馏方程，可以计算出硫同位素的地质温度，具体结果见表 2。结合前人研究和野外勘查，以及镜下观察到的矿物的结构和共生组合，可以划分出成矿期次，地质温度计的结果与镜下观察等得出的成矿期次结果一致，间接证明了结果的可靠性。

5.2. Pb 同位素组成及分析

根据对内乡北部土木崖铅锌银矿床铅同位素的分析可知(表 3)，²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 变化范围为 18.370~18.480，平均值为 18.402，较高于正常铅(18.00)。²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 变化范围为 15.620~15.710，平均值为 15.666，亦高于正常铅(15.30)，表明铀铅富集比较明显。²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 变化范围为 38.590~39.100，平均值为 38.823。整体略小于正常铅(39.00)，显示钍铅的微弱亏损。根据 GeoKit 软件[6]可以计算出铅同位素的相关参数，其中矿石的 μ 值为 9.51~9.68，平均值为 9.58，明显大于正常铅的 μ 值(8.686~9.238)；ω 值为 37.55~40.05，平均值为 38.78 也是高于正常铅的 ω 值(34.06~36.14)。铅同位素数据表明，矿区铅源物质成熟度较高，且相对富集铀铅，略缺少钍铅，具有上地壳或沉积物的特点。

Table 1. Sulfur isotope composition analysis of sulfide ore in Tumuya deposit, Neixiang, Henan

表 1. 河南内乡土木崖矿床硫化物矿石硫同位素组成分析

样品编号	测试矿物	δ ³⁴ S _{V-CDT} /‰	数据来源
TMY-7	黄铁矿	6.9	本文
TMY-8	黄铁矿	7.0	本文
TMY-5	闪锌矿	6.0	本文
TMY-8	闪锌矿	6.2	本文
TMY-7	方铅矿	4.2	本文
TMY-4	方铅矿	4.3	本文

Table 2. Sulfur isotope geothermal temperature of mining area

表 2. 矿区硫同位素地质温度

样号	含硫矿物对/‰		δ ³⁴ S/‰	平衡温度/°C	采样位置	成矿期次
TMY-4	6.2(Sph)	4.3(Gn)	1.9	334	土木崖	中期
TMY-5	6(Sph)	4.4(Gn)	1.6	389	土木崖	早期
TMY7	6.9(Py)	4.2(Gn)	2.7	314	土木崖	中期

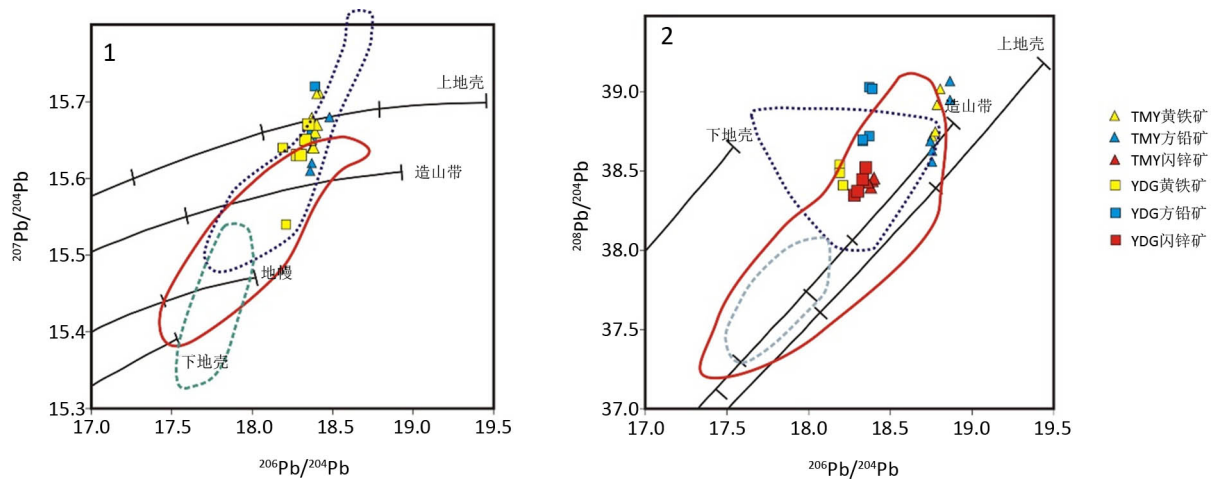
$$1000 \ln \alpha_{\text{闪-方}} = 7.0 \times 10^5 T^{-2}, \quad 1000 \ln \alpha_{\text{黄-方}} = 9.3 \times 10^5 T^{-2} \quad [8]$$

Table 3. Analysis of lead isotope composition of ore in Tumuya lead-zinc-silver polymetallic deposit, Neixiang, Henan

表 3. 河南内乡土木崖铅锌银多金属矿床矿石铅同位素组成分析

样号	样品名称	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	μ	ω	Δα	Δβ	Δγ
TMY-4	方铅矿	18.480	15.680	39.100	9.61	39.61	81.33	23.48	52.97
TMY-5	方铅矿	18.370	15.620	38.590	9.51	37.55	75.35	19.59	39.49
TMY-4	闪锌矿	18.375	15.637	38.688	9.54	38.09	77.00	20.78	42.89
TMY-5	闪锌矿	18.397	15.669	38.759	9.60	38.57	80.13	22.98	45.83
TMY-7	黄铁矿	18.370	15.680	38.750	9.63	38.79	81.14	23.85	47.04
TMY-8	黄铁矿	18.420	15.710	39.050	9.68	40.05	84.12	25.81	55.16

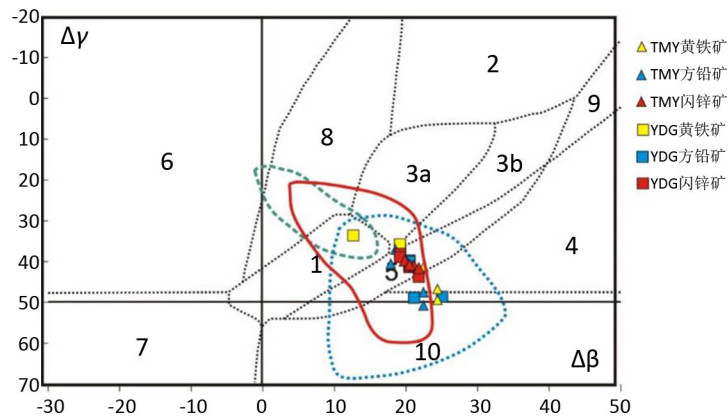
由图 4 可知, 矿石铅同位素点绝大部分点都落在上地壳和造山带之间, 暗示矿石铅可能来源于物源成熟度较高的地区, 显示出明显的上地壳特征。并与矿区二郎坪群地层和周边的秦岭群地层铅同位素范围圈表现一致。由于不同时代地幔的铅同位素数值有些差异, 为消除时间因素带来的偏差, 朱炳泉等[15]将方铅闪锌黄铁的铅同位素数据与同时代的地幔铅同位素值相比, 得出一个相对值 $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$, $\Delta\gamma$, 然后结合已知成因类型的铅同位素数据, 按照成因类型的不同提出了矿石铅的 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 成因分类图解。将矿区铅同位素数据处理后投图(图 5), 可以清楚地看到, 矿石铅绝大部分为海底热水作用铅和退变质铅, 结合秦岭群、二郎坪群铅同位素数据, 发现矿区铅同位素数据与二郎坪群、秦岭群变质基性火山岩的岩石铅范围表现的一致, 与燕山期岩体的铅值有较大的变化范围。综合来看, 矿区铅同位素可能来源于二郎坪群的赋矿地层或者秦岭群地层。



注: 红色实线圈为秦岭群地层铅同位素范围, 蓝色虚线圈为二郎坪群岩体铅同位素范围, 绿色虚线圈为燕山期岩体铅同位素范围。(数据来源于张静, 2009)

Figure 4. The isotope composition of ore in the ore district of Inner Mongolia [16]

图 4. 内乡矿区矿石铅同位素组成图解[16]



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-古老页岩地壳铅; 10-退变质铅

注: 红色实线圈为秦岭群地层铅同位素范围, 蓝色虚线圈为二郎坪群岩体铅同位素范围, 绿色虚线圈为燕山期岩体铅同位素范围。(数据来源于张静, 2009)

Figure 5. The lead isotope $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ of ore in the inner mining area [15]

图 5. 内乡矿区矿石铅同位素 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 图解[15]

6. 结论

内乡铅锌银多金属矿床矿石硫同位素数据研究表明, $\delta^{34}\text{S}$ 值总体上显示 $\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$ 的规律, 表明硫元素的分馏达到了平衡, 且黄铁矿闪锌矿方铅矿三种硫化物的硫的来源基本一致。各硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 都具有较大的正值, $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 4‰~8‰, 表现出硫的来源为混合来源, 可能来源于地幔和矿区附近的秦岭群地层与少量矿区岩浆岩的混合作用。

铅同位素数据的研究表明, 矿区各种矿物的铅同位素数据比较相似, 共同显示出来源于高成熟度铅源物质的特点, 而富铀铅贫钍铅则显示出铅物质来源于上地壳或者沉积物。结合 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 图可知, 发现矿区铅并非单一来源, 投影点多落在二郎坪地层和秦岭群地层范围圈内, 表示矿区铅可能来源于二郎坪群的赋矿地层或者秦岭群地层。

参考文献

- [1] 曹纪虎. 河南内乡北部矿集区铅锌银成矿作用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- [2] 代军治. 南秦岭柞水县冷水沟铜钼金矿床成矿流体、H-O-S 同位素特征及成矿作用[J]. 地质与勘探, 2015, 51(1): 13-22.
- [3] 伏雄, 门道改, 秦臻, 等. 河南芦家坪银金多金属矿床地质特征及成因[J]. 矿产勘查, 2011, 2(5): 536-543.
- [4] 高兆富, 朱祥坤, 张衍, 等. 内蒙狼山成矿带东升庙多金属硫化物矿床硫的来源及矿化过程[J]. 岩石学报, 2015, 31(12): 3725-3731.
- [5] 刘清泉, 陈昕梦, 李冰, 等. 河南姚冲钼矿床 S、Pb 同位素组成及地质意义[J]. 金属矿山, 2014, 43(5): 114-117.
- [6] 路远发. Geokit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 2004, 33(5): 459-464.
- [7] Ohmoto, H. (1972) Systematics of Sulfur and Carbon Isotopes in Hydrothermal Ore Deposits. *Economic Geology*, **67**, 551-579. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.67.5.551>
- [8] Rye, R.O. and Ohmoto, H. (1974) Sulfur and Carbon Isotopes and Ore Genesis: A Review. *Economic Geology*, **69**, 826-842. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.69.6.826>
- [9] 王昊. 河南银洞沟银多金属矿床地球化学特征与成矿机理初探[J]. 地质与勘探, 2011, 47(2): 222-229.
- [10] 王志光, 刘新东, 张振邦, 等. 东秦岭二郎坪地体银金多金属矿床成矿环境与找矿前景[J]. 中国地质, 2001, 28(7): 32-36.
- [11] 张理刚. 稳定同位素在地质科学中的应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1985.
- [12] 张静, 杨艳, 胡海珠, 等. 河南银洞沟造山型银矿床碳硫铅同位素地球化学[J]. 岩石学报, 2009, 25(11): 2833-2842.
- [13] 张云辉, 张寿庭, 王世炎, 等. 东秦岭南泥湖钼(钨)矿床和秋树湾铜(钼)矿床成岩成矿特征对比研究[J]. 地质与勘探, 2014, 50(4): 700-711.
- [14] 郑永飞. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [15] 朱炳泉, 李献华, 戴樟谟, 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[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 1-330.
- [16] Zartman, R.E. and Doe, B.R. (1981) Plumb Tectonics—The Model. *Tectonophysics*, **75**, 135-162. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90213-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90213-4)

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2163-3967，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ag@hanspub.org