

doi: 10.12029/gc20160623

李随民, 韩玉丑, 魏明辉, 等. 张家口梁家沟铅锌银多金属矿床同位素特征及矿床成因[J]. 中国地质, 2016, 43(6): 2154–2162.

Li Suimin, Han Yuchou, Wei Minghui, et al. Characteristics of isotopic compositions and genesis of the Lianjiagou polymetallic ore deposit in Chichen County, Zhangjiakou[J]. Geology in China, 2016, 43(6): 2154–2162(in Chinese with English abstract).

张家口梁家沟铅锌银多金属矿床同位素特征 及矿床成因

李随民¹ 韩玉丑² 魏明辉³ 陈树清³ 李森文³ 李玉红³

(1. 河北地质大学, 河北 石家庄 050031; 2. 河北省地矿局, 河北 石家庄 050081;
3. 河北省地矿局第三地质大队, 河北 张家口 075000)

摘要: 张家口北部已发现的铅锌银多金属矿床在成因上多与浅成中酸性侵入岩关系密切。张家口南部中上元古界碳酸盐岩地层分布广泛, 目前已在其中发现了梁家沟、火石沟、常庄子等多处铅锌银多金属矿床(点)。赋矿围岩以蓟县纪高于庄组、雾迷山组白云岩为主。与张家口北部已发现的多金属矿床相比, 赋存于白云岩中的多金属矿床在矿区范围内浅成中酸性侵入岩体不发育。此外, 在矿体形态、矿石组构、矿床地球化学等方面均与已发现的与浅成酸性岩体有关的多金属矿床存在较大差异。文章以梁家沟多金属矿床为例, 在矿床和矿石宏观地质特征的基础上, 结合矿石 Pb、S、Rb、Sr 等同位素测试结果, 认为成矿物质来源以白云岩围岩和下覆地层为主, 矿床的形成与区内大规模逆冲推覆构造有关, 矿床成因属密西西比河谷型(MVT)矿床。

关键词: 同位素; 铅锌银多金属矿床; MVT型; 梁家沟

中图分类号: P611 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)06-2154-09

Characteristics of isotopic compositions and genesis of the Lianjiagou polymetallic ore deposit in Chichen County, Zhangjiakou

LI Sui-min¹, HAN Yu-chou², WEI Ming-hui³, CHEN Shu-qing³, LI Seng-wen³, LI Yu-hong³

(1. Hebei Geo-university, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 2. Exploration and Development Bureau of Geology and Mineral Resources of Hebei Province, Shijiazhuang, 050081, Hebei, China; 3. No. 3 Geological Party, Hebei Bureau of Geological Exploration, Zhangjiakou 075000, Hebei, China)

Abstract: Lead, zinc and silver polymetallic deposits are intimately associated with the hypabyssal acidic rock mass in northern Zhangjiakou area. Middle–Upper Proterozoic carbonate strata are widely distributed in southern Zhangjiakou. Some polymetallic ore deposits (ore spots) have been found in carbonate strata, such as Liangjiagou, Huoshigou and Changzhuangzi. Dolomite formation of Gaoyuzhuang Group and Wumisan Group of Jixian System constitute the major ore–host rocks. Contrary to polymetallic deposits located in northern Zhangjiakou area, polymetallic deposit lies in the dolomite strata where intermediate–acid

收稿日期: 2015–11–16; 改回日期: 2016–06–03

基金项目: 河北省国土资源厅基金项目(2012055548和2013045650)资助。

作者简介: 李随民, 男, 1971年生, 博士, 教授, 主要矿床学方面的教学和研究工作; E-mail: sml71@163.com。

intrusive masses are not developed in the mining area. In addition, the orebody characteristics, ore fabric and ore deposit geochemistry have significant difference from the polymetallic deposits related to the hypabyssal acidic rock mass in northern Zhangjiakou area. Taking the Liangjiagou polymetallic deposit as an example, based on the field observation of the geological characteristics of ore deposit and ore, and taking into consideration various isotope test results for such elements as Pb, S, Rb, Sr, the authors have reached the conclusion that the sources of ore-forming material might have come from dolomite strata or substrata, the formation of the deposit was related to the large-scale overthrust nappe tectonic system, and the genetic type of ore deposit belongs to the Mississippi valley type (MVT) ore deposit.

Key words: isotope; lead, zinc and silver polymetallic deposit; MVT type; Liangjiagou

About the first author: LI Sui-min, born in 1971, doctor and professor, mainly engages in the study of deposit geology and deposit geochemistry; E-mail: smli71@163.com.

Fund support: Supported by Research Projects of Bureau of Land and Resources of Hebei Province(No. 201205548, No. 2013045650).

张家口南部位于华北地台北缘燕山台褶带中,区内中—新元古界碳酸盐岩地层分布广泛,燕山期中酸性岩体侵入其中,成矿条件优越。根据铅锌银多金属矿床的赋矿部位,区内多金属矿床可分为2类:一是赋存于白云岩与酸性岩体接触带附近的矽卡岩型,如目前已发现的三义庄、高家庄、口前等多金属矿床;二是分布于高于庄组、雾迷山组白云岩地层中,如梁家沟、火石沟、常庄子等多金属矿床(点)。赋存于白云岩地层中的多金属矿床在矿区范围内中酸性岩体不发育或不出现,矿体多呈似层状、透镜状。对该类型矿床的成因认识,长期以来存在较大争议^{①②}。本文在野外观察的基础上,结合矿石Pb、S、Rb、Sr等同位素测试结果,分析了该类型矿床的成矿物质来源和成矿动力学过程,认为梁家沟矿床成因属密西西比河谷(MVT)型。该认识对在张家口南部,乃至冀北地区中新元古界碳酸盐岩地层寻找多金属矿床具有重要的理论指导意义。

1 区域地质

梁家沟银锌多金属矿床位于张家口赤城县样田乡,大地构造位置为内蒙地轴与燕山台褶带过渡部位的燕山台褶带北缘,距尚义—赤城深大断裂南侧5 km附近。

区域范围内出露的地层有太古宇桑干群,红旗营子群变质岩系;元古宇蓟县系、青白口系沉积岩;中生界侏罗系中统河、湖相沉积岩;新生界第四系松散堆积物等(图1)。其中太古界桑干群和红旗营

子群变质岩系分布于矿区以北,主要岩性为黑云斜长片麻岩、黑云角闪斜长片麻岩及含石榴斜长角闪变粒岩等。地层倾向北东,倾角在25°~70°。蓟县纪地层岩性以白云岩为主,青白口纪地层岩性主要为页岩,下部含铁质结核。地层倾向北东,倾角在20°~40°。中生代地层主要为侏罗系中统后城组,主要岩性为砂质页岩、砂砾岩、凝灰质胶结燧石白云岩等。倾向南东,倾角较小。后城组与下伏地层为角度不整合接触。

矿区以北沿尚义—赤城深大断裂有红砂梁斑状花岗岩株出露,长9 km,宽3 km,面积约20 km²。岩体侵位于后城组地层中。

区域构造以断裂为主,规模较大的断裂构造为北西西向(尚义—赤城断裂)及南北向,其次为北西向断裂,除南北向为正断层外,其余均为逆断层。区域内青白口系下马岭组页岩由于受断裂构造影响,地层产状局部较零乱,常出现一系列紧密褶皱;各组断裂构造在矿区附近相对集中,构成成矿最有利部位。

2 矿床地质特征

矿区出露地层主要为雾迷山组白云岩。岩性以纹层状藻团白云岩、燧石条带白云岩和薄层—中厚层隐晶白云岩为主。矿体赋存于雾迷山组六段地层中(图2),角砾状白云岩是主要容矿岩石,角砾成分主要为白云岩,棱角状,无分选、不定向,热液沉淀的硫化物、方解石、石英等胶结白云岩角砾。

①河北地质学院.河北省地质矿产第十一地质大队.河北省赤城县火石沟彭家沟一带银矿地质特征与找矿靶区预测报告[R].1994.

②天津地质矿产研究所.河北省宣化县申太庄—常庄子铜铅锌矿普查评价地质报告[R].2006.

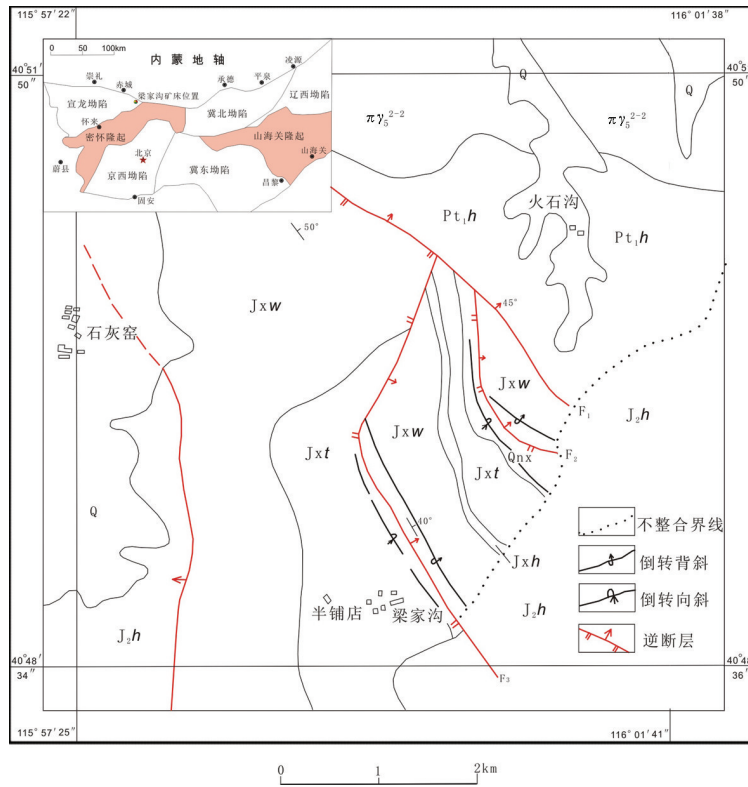


图1 梁家沟矿区区域地质图

Q—第四系; J₂h—中侏罗世后城组; Pt₃x—下马岭组; Jxt—铁岭组; Jxh—洪庄子; Jxw—雾迷山组; Pt₁h—红旗营子群; πγ₅²⁻²—燕山期斑状花岗岩

Fig. 1 Regional geological map of the Liangjiagou ore district

Q—Quaternary; J₂h—Jurassic Houcheng Formation; Pt₃x—Xiamaling Formation; Jxt—Jixian system Tieling Formation; Jxh—Jixian system Hongshuizhuang Formation; Jxw—Jixian system Wumishan Formation; Pt₁h—Palaeoproterozoic Hongqiyinzi Group; πγ₅²⁻²—Yanshanian porphyritic granite

矿体主要呈层状、似层状、透镜状产出。矿体产状为近北西 60°走向, 倾向北东, 倾角随地势变化较大, 海拔较高处, 倾角较缓, 一般在 30°~40°, 随着海拔降低, 矿体产状明显变陡, 部分区域产状接近直立。矿石结构以中-细粒为主, 矿石构造以角砾状为主, 局部为块状、脉状, 矿化多发生在胶结物中。角砾成分主要为白云岩和硅质白云岩。角砾大小不一, 砾径多在 1~5 cm。白云岩角砾比较干净, 无矿化及明显蚀变现象。上述矿石组构反映出成矿流体胶结脆性碎裂的白云岩角砾及沿白云岩裂隙充填的特征, 显示了矿床后生特征。矿石中金属矿物组成简单, 主要为方铅矿、闪锌矿、黄铁矿等, 偶见铜蓝、孔雀石、褐铁矿等氧化矿物。脉石矿物以石英、方解石为主。由于矿区勘探深度较浅, 原生矿石数量较少, 多为氧化矿石。镜下可见石英和部分金属矿物呈脉状分布, 矿石后生成因特征明

显。近矿围岩蚀变主要为硅化, 其次为碳酸盐化、土化等。总的来看, 矿区围岩蚀变较弱。

需要说明的是, 梁家沟多金属矿床中镉(Cd)元素含量较高, 主要富集在闪锌矿中。本次采集的 5 件矿石样品 Cd 元素在 1218×10⁻⁶~13022×10⁻⁶(表 1), 平均值为 4878.4×10⁻⁶, 已超过边界品位(100×10⁻⁶)10 倍到 100 倍以上。闪锌矿有高温闪锌矿和低温闪锌矿, 高温闪锌矿含 Fe, 常与磁铁矿共生, Cd 含低; 而低温闪锌矿常 Pb 与共生, Cd 含高。因而闪锌矿中 Cd 元素的含量水平可在一定程度上反映成矿温度^[2]。梁家沟矿石中流体包裹体均一温度测试结果显示, 成矿流体一般不超过 150℃, 这也与矿石中高含量 Cd 元素预示的中低温环境相吻合。

Schwartz 对世界上 480 个矿床中的闪锌矿中的 Cd 按照矿床类型进行了统计^[3], 结果表明 MVT 和白云岩、灰岩中脉状矿床中闪锌矿的 Cd 含量较高, 而

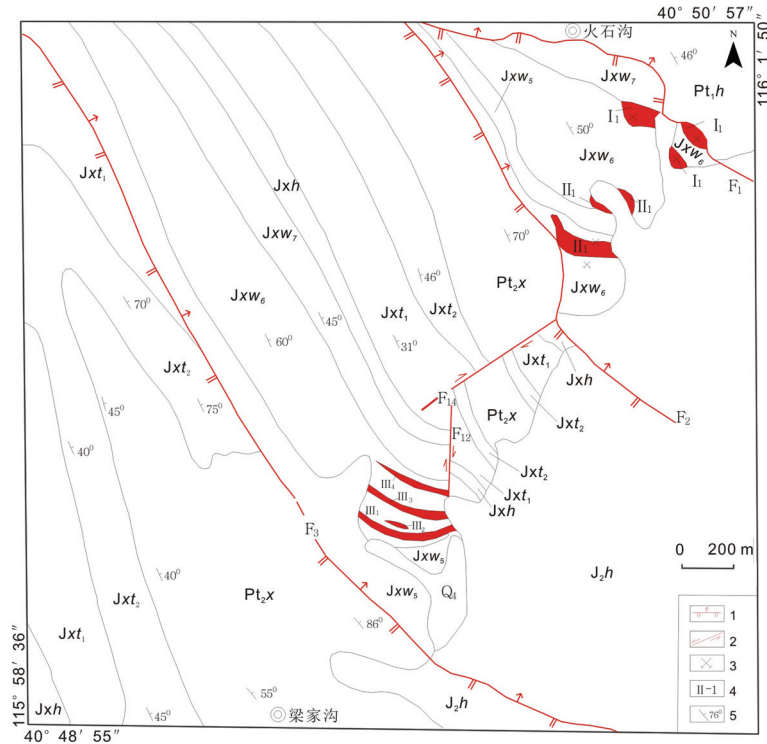


图2 赤城县梁家沟矿床地质图

J₂h—中侏罗世后城组; Pt₂x—下马岭组; Jxt₂—铁岭组二段; Jxt₁—铁岭组一段; Jxh—洪水庄; Jxw₇—雾迷山组七段; Jxw₆—雾迷山组六段; Jxw₅—雾迷山组五段; Pt₂h—红旗营子群; 1—逆断层; 2—平推断层; 3—老洞及编号; 4—矿体编号; 5—岩层产状

Fig. 2 Geological sketch map of the Liangjiagou ore district

J₂h— Jurassic Houcheng Formation; Pt₂x—Xiamaling Formation; Jxt₂—Jixian system second section of Tieling Formation; Jxt₁—Jixian system first section of Tieling Formation; Jxh—Jixian system Hongshuizhuang Formation; Jxw₇— Jixian system seventh section of Wumishan Formation; Jxw₆— Jixian system sixth section of Wumishan Formation; Jxw₅— Jixian system fifth section of Wumishan Formation; Pt₂h— Palaeoproterozoic Hongqiyinzi Group; 1— Reverse fault; 2— Translational fault; 3—Old hole and its serial number; 4—Ore deposit and its serial number; 5— Attitude of rocks

表1 梁家沟矿石主要成矿元素组成(10⁻⁶)

Table 1 Main metellogenic elements composition of from the Liangjiagou deposit

样品编号	Cu	Zn	Mo	Cd	Ba	Pb
LJG-01-1	128	74968	4.31	1218	96.5	493
LJG-01-3	1548	246193	5.48	13022	15.6	59133
1-L1	1052	221834	6.82	5497	25.9	29720
2-L5	895	156496	100	2448	7.48	7137
2-L8	319	130608	8.99	2207	16.5	1867

注: 测试单位为北京核工业地质测试中心。

SEDEX型、矽卡岩型及与火山有关的块状硫化物矿床闪锌矿中明显偏低。如陕西南郑县马元铅锌矿床为典型的MVT型多金属矿床, 该矿床闪锌矿中Cd元素含量在 $1304 \times 10^{-6} \sim 5023 \times 10^{-6}$, 超过边界品位10倍以上^[4]。

该类型矿床目前尚无准确的成矿年龄测定方法。根据矿石组构显示的后生地质特征, 推测矿床应形成于雾迷山组白云岩之后。矿石矿物镜下可见黄铁矿与闪锌矿共生, 或分布在闪锌矿内呈固体出溶物(图3)。李随民等对梁家沟矿床中闪锌矿、方铅矿和黄铁矿等硫化物采用Rb-Sr和Sm-Nd法测年结果为126~131.3 Ma^[5], 推测矿体形成于燕山运动中晚期。

3 同位素组成及地质意义

3.1 铅同位素组成及其地质意义

由于硫化物中只含有痕量的U、Th, 当其形成后U和Th衰变产生的放射成因铅数量少, 对铅同位素组成的影响可以忽略, 因此硫化物中的铅都是普通铅, 可探讨性地计算其模式年龄。Faure认为铅同

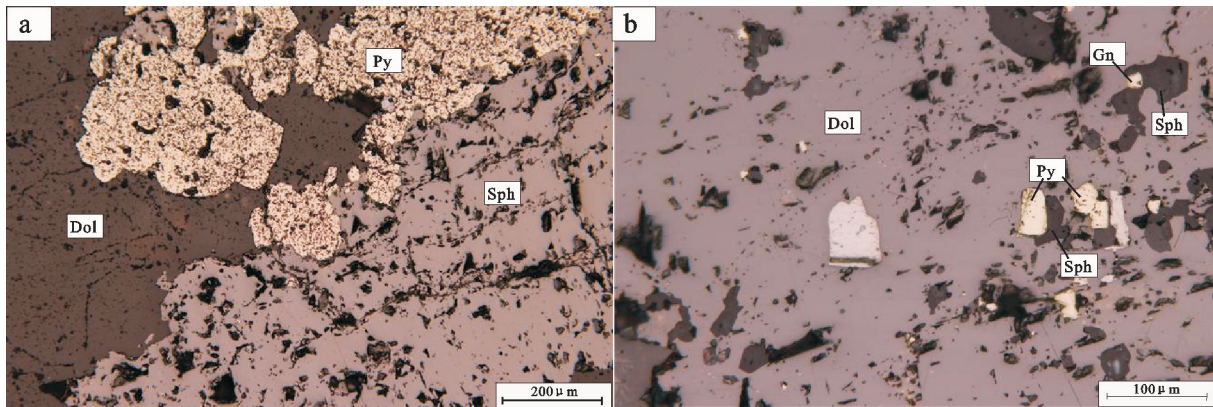


图3 梁家沟矿石矿物结构图

a—闪锌矿(Sph)、黄铁矿(Py)与白云石(Dol)共生; b—闪锌矿(Sph)、方铅矿(Gn)和黄铁矿(Py)共生,且局部闪锌矿粒内黄铁矿固溶体出溶
Fig. 3 Structural chart of ore minerals of the Lianjiagou polymetallic deposit

a—Sphalerite, pyrite and galena associated with dolomite; b—Sphalerite, pyrite and galena associated with dolomite, locally with interstitial separation structure

位素模式年龄是否有意义应根据以下原则进行判别^[6]: ①取自给定矿床一套有代表性样品的模式年龄必须一致; ②取自给定矿床的铅同位素比值, 在实验误差范围内必须是个常数; ③模式年龄必须是正值; ④模式年龄一般应与矿床中其他矿物的同位素年龄及成矿母岩的同位素年龄相一致。

从梁家沟7件硫化物铅同位素组成上看变化很小(表2), 即不同硫化物的铅同位素组成较均匀, 如 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的变化率分别为0.32%、1.19%和0.28%。铅同位素模式年龄在1078~1246 Ma, 相当于中元古代蓟县纪, 与赋矿地层雾迷山组白云岩时代大致相同。已有的测试数据显示, 区内雾迷山组上部的燧石条带白云岩、角砾状燧石条带白云岩中Pb、Zn、Ag等成矿元素含量

均高于高于庄组、铁岭组等其他组地层。如Ag含量是碳酸盐岩克拉克值的140倍, Pb是9.3倍, Zn是10.2倍, Cd是17倍^①, 显示出雾迷山组白云岩是区内多金属矿床重要的矿源层之一。

根据Faure铅同位素模式年龄是否有意义的判别原则, 梁家沟硫化物铅同位素模式年龄具有一定的地质意义, 代表着矿石铅从来源区分离出来的时间。结合雾迷山组地层中Pb、Zn、Ag等成矿元素含量组成, 推测矿石中成矿物质在来源上与雾迷山组白云岩地层具有密切的成因联系。

此外, 梁家沟硫化物 μ 值在11.5~11.95变化, μ 值远高于地壳均值(9.58), 一般高 μ 值被解释为来自上地壳^[7-8]。这与推测的梁家沟矿床成矿物质来源于雾迷山组白云岩结论相一致。

表2 梁家沟矿床铅同位素及参数组成

Table 1 Lead isotopic compositions of sulfides in the Liangjiagou lead-zinc deposit

样号	样品名称	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	T/Ma	μ	ω	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
1-L1	闪锌矿	18.581	16.601	40.104	1078	11.50	53.43	80.53	83.20	76.12
2-L3	闪锌矿	18.565	16.681	40.129	1153	11.68	54.63	79.60	88.42	76.79
2-L3	黄铁矿	18.572	16.701	40.178	1165	11.73	55.06	80.01	89.72	78.10
2-L5	闪锌矿	18.607	16.677	40.203	1126	11.66	54.61	82.05	88.15	78.77
2-L6	闪锌矿	18.583	16.776	40.192	1218	11.89	55.94	80.65	94.61	78.48
2-L8	闪锌矿	18.569	16.801	40.176	1246	11.95	56.27	79.84	96.25	78.05
2-L8	黄铁矿	18.625	16.691	40.215	1127	11.69	54.69	83.09	89.07	79.10

注: 测试单位为南京大学现代测试中心。

①河北地质学院, 河北省地质矿产第十一地质大队, 河北省赤城县火石沟彭家沟一带银矿地质特征与找矿靶区预测报告[R], 1994.

朱炳泉根据不同类型岩石铅的资料和已知成因的矿石铅资料,用 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 图的表示方法给出了不同成因类型矿床的变化范围^[9]。这些成因类型中除上地壳铅外,其余成因类型铅的 $\Delta\beta$ 和 $\Delta\gamma$ 均有一定的变化范围。上地壳源铅一般 $\Delta\beta>45$, $\Delta\gamma>18$ 。梁家沟矿床硫化物铅同位素的 $\Delta\beta$ 和 $\Delta\gamma$ 值分别大于83和76,属典型的上地壳铅源。这也与前述分析结果相吻合,即成矿物质可能主要来源于白云岩及下伏地层。

Leach et al. 综合了30个MVT型矿床硫化物样品的铅同位素研究成果^[10],得出MVT与一般热液矿床的铅同位素组成有很大的差异,最显著的特点是MVT型矿床富含放射性成因铅。梁家沟硫化物铅同位素富含放射性成因铅, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值分别达18.5、16.6、40.1以上,远高于冀北地区已知的铅锌多金属矿床比值。如张家口蔡家营矿石中硫化物 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值分别在16.7~17.0、15.3~15.8、37.3~37.9^[11];承德北岔沟门硫化物 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值分别在16.3~17.0、14.8~15.6、37.1~38.0^[12];上述矿床硫化物铅同位素比值均显著小于梁家沟铅同位素组成。毛德宝对华北地台北缘20个铅锌多金属矿床的铅同位素统计结果也显示^[13], $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别在15.6~17.6、15.1~15.6、35.6~37.8变化,同位素比值组成也远低于梁家沟铅同位素。张正伟通过对11个国外典型MVT型矿床硫化物铅同位素组成比较后得出^[14],绝大多数MVT型矿床具有独特的铅同位素组成,显著地富U、Th特征,尤其是 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 大多数在40以上。

通过上述多金属矿床铅同位素组成对比分析可知,梁家沟矿床与冀北已发现的在成因上与燕山期浅成中酸性侵入体关系密切的多金属矿床铅同位素存在显著差异,而与密西西比型多金属矿床的铅同位素存在较强的可比性。

3.2 硫化物Rb-Sr、Sm-Nd同位素组成及地质意义

梁家沟硫化物Rb-Sr、Sm-Nd同位素确定的成矿年龄在126~131.3 Ma,同位素综合年龄130 Ma^[5],矿床形成时代为燕山运动晚期。这与矿石呈显著的后生构造特征相吻合。

梁家沟硫化物等时线图显示初始铷同位素 I_{Sr} 集中分布在0.713~0.714,初始钕同位素 I_{Nd} 分布在

0.512左右。胡文学等^[15]和李华芹等^[16]对冀北变质结晶基底红旗营子群黑云角闪斜长片麻岩及雾迷山组白云岩的Rb-Sr同位素测试结果显示,梁家沟硫化物初始铷同位素值高于雾迷山组白云岩和古元古代红旗营子群变质岩,而低于雾迷山组下覆长城纪白云岩地层的铷同位素组成,暗示着成矿物质为经历了雾迷山组下伏地层。

此外,梁家沟矿区硫化物的初始钕同位素 I_{Nd} 介于上、下地壳 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (0.51212~0.50071),亦表明硫化物的来源与壳源物质关系密切。硫化物样品的Nd模式年龄在1733~1749 Ma^[5],Nd模式年龄与蓟县纪下伏的长城纪地层时代相当,也从另一侧面印证了成矿物质在来源上与雾迷山组及其下伏地层关系密切。

3.3 硫同位素

从成矿溶液中沉淀的各种硫化物的同位素组成不仅取决于成矿溶液的原始同位素成分,而且还取决于硫化物沉淀时的物理-化学条件的变化^[17]。因此,在应用硫化物的硫同位素组成判断硫的来源时,不能简单地用某一种硫化物的硫同位素组成来代表热液的总硫同位素组成,并以此为依据对矿床的硫源进行推测。成矿溶液的总硫同位素组成可通过物理-化学平衡分析法、矿物共生组合比较法和Pinckney-Rafter法等3种方法获得。本次测试了梁家沟3对闪锌矿-黄铁矿硫化物对的硫同位素组成(表3)。测试结果显示,闪锌矿硫同位素显著高于黄铁矿的硫同位素组成。

本次采用Pinckney-Rafter法对闪锌矿-黄铁矿共生矿物对求取了成矿热液的总硫同位素组成。根据闪锌矿-黄铁矿对的 $\delta^{34}\text{S}$ 值作图(图4)获得成矿溶液总硫的 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}=10\text{‰}$ 。

梁家沟矿区分布有大面积中一新元古代白云岩,虽白云岩中的黄铁矿能被热液淋滤,硫能被带入热液成为成矿热液的硫物质来源,但黄铁矿中的硫同位素几乎不与形成的 H_2S 产生同位素分馏或分馏很小,被淋滤产生的含 H_2S 热液具有与黄铁矿近似的 $\delta^{34}\text{S}$ 值,即梁家沟成矿热液 $\delta^{34}\text{S}$ 值与围岩中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值相近。

此外,据张长江等^①对张家口蔡家营矿区各类岩石所作的硫同位素测试结果,组成区内变质结晶

①张长江,陈树清,王富贵.河北省地矿局第三地质大队.河北省张北县蔡家营铅锌银矿地质特征、成矿规律及成因.1994.

表3 梁家沟硫化物硫同位素组成
Table 2 Sulfur isotopic compositions of sulfides in the Liangjiagou lead-zinc deposit

序号	矿物	样品编号	$\delta^{34}_{V-CDT}/\text{‰}$
1	黄铁矿	LJG-01-1	4.8
2	闪锌矿	LJG-01-1	9.9
3	黄铁矿	LJG-01-2	7.3
4	闪锌矿	LJG-01-2	9.9
5	黄铁矿	LJG-01-3	4.7
6	闪锌矿	LJG-01-3	9.8

注:测试单位为北京核工业地质测试中心。

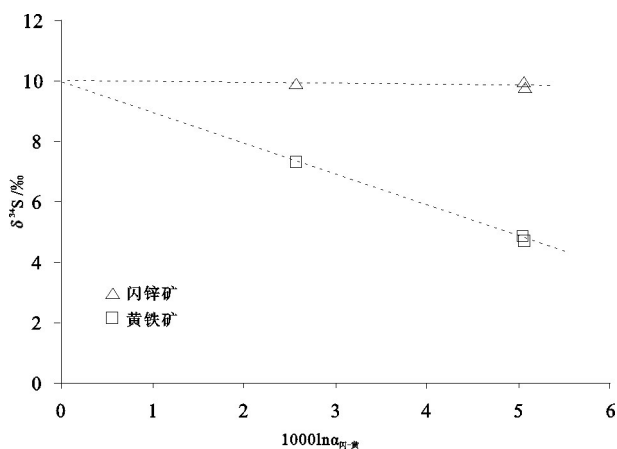


图4 梁家沟铅锌矿硫化物之间的硫同位素分馏
Fig.4 Sulfur isotope fractionation for sulfides of the Liangjiagou lead-zinc deposit

基底的红旗营子群变粒岩中黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 为 10.15‰, 该值与梁家沟矿床热液总硫 $\delta^{34}\text{S}$ 值极为相近。

Rye and Ohmoto^[18]对世界 14 个典型热液矿床进行了硫同位素研究后,将热液矿床分为 3 种类型。认为成矿溶液 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 值在 5‰~15‰ 的类型,硫的来源最为复杂,既可能来自围岩,也可来自蒸发岩和沉积硫化物的混合物。

硫同位素示踪结果显示,梁家沟成矿溶液中的硫来源可能与雾迷山组白云岩和下伏红旗营子群变质结晶基底岩石关系密切。

4 矿床成因及动力学机制

已有的研究资料显示, MVT 矿床一般与构造碰撞或裂谷活动(多离矿床较远)有关,如上密西西比河谷地区 MVT 铅锌矿床与 Alleghenian/Ouachita 造山活动,东堪萨斯 Jumbo 矿床与 Appalachian/

Ouachita 造山活动有关^[19]; Polaris 矿床与 Ellesmerian 造山活动有关^[20]; 东田纳西 Coy 和 Immel 矿床与 Acadian 造山活动有关^[21-22]。

张家口南部白云岩分布区逆冲推覆构造发育,该构造是地壳中广泛存在挤压应力和大规模造山运动时期的挤压作用,造成地壳大规模水平运动。区内以叠瓦式推覆岩片形式出现逆冲推覆构造。代表性的逆冲推覆构造有:涿鹿兴丰寺逆冲推覆构造、下花园鸡鸣山逆冲推覆构造、新保安梁庄逆冲推覆构造、赤城大岭堡—田家窑、二堡子—于家沟、万全寺渣子沟逆冲推覆构造等^[1]。上述构造主要发生在中侏罗世末到晚侏罗世初期。梁家沟矿床形成于 130 Ma(硫化物 Rb-Sr、Sm-Nd 等时线年龄),与区内大规模逆冲推覆构造时间相对应,据此推测梁家沟铅锌银多金属矿床是由于造山期逆冲推覆作用使盆地流体大规模活化、运移形成的 MVT 矿床。

其成矿作用过程为:中元古代初始,华北古陆固结的基底开始裂解,形成了与陆块边缘近于平行的白云鄂博拗拉槽、渣尔泰拗拉槽、燕山拗拉槽和泛河拗拉槽等 4 个拗拉槽或裂陷槽。张家口地区由于五台旋回的几条基底断裂发生差异性活动,从而出现了大体以尚义—赤城—丰宁—隆化深断裂为界的海、陆分化局面^[23]。北侧内蒙地轴长期处于持续上升状态,形成正形隆起地带。南侧地壳持续沉降接受海侵,形成中—新元古代燕山海槽,沉积了中新元古代的数千米至近万米的陆屑—碳酸盐沉积建造。张家口南部中—新元古代碳酸盐岩地层分布广泛。燕山运动中晚期,研究区进入碰撞造山阶段,区内形成了以逆冲推覆作用为主的地壳运动,并形成了一系列的逆掩断裂和逆冲断裂(图 5)。逆冲时和逆冲后的伸展活动使断层附近的岩石大量破碎,为流体运移和矿质沉淀提供了良好的导矿通道和容矿空间。强烈的逆冲推覆作用同时使流体从压力较高的盆地中央向流体压力相对较低的隆起边缘运移。同位素示踪结果显示,盆地流体从变质基底和白云岩盖层中萃取金属是矿质主要来源方式。盆地中的热卤水运移过程中不断萃取流经地层中的 Pb、Zn 等元素。当温度降低、浓度稀释、特别是遇到还原硫时(比如有机质的加入),会导致流体内的金属离子大量在雾迷山组白云岩中发生沉积成矿。硫化物的沉淀导致地层中的 pH 值降

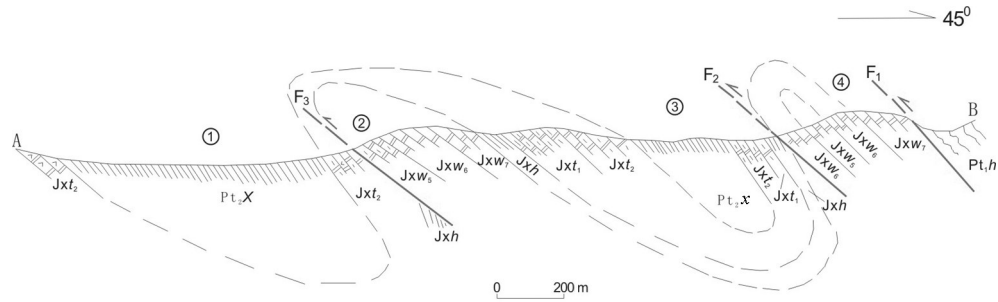


图5 梁家沟矿区系列叠瓦式逆冲推覆断裂带分布图

①—梁家沟复式倒转向斜;②—青云顶倒转背斜;③—大北沟复式倒转向斜;④—大尖山倒转背斜

F₁, F₂, F₃—叠瓦式逆冲推覆断裂带; Pt_x—下马岭组; Jxt₂—铁岭组二段; Jxt₁—铁岭组一段; Jxh—洪水庄组; Jxw₇—雾迷山组七段; Jxw₆—雾迷山组六段; Jxw₅—雾迷山组五段; Pt_h—红旗营子群

Fig. 5 The map of overthrust fracture belts in the Liangjiagou lead-zinc mining area

① Liangjiagou overturned synclinorium; ② Qingyunding overturned anticline; ③ Dabeigou overturned synclinorium; ④ Dajianshan overturned anticline; F₁, F₂, F₃—Overthrust fracture belts; Pt_x—Xiamaling Formation; Jxt₂—Jixian system second section of Tieling Formation; Jxt₁—Jixian system first section of Tieling Formation; Jxh—Jixian system Hongshuizhuang Formation; Jxw₇—Jixian system seventh section of Wumishan Formation; Jxw₆—Jixian system sixth section of Wumishan Formation; Jxw₅—Jixian system fifth section of Wumishan Formation;

Pt_h—Palaeoproterozoic Hongqiyingzi Group

低,从而更加加剧了雾迷山组白云岩的溶解过程,形成岩溶角砾岩带。该岩溶角砾岩带又进一步成为盆地流体迁移、聚集和矿质沉淀的有利场所。

韩一筱等^[24]认为马元多金属矿床是在燕山期陆内挤压构造背景条件下,起源于盖层沉积的低温盆地卤水,携带成矿物质,伴随低角度逆冲推覆构造作用过程,沿灯影组白云岩层间构造破碎带向盆地边部运动,在盆地边缘的构造破碎带中减压卸载,充填富集成矿,形成马元MVT型铅锌矿床。芮宗瑶等^[25]认为,不仅马元矿床,分布在扬子准地台周边和隆起边缘碳酸盐岩层中的MVT型铅锌成矿形成与扬子地台经受的构造地质事件都有一定关系。张家口梁家沟矿床与马元多金属矿床在成矿作用过程上极为相似。

5 结论

(1) Pb、S、Rb—Sr等同位素示踪结果显示,梁家沟矿床成矿物质主要来源于雾迷山组白云岩及其下伏变质结晶基底岩石。矿床形成时代明显晚于赋矿地层,矿床为后生成因,这与梁家沟矿石呈显著的后生构造特征相吻合。

(2) 梁家沟多金属矿床的形成与燕山运动时期区内大规模逆冲推覆构造时间相对应。强烈的逆冲推覆作用使盆地流体向隆起边缘运移,运移过程

中,盆地流体从变质基底和白云岩盖层中萃取金属是矿质主要来源方式。

(3) 梁家沟矿床与陕西南郑马元铅锌矿,无论在矿石组构、特征微量元素(Cd)、形成温度及矿床形成的地球动力学背景上,均有显著的相似性。

(4) 矿床在成因上属密西西比河谷(MVT)型。

致谢: 审稿专家及责任编辑老师对论文提出了宝贵修改意见,在此一并致以诚挚的谢意!

参考文献(References):

- [1] 宋瑞先,魏明辉,何宇青,等. 张家口地质矿产[M]. 北京:地质出版社,2013
Song Ruixian, Wei Minghui, He Yuqing, et al. Geology and Mineral Resources of Zhangjiakou Area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013(in Chinese).
- [2] 刘英俊,曹励明,李兆麟,等. 元素地球化学[M]. 北京:科学出版社,1984.
Liu Yinjun, Cao Liming, Li Zaolin, et al. Element Geochemistry[M]. Beijing: Science press, 1984(in Chinese).
- [3] Schwartz M O. Cadmium in zinc deposits: Economic geology of a polluting element [J]. International Geology Review, 2000, 42: 445-469.
- [4] 李厚民,陈毓川,王登红,等. 陕西南郑地区马元锌矿的地球化学特征及成矿时代[J]. 地质通报,2007,26(5): 546-552.
Li Houmin, Chen Yuchuan, Wang Denghong, et al. Geochemistry and mineralization age of the Mayuan zinc deposit, Nanzheng, southern Shaanxi, China[J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26

- (5): 546–552 (in Chinese with English abstract).
- [5] 李随民, 魏明辉, 李森文, 等. 张家口梁家沟铅锌银矿床Rb–Sr和Sm–Nd等时线年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 2014, 41(2): 529–539 (in Chinese with English abstract).
Li Suimin, Wei Minghui, Li Senwen, et al. Rb–Sr and Sm–Nd isochron ages of the Liangjiagou Pb–Zn–Ag ore deposit in Chicheng County of Zhangjiakou City and their geological implications[J]. *Geology in China*, 2014, 41(2): 529–539(in Chinese with English abstract).
- [6] Faure G. Principles of Isotope Geology [M]. New York: John Wiley and Sons, 1986.
- [7] Doe B R, Zartman R E. Plumbotectonics 1. the Phanerozoic [C]// Barnes H L. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits 2nd. Ed. Wiley Interscience, 1979: 22–70.
- [8] Kamona AF, Lé vüque J, Friedrich G, et al. Lead isotopes of the carbonate–hosted Kabwe, Tsumeb, and Kipushi Pb–Zn–Cu sulphide deposits in relation to Pan African orogenesis in the Damaran–Lufilian Fold Belt of Central Africa[J]. *Mineralium Deposita*, 1999, 34: 273–283.
- [9] 朱炳泉, 李献华, 戴樟漠, 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.
Zhu Bingquan, Li Xianhua, Dai Tongmo, et al. 1998, The Theory and Application of Isotope in the Earth Science System, Review the Crust–Mantle Evolution of Chinese Mainland[M]. Beijing: Science press, 1998(in Chinese).
- [10] Leach D L, Sangster D F, Kelley K D, et al. Sediment–hosted lead–zinc deposit: A global perspective[C]//Economic Geology 100th Anniversary Volume, 2005: 561–607.
- [11] 章百明, 赵国良, 马国玺, 等. 河北省主要成矿区带矿床成矿系列及成矿模式[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
Zhang Baiming, Zhao Guoliang, Ma Guoxi, et al. The Main Metallogenic Series and Metallogenic Model of the Mining Area in Hebei Province[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996(in Chinese).
- [12] 毛德宝, 钟长汀, 武永平, 等. 冀北北岔沟门铅锌多金属矿床地质特征及成因[J]. 地质调查与研究, 2005, 28(4): 228–239.
Mao Debao, Zhong Changting, Wu Yong ping, et al. Metallogenic Processes of Beichagoumen lead–zinc polymetallic deposit, north Hebei Province: Constrains from geological and geochemical characteristics[J]. *Geological Survey and Research*, 2005, 28(4): 228–239 (in Chinese with English abstract).
- [13] 毛德宝, 钟长汀, 陈志宏, 等. 铅同位素特征对成矿物质来源的制约——以华北地块北缘中段铅锌银矿床为例[J]. 前寒武纪研究进展, 2001, 24(4): 193–200.
Mao Debao, Zhong Changting, Chen Zhihong, et al. Pb isotope characteristics of Pb–Zn–(Ag) deposits in the middle north margin of North China Block: Constraints on Source Process[J]. *Progress in Precambrian Research*, 2001, 24(4): 193–200 (in Chinese with English abstract).
- [14] 张正伟, 彭建堂, 沈能平, 等. 西昆仑碳酸盐岩层控–改造型铅锌矿床成矿模式与找矿评价[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2011.
Zhang Zhengwei, Peng Jiantang, Chen Nengping, et al. Pb–Zn Deposit Metallogenic Model and Prospecting Evaluation of Carbonate Rocks Stratabound Transformed Typed, West Kunlun, China[M]. Hefei: University of Science and Technology of China press, 2011(in Chinese).
- [15] 胡文学, 张满江, 权恒. 冀北红旗营子群同位素年龄及其时代归属[J]. 中国区域地质, 1996, (2): 186–192.
Hu Xuewen, Zhang Manjiang, Quan Heng. The isotopic ages of the Hongqiyingsi Group in Northern Hebei and its age assignment[J]. *Regional Geology of China*, 1996, (2): 186–192(in Chinese with English abstract)
- [16] 李华芹, 蔡红, 秦正永, 等. 蓟县中上元古界典型剖面锶同位素组成特及其地层意义[J]. 地球学报, 1994(1–2): 232–244.
Li Huanqin, Cai Hong, Qin Zhengyong, et al. Strontium isotope compositions of Jixian Middle Upper Proterozoic stratatype section and their significances [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 1994 (1/2): 232–244 (in Chinese with English abstract).
- [17] 郑永飞. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000, Zheng Yongfei. Stable Isotope Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [18] Robert O. Rye, Hiroshi Ohmoto. Sulfur and carbon isotopes and ore genesis: A review[J]. *Econ Geol.*, 1974, 69: 826–842.
- [19] Brannon J C, Podosek F A, McLimans R K. Alleghenian age of the Upper Mississippi Valley–type zinc–lead deposit determined by Rb–Sr dating of sphalerite[J]. *Nature*, 1992, 356: 509–511.
- [20] Christensen J N, Halliday A N, Leigh K E, et al. Direct dating of sulfides by Rb–Sr: A critical test using the Polaris Mississippi Valley–type Zn–Pb deposit[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, 59: 5191–5197.
- [21] Nakai S, Halliday A N, Kesler S E, et al. Rb–Sr dating of sphalerites from Tennessee and the genesis of Mississippi Valley–type ore deposits[J]. *Nature*, 1990, 346: 354–357.
- [22] Nakai S, Halliday A N, Kesler S E, et al. Rb–Sr dating of sphalerites from Mississippi Valley–type (MVT) ore deposits[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1993, 57: 417–427.
- [23] 崔盛芹, 李锦蓉, 吴珍汉, 等. 燕山地区中生代陆内造山作用[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
Cui Shengqin, Li Jinrong, Wu Zhenhan, et al. Mesozoic and Cenozoic Intracontinental Orogenesis of the Yanshan Area, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002(in Chinese).
- [24] 韩一筱, 刘云华, 刘淑文, 等. 马元铅锌矿床角砾岩成因及成矿地质背景[J]. 地学前缘, 2015(22): 1–8.
Han Yixiao, Liu Yunhua, Liu Shuwen, et al. Origin of the breccia and metallogenic geological background of Mayuan Pb–Zn deposit[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015(22): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- [25] 芮宗瑶, 叶锦华, 张立生, 等. 扬子克拉通周边及其隆起边缘的铅锌矿床[J]. 中国地质, 2004, 31(4): 337–346.
Rui Zongyao, Ye Jinhua, Zhang Lisheng, et al. Pb–Zn deposits on the perimeter of the Yangtze craton and on the margins of its uplifts[J]. *Geology in China*, 2004, 31(4): 337–346(in Chinese with English abstract).