

扬子北缘马元铅锌矿床地质、地球化学及成因

高永宝, 李侃, 钱兵, 李文渊, 张江伟

中国地质调查局西安地质调查中心, 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 西安, 710054

近年来, 扬子地台北缘铅锌找矿工作取得明显突破, 如陕西南郑马元铅锌矿带、湖北竹溪朝阳铅锌矿成矿带和兴山白鸡河铅锌矿带。马元铅锌矿床资源前景巨大, 备受关注。目前已经进入开采阶段, 但研究资料还十分有限。前人主要对矿床的地质特征及同位素地球化学特征进行了研究(侯满堂等, 2007; 王晓虎等, 2008; 李厚民等, 2007), 认识到有机物质对成矿具有很大的贡献(侯满堂, 2009; 刘淑文等, 2012), 对矿床成因存在 MVT 型(王晓虎等, 2008; 李厚民等, 2007) 和类 MVT 型(侯满堂等, 2007) 等不同的认识, 对成矿流体的研究还比较缺乏。

基于此, 本文对马元矿床开展了闪锌矿微量元素, 流体包裹体显微测温及激光拉曼分析, 硫化物 S、Pb 同位素, He-Ar、H-O 同位素以及闪锌矿中流体挥发分 C 同位素地球化学研究, 并结合前人的分析资料, 对成矿温度、成矿物质来源、成矿流体特征进行深入探讨, 进一步约束矿床成因。

1 区域地质背景及矿床地质

马元铅锌矿床位于汉中南部碑坝穹隆构造南翼的孔隙沟-楠木树-尖砬子沟一带。区域基底由中-新元古界火地垭群中、深变质火山碎屑岩系和晋宁-澄江期中酸性侵入岩、基性杂岩等构成。区域岩浆岩主要为中-新元古界火地垭群英安岩、流纹岩和玄武岩和晋宁-澄江期侵入岩。铅锌矿体主要赋存于震旦系灯影组第三岩性段(Z_2dn^3)角砾状白云岩中, 呈透镜状、似层状顺层产出。矿石矿物以闪锌矿、方铅矿为主, 可见少量黄铁矿等。脉石矿物主要为白云石, 次有方解石、石英、重晶石, 沥青较为发育。以中粗粒晶质结构为主, 矿石构造以角砾状为主, 局部为块状、网脉状、脉状。矿区成岩成矿作

用主要经历了沉积期、热液期和表生期。沉积期为震旦系灯影组白云岩、硅质白云岩形成阶段。热液期又划分为 2 个阶段, 即早期石英-黄铁矿-沥青阶段及晚期闪锌矿-方铅矿-白云石-方解石-重晶石-沥青阶段。表生期主要为原生矿物受近地表氧化淋滤作用的影响, 局部形成了白铅矿、褐铁矿等。

2 结果与讨论

2.1 成矿温度

已有研究表明, 高温条件下形成的闪锌矿呈深色, 富集

Fe、Mn、In、Se、Tl 等元素, Ge/In、Ga/In 比值小; 中温条件下形成的闪锌矿富 Cd 和 In, Ga/In 比值为 0.1~5.0; 而低温条件下形成闪锌矿呈浅色, Ga、Ge、Ag 含量高, Ga/In 比值为 1.0~100 (Cook *et al.*, 2009; Ye *et al.*, 2011; 叶霖等, 2012; 邹志超等, 2012)。马元铅锌矿床 Fe、Mn 含量相对较低, 贫 In、Tl、Se, 富集 Cd、Ge、Ga、Ag, Ga/In 为 6.2~131.5, Ge/In 多 >1000, 表明矿床中的闪锌矿属中-低温产物。另外, 马元矿床闪锌矿的 Zn/Cd 比值为 232~631, 平均 387 ($n=13$), 指示为中温条件下的产物 ($Zn/Cd=\pm 250$, 刘英俊等, 1984)。可见, 马元铅锌矿床成矿温度以中-低温为主, 这与流体包裹体测温结果 (150~280℃) 相似, 与 MVT 型铅锌矿床的形成温度 (50~250℃, Leach *et al.*, 2005) 基本吻合。

2.2 成矿流体性质

马元矿床闪锌矿流体包裹体的 $n(^3\text{He})/n(^4\text{He})$ 为 0.03~1.05Ra, $n(^{40}\text{Ar})/n(^{36}\text{Ar})$ 为 326.1~765.1, $n(^{38}\text{Ar})/n(^{36}\text{Ar})$ 为 0.183~0.204, 明显区别于地幔流体 [$n(^3\text{He})/n(^4\text{He})$ 为 6~9Ra, $n(^{40}\text{Ar})/n(^{36}\text{Ar}) > 40000$], 而介于大气饱和水[包括大气降水和海水,

注: 本文为国家自然科学基金青年项目(编号 41102050)、陕西省自然科学基金基础研究计划项目(编号 2013JM5010)的成果。

收稿日期: 2015-02-28; 改回日期: 2015-03-03; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 高永宝, 男, 1982 年生, 博士, 助理研究员, 矿床学专业。Email: gaoyongbao2006@126.com。

$n(^3\text{He})/n(^4\text{He})=1\text{Ra}$, $n(^{40}\text{Ar})/n(^{36}\text{Ar})=295.5$, $n(^{38}\text{Ar})/n(^{36}\text{Ar})=0.188$] 以及地壳流体 [$n(^3\text{He})/n(^4\text{He})$ 为 $0.01\sim 0.05\text{Ra}$, $n(^{40}\text{Ar})/n(^{36}\text{Ar})>295.5$] 之间, 表明成矿流体主要为地壳流体和饱和大气水 (大气降水或海水) 的混合, 没有地幔流体成分混入。

流体包裹体研究显示, 马元矿床脉石矿物石英、方解石、重晶石及矿石矿物闪锌矿中的流体包裹体气相组分以 CH_4 为主, 含少量 CO_2 和 H_2S ; 本次研究还测得闪锌矿中同时含有 C_2H_6 气体。且闪锌矿内流体包裹体挥发分 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ 值为 $-36.0\text{‰}\sim -28.8\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{C}_2\text{H}_6}$ 值为 $-27.7\text{‰}\sim -22.4\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值为 $-23.2\text{‰}\sim -9.68\text{‰}$, 与区内沥青的 C 同位素 ($-35.3\text{‰}\sim -33.7\text{‰}$) 基本一致, 与震旦系灯影组中天然气藏也较为相似 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ 值为 $-32.8\text{‰}\sim -32.0\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{C}_2\text{H}_6}$ 值为 $-33.9\text{‰}\sim -31.0\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值为 $-12.5\text{‰}\sim -2.1\text{‰}$, Zhu *et al.*, 2007)。表明有机流体参与了成矿作用。

马元矿床石英、方解石、重晶石的 H-O 同位素结果显示, 石英中流体包裹体的 δD 为 $-113\text{‰}\sim -70\text{‰}$, 流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 $13.1\text{‰}\sim 16.7\text{‰}$; 方解石中流体包裹体的 δD 为 $-76\text{‰}\sim -68\text{‰}$, 流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 $4.5\text{‰}\sim 8.7\text{‰}$; 重晶石的 δD 为 -38‰ , 流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 2.7‰ , 具有海水和有机水混合的特征。

综上, 马元矿床成矿流体具有两种流体混合的特征, 一为海水蒸发与围岩反应所形成的盆地卤水, 二为有机流体。流体包裹体中 CH_4 、 CO_2 、 H_2S 的出现, 反映流体具有较强的还原性。

2.3 成矿物质来源

闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $15.1\text{‰}\sim 19.4\text{‰}$ ($n=20$), 方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $12.9\text{‰}\sim 17.6\text{‰}$ ($n=9$), 黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $12.1\text{‰}\sim 21.3\text{‰}$ ($n=5$), 重晶石的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $31.7\text{‰}\sim 36.2\text{‰}$ 。 $\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}}>\delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}}>\delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$, 硫同位素分馏基本达到平衡。震旦纪灯影时期古海水硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为 $20.2\text{‰}\sim 38.7\text{‰}$ (张同钢等, 2004), 震旦系灯影组中纯净石膏的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $20.8\text{‰}\sim 22.5\text{‰}$, 平均为 21.8‰ ($n=4$, Zhu *et al.*, 2007), 中上寒武统石膏的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均为 27.7‰ ($n=2$, 朱光有等, 2014)。综上, 表明还原硫来自于海相硫酸盐的还原, 区内蒸发沉积岩可能为重要的硫源。

不同硫化物 Pb 同位素之间无明显差别, $n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 为 $17.858\sim 18.936$, $n(^{207}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 为 $15.603\sim 15.694$, $n(^{208}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 为

$37.756\sim 38.381$, 反映其铅同位素组成比较稳定。具有造山带和上地壳铅的特征。豪特曼斯公式计算的模式年龄 ($564\sim 625\text{Ma}$) 代表着矿石铅来源区分离出来的时间, 即 U-Th 与铅脱离的时间, 故可推测与模式年龄 ($564\sim 625\text{Ma}$) 相应时代的震旦系可能提供了金属成矿物质。

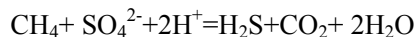
矿区赋矿围岩角砾状白云岩的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $-3.2\text{‰}\sim 1.3\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为 $23.6\text{‰}\sim 26.9\text{‰}$ (刘淑文等, 2012), 与震旦纪灯影时期古海水碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围 ($0.5\text{‰}\sim 5.0\text{‰}$, 张同钢等, 2004) 接近, 表明马元铅锌矿赋矿角砾状白云岩为海相沉积成因。矿石中胶结物热液白云石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $-2.5\text{‰}\sim 0.9\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为 $17.56\text{‰}\sim 19.6\text{‰}$; 方解石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $-4.2\text{‰}\sim -1.2\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为 $18.6\text{‰}\sim 21.3\text{‰}$ (刘淑文等, 2012), 主要来自海相碳酸盐岩的溶解。

3 矿床成因

马元矿床属 MVT 型铅锌矿床。成矿过程大致如下:

扬子北缘震旦纪盆地沉积岩成岩后的地下卤水, 在循环过程中下渗到深部基底岩系, 并不断被加热 (可能存在异常的地热梯度), 在其流过程中不断萃取基底岩石中的 Pb、Zn 等成矿元素, 形成了富含 Pb、Zn 的成矿流体。

加里东期, 南、北大陆开始俯冲会聚, 扬子板块北缘前沿不均匀隆升, 在碑坝古陆隆升过程中, 导致其周缘震旦系灯影组构造角砾岩的形成。同时, 盆地升温, 寒武系烃源岩热成熟形成油气; 盆地流体在构造应力和重力势驱动下由盆地深部向边缘流动, 盆地中的油气也运移到矿区角砾岩带中, 其围岩的致密性使其能够得以保存并形成古油气藏, 随着温度的不断升高, 由于高温热化学还原作用 (TSR) 形成富含 CH_4 和 H_2S 的有机还原性流体, 并不断溶蚀围岩形成孔隙:



随后, 当富含 Pb、Zn 等成矿物质的成矿流体流至富含有机还原性流体的矿区角砾岩带时, 两种流体混合, Pb、Zn 等遇到 H_2S 而沉淀, 并伴生热液白云石等:

