doi:10.3799/dqkx.2015.083

内蒙古红岭铅锌矿床成矿流体地球化学特征及矿床成因

李剑锋[1],王可勇[1*],陆继胜[2],张雪冰[1],权鸿雁[1],王承洋[1],魏良民[2]

1. 吉林大学地球科学学院,吉林长春 130061
2. 内蒙古赤峰红岭有色矿业有限责任公司,内蒙古赤峰 025420

摘要:红岭铅锌矿是内蒙古东南部的大型代表性矿床之一.目前,对该矿床成矿流体地球化学特征、性质及演化问题尚缺乏系统研究.对其展开了系统的流体包裹体研究.结果表明,矿区矽卡岩期Ⅰ阶段石榴石中发育含NaCl子矿物三相(SL)、气相—富气相(LV)及气液两相(VL)3种类型的原生流体包裹体,Ⅱ阶段中石英颗粒主要发育LV和VL两种类型原生流体包裹体,测温结果表明矽卡岩期成矿流体属中—高温、高盐度的不均匀$NaCl-H_2O$体系热液,在成矿过程中发生过沸腾作用而导致铅、锌、铜等有用元素沉淀富集.石英—硫化物期Ⅲ→Ⅵ阶段中矿物均主要发育较单一的VL型包裹体,其中Ⅲ阶段热液均一温度较矽卡岩期明显降低,而盐度没有明显变化;Ⅳ阶段成矿流体均一温度明显增高、盐度明显降低,反映了有新的高温、低盐度体系热液的加入;而Ⅴ→Ⅵ阶段成矿流体均一温度及盐度逐渐降低,体现了一种不断与外来天水混合的演变趋势;整体上看,石英—硫化物期流体为简单的中—低温、低盐度$NaCl-H_2O$体系热液.流体包裹体C、H、O同位素研究表明,红岭矿床矽卡岩期Ⅱ阶段成矿流体以岩浆水为主;石英—硫化物期成矿流体源自大气降水与岩浆水的混合流体,晚阶段逐渐演化为以大气降水为主.矿床S、Pb同位素研究表明,区内成矿物质具深源特点.

关键词:红岭铅锌矿床;成矿流体;地球化学;矿床;内蒙古东南部.
中图分类号:P611.1 **文章编号**:1000—2383(2015)06—0995—11 **收稿日期**:2014—07—20

Ore-Forming Fluid Geochemical Characteristics and Genesis of Pb-Zn Deposit in Hongling, Inner Mongolia

Li Jianfeng[1], Wang Keyong[1*], Lu Jisheng[2], Zhang Xuebing[1], Quan Hongyan[1], Wang Chengyang[1], Wei Liangmin[2]

1. *College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun* 130061, *China*
2. *Chifeng Hongling Nonferrous Metal Mining Co., Ltd., Chifeng* 025420, *China*

Abstract: Hongling lead-zinc deposit is one of the representative large deposits in southeastern Inner Mongolia. Presently, there's very little research on geochemical characteristics and evolution of ore-form fluids, and ore genesis. The fluid inclusions are systemly researched in this paper, The results show that there are three types of primary fluid inclusions in garnet of garnet-skarn stage (Ⅰ) including halite-bearing three-phase, aqueous two-phase as well as vapor-rich two-phase; there are two types of primary fluid inclusions in quartz of stage (Ⅱ) including aqueous two-phase as well as vapor-rich two-phase. It is found in our microthermometric study that the ore-forming fluid is of high temperature, high salinity and immiscible $NaCl-H_2O$ type solutions and the boiling process plays important role in the precipitation of Pb, Zn, and Cu. Quartz of mineralization stage Ⅲ to Ⅳ of quartz-sulfide epochs contains only aqueous two-phase of fluid inclusions. The homogenization temperature of this type of fluid inclusions is obviously lower than that of skarn epoch, while the salinity does not obviously change. The homogenization temperatures of fluid inclusions show a rising trend with salinities displaying a dropping trend of stage Ⅳ, and it may be caused by adding of high temperature, low salinity type fluid. The dropping of homogenization temperatures and salinities of ore-forming fluids from mineralization stages Ⅴ to Ⅵ suggests that meteoric water contin-

基金项目:中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室开放课题基金项目(No. GPMR201307).
作者简介:李剑锋(1986—),男,博士研究生,主要从事热液矿床成矿理论方面的研究. E-mail: 317649474@qq.com
* **通讯作者**:王可勇,E-mail: wangky@jlu.edu.cn

引用格式:李剑锋,王可勇,陆继胜,等,2015.内蒙古红岭铅锌矿床成矿流体地球化学特征及矿床成因.地球科学——中国地质大学学报,40(6):995—1005.

uously joining into the ore-forming fluid. Overall, the ore-forming fluids of quartz-sulfide epoch is of medium-low temperature and low salinity NaCl-H_2O type solutions. C, H, O isotope study of fluid inclusions shows that the ore-forming fluids of skarn epoch mainly came from magmatic water and that of quartz-sulfide epoch came from mixed magmatic water and meteoric water, whereas at the latest stage of mineralization, the ore-forming fluids mainly came from meteoric water. The study of S, Pb isotopes implies that the ore-forming materials posed a deep source feature.

Key words: Hongling Pb-Zn deposit; ore-forming fluid; geochemistry; ore deposits; southeastern of Inner Mongolia.

红岭铅锌矿床位于赤峰市巴林左旗境内,是内蒙古东南部的大型代表性矿床之一. 1977—1979 年,内蒙古自治区一一二地质队在对 C-75-195 号航磁异常进行Ⅰ级查证时,发现了浩布高多金属矿床,为开展找矿工作提供了理论依据;1987—1992 年,内蒙古自治区一一五地质队对其展开详查工作,控制了矿体的规模及产状、形态与品位的变化;并对矿体进行了合理圈定及储量计算工作. 2010 年 3 月对浩布高多金属矿床进行产权转让,山东黄金集团有限公司取得 90%产权,后重组成立内蒙古赤峰红岭有色矿业有限责任公司并将其更名为红岭铅锌矿. 目前,学者们对该矿床地质特征、稳定同位素地球化学、成矿作用等多方面进行了较深入的研究,提出了主要金属元素的水平、垂直分带以及铅锌矿体的指示元素组合(白大明和刘光海,1996;白大明等,2011);花岗岩体侵入时受到循环天水的蚀变作用,引起了本区花岗岩体氧同位素的改变和矽卡岩矿床的形成(王莉娟等,2004);成矿物质来源于深源岩浆,成岩与成矿具相同来源(要梅娟等,2012)等认识. 这些研究成果对红岭铅锌矿的基础地质研究起到一定的促进作用;但到目前为止,对该矿床成矿流体地球化学特征、性质及演化问题尚缺乏系统研究. 本文通过对矿区不同成矿阶段样品开展流体包裹体岩相学、显微测温及包裹体 C、H、O 同位素研究,结合矿床硫、铅同位素分析,探讨了矿床成矿流体地球化学特征、来源及其演化特征,据此分析和总结了矿床成因问题.

1 矿床地质特征

1.1 矿区地质

红岭铅锌矿床位于内蒙古赤峰市巴林左旗,为内蒙古东南部黄岗梁—甘珠尔庙多金属成矿带内大型代表性矿床之一. 矿区出露地层以中二叠统大石寨组和上侏罗统满克头鄂博组为主(图 1). 大石寨组为浅海相火山沉积—正常沉积建造,主要岩性有泥质、粉砂质板岩夹大理岩、变质砂岩及火山角砾熔岩等;主要分布于矿区中部,呈北东向带状展布;满克头鄂博组整体上为一套酸性火山—沉积地层,主要岩性有流纹质岩屑晶屑含角砾熔岩、角砾熔岩等,分布于矿区东部.

矿区内褶皱及断裂构造发育,主要褶皱构造为

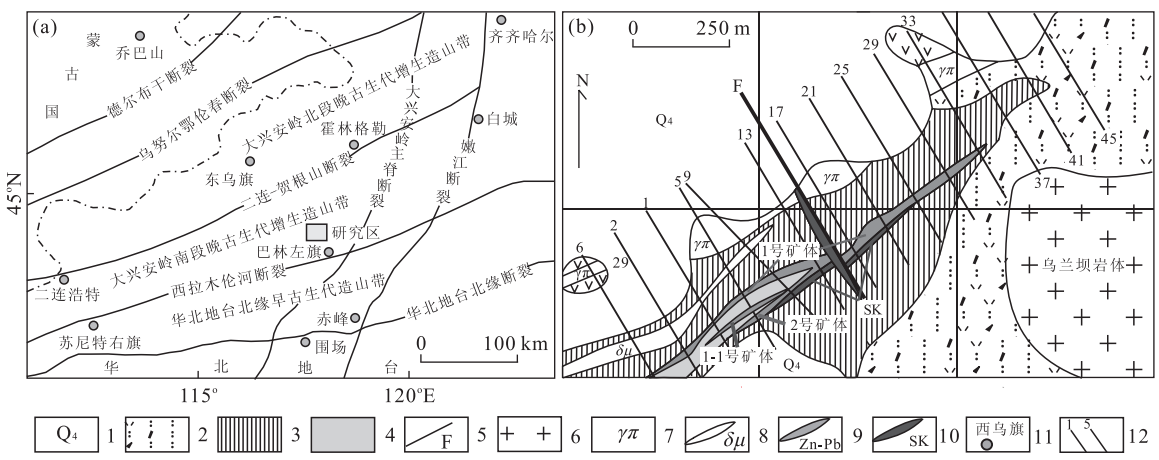

图 1 红岭铅锌矿区大地构造位置(a)及矿床地质图(b)

Fig. 1 Tectonic location and deposit geology of Hongling Pb-Zn district

引自万多等,2014. 1. 第四系;2. 上侏罗统满克头鄂博组;3. 中二叠统大石寨组砂岩、粉砂岩、板岩等;4. 中二叠统大石寨组大理岩;5. 断层;6. 晚侏罗世中粗粒花岗岩;7. 花岗斑岩脉;8. 闪长玢岩脉;9. 铅锌矿体;10. 矽卡岩;11. 地名;12. 勘探线

浩布高背斜,区内仅出露南东翼,其核部由大石寨组安山岩构成,翼部由大石寨组泥质板岩夹大理岩透镜体、粉砂质板岩和变质砂岩组成. 背斜轴总体倾向 NW,其产状:300°∠70°～80°. 南东翼上部被中生代晚侏罗世满克头鄂博组火山碎屑岩覆盖,二者呈角度不整合接触;褶皱西延部分被第四系沉积物覆盖. 矿区断裂构造依走向分为 EW 向、NE 向及 NW 向 3 组,其中 NE 向断裂是该区主要的控矿构造,NW 向断裂由于穿切破坏了矿脉,故多为成矿后构造.

矿区出露主要侵入体为呈岩株产出的乌兰坝岩体,其主体岩性为中粗粒花岗岩;笔者对其采用 LA-ICP-MS 测得锆石 U-Pb 年龄为 144.1±1.5 Ma(未发表数据). 岩石新鲜面呈浅肉红色,岩石为花岗结构,块状构造;岩石由碱性长石、斜长石、石英和角闪石组成,它们在斑晶中的含量分别为 50%±、20%±、25%±和 5%±. 碱性长石为半自形－他形板状结构,粒径以 1.5～3.5 mm 居多;岩石中多为钾长石,少数为条纹长石,含量分别为碱性长石的 75%±和 25%±;其具强高岭土化. 斜长石半自形板状结构,粒径差别较大,粒径一般为 1.0～1.5 mm,具弱绢云母化. 石英他形粒状结构,粒径以 1.0～1.5 mm 为主. 角闪石半自形柱状结构,粒径一般为 1.0～1.5 mm,具强褐铁矿化和弱绿泥石化. 此外,矿区还发育数条 NE 走向的花岗斑岩脉和闪长玢岩.

1.2　矿化特征

红岭铅锌矿床是一个以锌为主,铅、铜和铁为辅,伴有银、锡等有益元素的大型多金属矿床. 矿床产于乌兰坝岩体与二叠系大石寨组接触带上,矿带沿大石寨组大理岩层分布,呈北东 60°方向展布,倾向 NW,倾角较陡. 矿体呈层状、似层状产出,沿地层中的大理岩层位分布,大理岩层的上、下底板岩性均为粉砂质板岩. 矿带北东侧因大理岩较薄,被完全交代,形成一条矿体;而南西侧因大理岩增厚,故热液沿其顶底板及层间交代,矿体形成分枝. 顶板矿体称为 2 号矿体,底板矿体称为 1 号矿体,其层间矿体称为 1-1 号矿体(图 1b). 矽卡岩化为区内最重要的蚀变类型,该矿床主要工业矿体均产在矽卡岩中,包括石榴石矽卡岩及透辉石矽卡岩;次要蚀变类型有绿泥石化、碳酸盐化和萤石化.

红岭铅锌多金属矿区的矿石类型以块状硫化物型为主(图 2),主要金属矿物组合为闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、磁铁矿、磁黄铁矿和锡石;脉石矿物主要有钙铝榴石、钙铁榴石、钙铁辉石、锰钙铁辉石、透辉石、透闪石、黑柱石、方解石等. 常见的矿石结构有半自形－他形粒状结构、交代残骸结构、交代溶蚀结构、固溶体分离结构、交代残余结构、填隙结构、碎裂结构等;常见的矿石构造有:块状构造、条带状构造、角砾状构造、脉状构造、梳状构造等.

根据矿物共生组合及矿脉之间的穿切关系,结

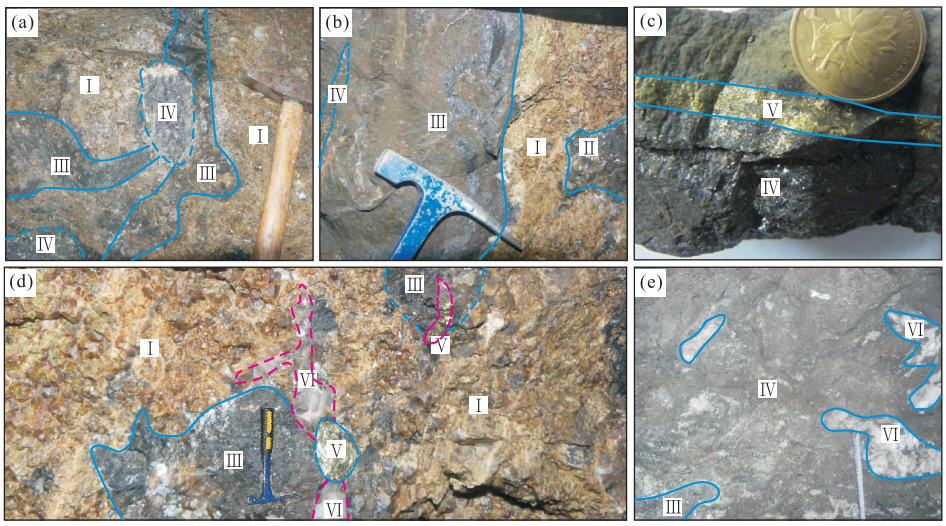

图 2　红岭铅锌矿床不同成矿阶矿脉穿切关系

Fig. 2　Photographs of different stages sample in Hongling Pb-Zn polymetallic deposit

Ⅰ. 石榴石－矽卡岩阶段;Ⅱ. 磁铁矿－石英阶段;Ⅲ. 方铅矿－闪锌矿±黄铁矿－石英阶段;Ⅳ. 闪锌矿－黄铜矿－方铅矿－方解石阶段;Ⅴ. 方铅矿－黄铜矿－方解石阶段;Ⅵ. 晚期方解石阶段;a. Ⅲ阶段矿脉沿裂隙充填于Ⅰ阶段矽卡岩之中,而Ⅳ阶段明显破坏了前者;b. Ⅱ阶段充填于Ⅰ阶段石榴石－矽卡岩之中,Ⅳ阶段矿脉穿切Ⅲ阶段矿脉;c. Ⅴ阶段穿切Ⅳ阶段矿脉;d. 根据矿脉间穿切关系判断从早到晚依次为Ⅰ、Ⅲ、Ⅴ、Ⅵ阶段;e. Ⅵ阶段方解石穿切Ⅳ阶段矿体

合详细的室内岩、矿鉴定工作，可将本矿床划分为 2 个成矿期，即矽卡岩期和石英－硫化物期. 前者细分为石榴石－矽卡岩阶段(Ⅰ)和磁铁矿－石英阶段(Ⅱ)(图 2a，2b，2d)；后者进一步分为方铅矿－闪锌矿±黄铁矿－石英阶段(Ⅲ)、闪锌矿－黄铜矿－方铅矿－方解石阶段(Ⅳ)、方铅矿－黄铜矿－方解石阶段(Ⅴ)及晚期方解石阶段(Ⅵ)(图 2)；其中，Ⅲ阶段为红岭铅锌矿床主成矿阶段.

2 流体包裹体研究

本次工作在矿区巷道、岩心选取代表性样品共 40 件，其中矽卡岩期样品 10 件，石英－硫化物期样品 30 件. 将上述样品磨制成厚约 0.2 mm 的测温片，对矿物中发育的流体包裹体特征进行系统研究. 流体包裹体岩相学及显微测温工作在吉林大学地球科学学院地质流体实验室完成，使用仪器为英国 Linkam THMS-600 型冷热两用台，测温精度 <31 ℃时为±0.1 ℃，>31 ℃时为±2 ℃.

2.1 流体包裹体岩相学

流体包裹体镜下研究表明，本次研究的矽卡岩期和石英－硫化物期样品中原生流体包裹体均较为发育，但类型有所不同，依室温下的相态特征可划分为含 NaCl 子矿物三相(SL)、气相－富气相(LV)及气液两相(VL)3 种类型的原生流体包裹体，同类包裹体在大小、形态、产状及相态特征等各方面相近，现一并描述如下：

(1)含 NaCl 子矿物三相流体包裹体(SL)：该类包裹体仅在石榴石颗粒中普遍发育，大小一般 4～15 μm，形态以椭圆形、不规则四边形及长条形为主；室温下，其由气相、液相及固体子矿物相构成，子矿物主要呈较完好的立方体晶形，颜色一般无色或略具淡绿色，据其晶形特点推断主要为 NaCl 子矿物，其所占比例一般为 10%～40%，多数集中在 15%～25%. 该类包裹体气液比一般为 20%～30%，多数包裹体气液比为 25%±. 在石榴石颗粒中，该类包裹体多随机或成群发育，因此多数属原生成因流体包裹体(图 3a～3c).

(2)气相－富气相包裹体(LV)：该类包裹体在矽卡岩－石榴石阶段和磁铁矿－石英阶段样品中较为发育，大小一般为 5～20 μm，形态以次圆状、椭圆形等为主；室温下，其主要呈单一气相形式或气液两相，但气液比较大，一般为 55%～90%，镜下该类包裹体颜色普遍偏暗. 在矿物颗粒中，大部分此类包裹体随机或与另两类包裹体成群分布，多数此类包裹体具原生成因特点(图 3c～3e).

(3)气液两相包裹体(VL)：该类包裹体在所有样品中均广泛发育，大小一般为 5～25 μm，形态一般呈椭圆形、方形、长条形及不规则状等；室温下，其主要由气相及液相两相构成，多数包裹体气液比较为接近，为 10%～40%，少量偏高，达 45%～50%；在矿物颗粒中，该类包裹体多随机或与另两类包裹体成群分布，显示出原生包裹体成因特征(图 3a～3i).

2.2 流体包裹体显微测温

根据 Roedder(1984)提出的包裹体成因类型判别标准，红岭铅锌矿床不同成矿阶段矿物中均发育原生、次生及假次生多种类型包裹体，但根据研究需要，本文仅对原生包裹体进行测温学研究. LV 和 VL 型包裹体冰点温度的获得方式为：将温度迅速降低至－100 ℃，直至包裹体完全冻结；然后缓慢加热回温至最后一块冰融化而获得. 包裹体测温数据处理利用 MacFlincor 计算程序完成(Brown and Hagemann，1995)；测试及计算结果见表 1 和图 4.

矽卡岩期：石榴石中发育 SL、LV 及 VL 共 3 种类型包裹体，SL 型包裹体在升温过程中表现出 3 种均一行为：一类包裹体子矿物先于气相消失，而后通过气液均一而达到均一；另一类包裹体气相先于子矿物消失，而后通过子矿物消失而达到均一；还有一类包裹体气相与子矿物近于同时消失；几乎所有该类包裹体都均一至液相，均一温度为 384～403 ℃，子矿物熔化温度为 251～315 ℃，据此计算流体包裹体盐度为 35%～39% NaCl equiv.，流体密度为 1.09～1.10 g·cm^{-3}. VL 型包裹体在冷冻－升温过程中，测得冰点温度为－5.4～－8.9 ℃，据此计算盐度值为 8%～12.7% NaCl equiv.；均一温度为 329～421 ℃，据均一温度及盐度值，计算流体密度为 0.63～0.79 g·cm^{-3}. LV 型包裹体在升温过程中多均一至气相，冰点温度为－2.9～－4.6 ℃，据此计算盐度值为 5.3%～7.3% NaCl equiv.；均一温度为 354～414 ℃，据均一温度及盐度值，计算流体密度为 0.50～0.71 g·cm^{-3}. Ⅱ阶段石英中发育 LV 和 VL 两种类型包裹体，LV 型包裹体冰点温度为－3.2～－6.9 ℃，据此计算盐度值为 5.2%～10.4% NaCl equiv.；均一温度为 308～439 ℃，据均一温度及盐度值，计算流体密度为 0.77～0.85 g·cm^{-3}. VL 型包裹体冰点温度为－6.2～－10.9 ℃，据此计算盐度值为 9.5%～14.4% NaCl equiv.；均一温度为 284～365 ℃，据均一温度

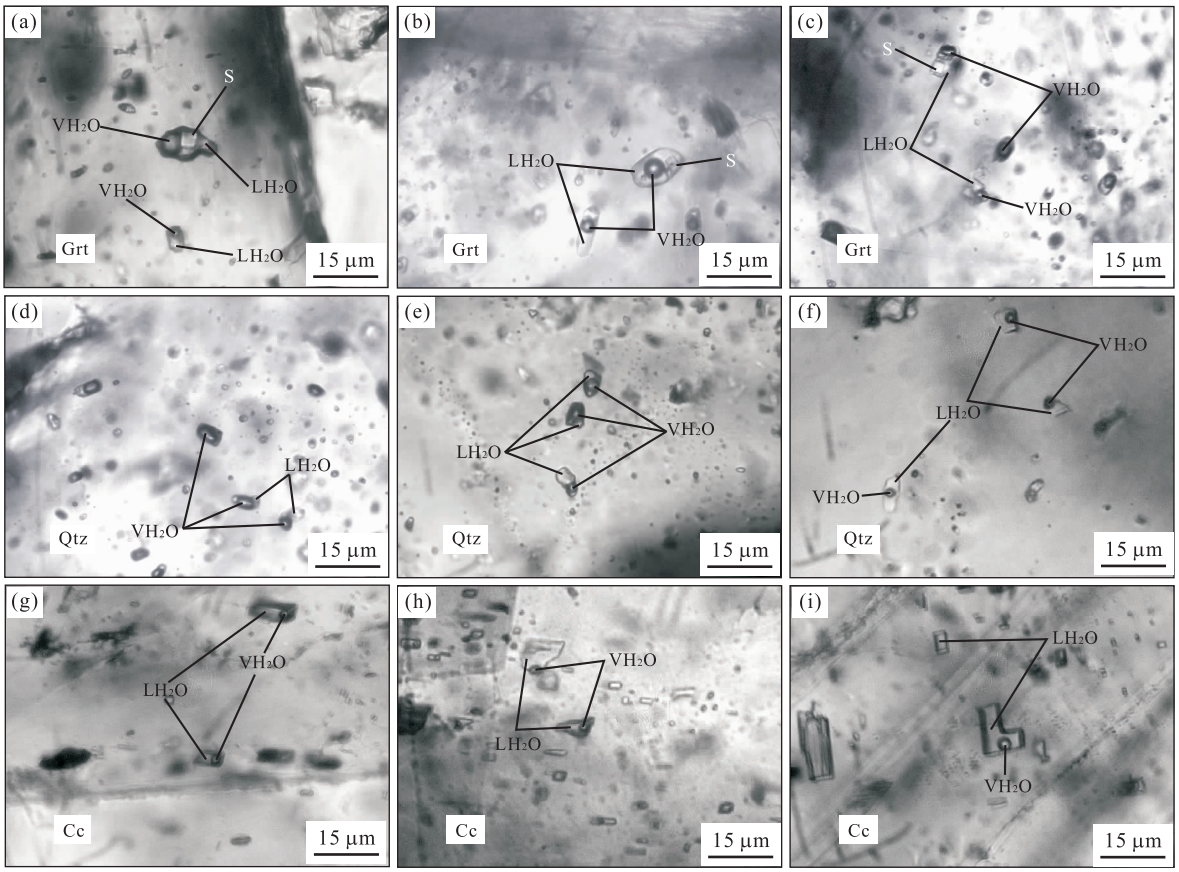

图 3　红岭铅锌矿床流体包裹体显微照片

Fig. 3　Photographs of fluid inclusions of Hongling Pb-Zn deposit

S. NaCl 子矿物;LH_2O. 液态水;VH_2O. 气态水;Grt. 石榴石;Qtz. 石英;Cc. 方解石;a～c. 石榴石－矽卡岩阶段;d～e. 磁铁矿－石英阶段;f. 方铅矿－闪锌矿±黄铁矿阶段;g. 黄铜矿－方铅矿－闪锌矿阶段;h. 方铅矿－闪锌矿－黄铜矿－方解石阶段;i. 晚期方解石阶段

表 1　不同类型岩、矿石透明矿物中流体包裹体测温结果

Table 1　The microthermometric results of fluid inclusions in quartz of different metallogenic stages

矿化阶段	包裹体类型(数量)	大小(μm)	气液比(%)	子矿物比例(%)	冰点温度(℃)	均一温度(℃)	子矿物熔化温度(℃)	盐度(%NaCl equiv.)	密度(g·cm^{-3})
Ⅰ	SL(7)	9～15	20～30	15～25		384～403	251～315	35.0～39.0	1.09～1.10
	LV(13)	7～20	55～90		−2.9～−4.6	354～414		5.3～7.3	0.50～0.71
	VL(27)	5～25	20～45		−5.4～−8.9	329～421		8.0～12.7	0.63～0.79
Ⅱ	LV(4)	8～10	55～75		−3.2～−6.9	308～439		5.2～10.4	0.77～0.85
	VL(36)	6～20	20～45		−6.2～−10.9	284～365		9.5～14.9	0.80～1.05
Ⅲ	VL(30)	5～28	10～40		−6.5～−8.8	178～266		9.5～12.6	0.86～0.98
Ⅳ	VL(15)	8～15	20～40		−2.9～−4.1	286～355		4.7～6.5	0.66～0.80
Ⅴ	VL(30)	5～25	10～40		−1.2～−4.2	145～265		2.0～6.7	0.84～0.94
Ⅵ	VL(6)	5～10	5～10		−0.7～−1.7	112～162		1.2～2.8	0.93～0.96

及盐度值,计算流体密度为0.80～1.05 g·cm^{-3}.

石英硫化物期:Ⅲ阶段石英和Ⅳ～Ⅵ阶段方解石中均主要发育 VL 型包裹体,激光拉曼分析表明,其成分以水为主,仅含微量的 CO_2. 在冷冻－升温过程中,测得该类包裹体冰点温度分别为－6.5～－8.8 ℃、－2.9～－4.1 ℃、－1.2～－4.2 ℃和－0.7～－1.7 ℃,据此计算盐度值分别为 9.5%～12.6% NaCl equiv.、4.7%～6.5% NaCl equiv.、2%～6.7% NaCl equiv. 及 1.2%～2.8% NaCl equiv.;均一温度分别为 178～266 ℃、286～355 ℃、145～265 ℃和 112～162 ℃,据均一温度及盐度值,计算流体密度依次为 0.86～0.98 g·cm^{-3}、0.66～0.80 g·cm^{-3}、0.84～0.94 g·cm^{-3}及 0.93～0.96 g·cm^{-3}.

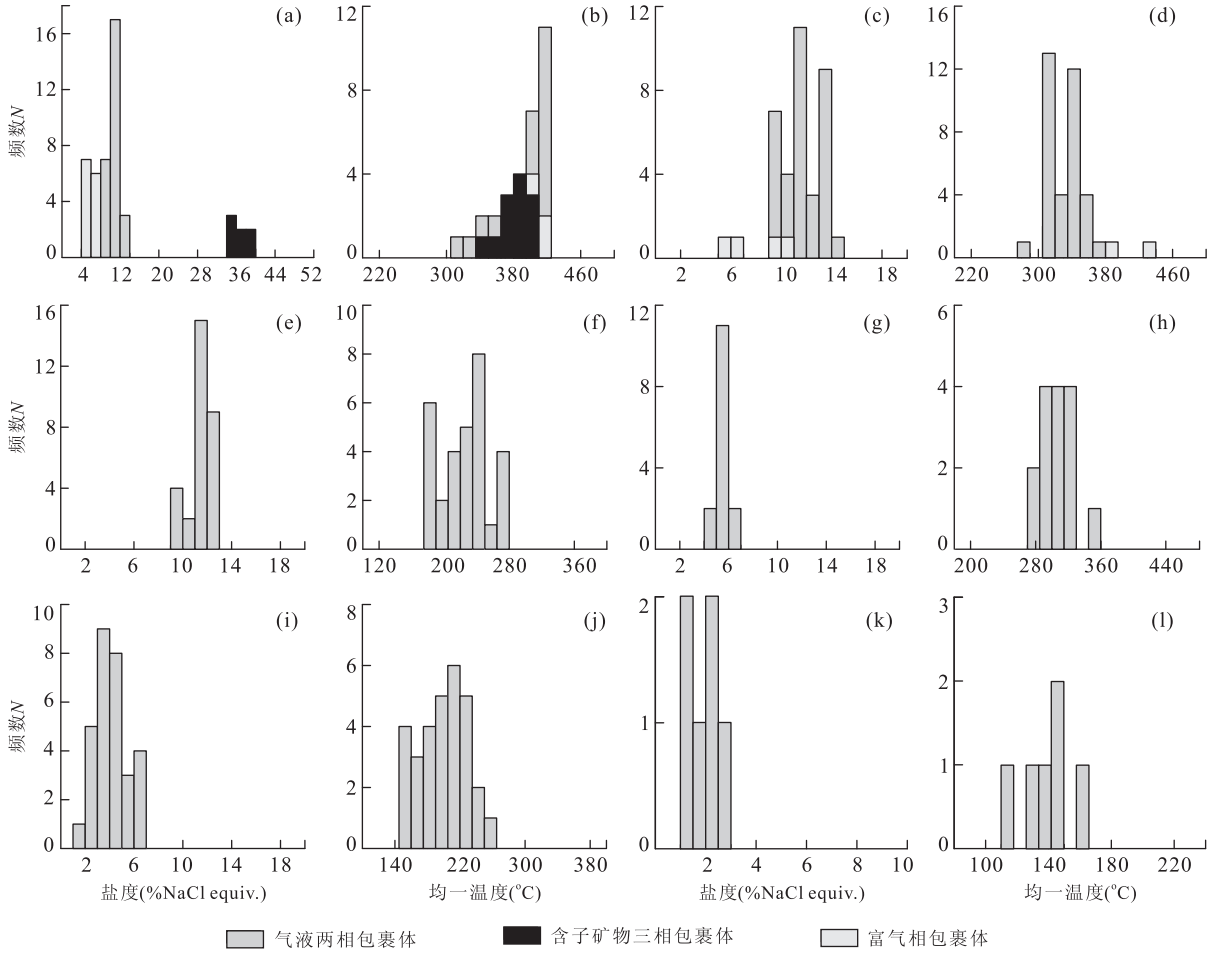

图 4 红岭铅锌多金属矿区不同成矿阶段流体包裹体均一温度、盐度直方图

Fig. 4 The histograms of homogeneous temperature and salinity of different stages of fluid inclusions in Hongling Pb-Zn ore district

a～b. Ⅰ阶段;c～d. Ⅱ阶段;e～f. Ⅲ阶段;g～h. Ⅳ阶段;i～j. Ⅴ阶段;k～l. Ⅵ阶段

3 矿床成因讨论

3.1 成矿流体来源分析

为探讨红岭铅锌矿床成矿流体来源,本文对矿区Ⅱ、Ⅳ及Ⅴ成矿阶段中矿物流体包裹体进行碳、氢、氧同位素分析. 样品分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成,采用 MAT253EM 质谱仪进行测试分析,碳和氧同位素的分析精度为±0.2‰,氢同位素的分析精度为±2‰;$\delta^{13}C$ 以 V-PDB为标准,δD 和 $\delta^{18}O$ 以 SMOW 为标准,结果见表 2. 计算石英和方解石单矿物中流体包裹体 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 时,分别根据 Clayton *et al*. (1972)公式:$10^3\ln\alpha_{V\text{-}SMOW\text{-}H_2O}=3.38\times10^6/T^2-2.9$ 和 O'Neil *et al*. (1969)公式:$10^3\ln\alpha_{V\text{-}SMOW\text{-}H_2O}=2.78\times10^6/T^2-2.89$ 计算.

众所周知,绝大多数地质过程都离不开流体的参与,而研究成矿流体的来源与演化是氢、氧等稳定同位素地球化学的特长(郑永飞和陈江峰,2000; Deng *et al*., 2009). 此次所取样品的 $\delta D_{H_2O\text{-}SMOW}$ 值分布于-125.5‰～-144.1‰之间;Ⅱ阶段流体 $\delta D_{H_2O\text{-}SMOW}$ 值更接近于初始岩浆水的氢同位素组成,Ⅱ→Ⅳ→Ⅴ阶段流体 $\delta D_{H_2O\text{-}SMOW}$ 值依次降低,其原因可能如下:(a)在成矿作用中,流体与围岩发生水-岩作用,影响着热液体系的氢同位素平衡(杨利亚等,2013);(b)围岩地层中有机质的存在导致了流体体系 $\delta D_{H_2O\text{-}SMOW}$ 值的降低(郑永飞和陈江峰,2000);(c)氢同位素会因压力变化而产生动力学分馏(Driesner, 1997; Horita *et al*., 1999). 在 $\delta^{18}O_{H_2O\text{-}SMOW}$-$\delta D_{V\text{-}SMOW}$ 组成图解中(图 5a),红岭铅锌矿床Ⅱ阶段流体 $\delta^{18}O_{H_2O\text{-}SMOW}$ 值为 2.45‰～2.65‰之间,接近张理刚(1985)提出的金铜系列岩浆水范围范围;王莉娟等(2004)测得乌兰坝岩体全岩 $\delta^{18}O_{H_2O\text{-}SMOW}$ 值分布范围是 1.38‰～4.78‰,与Ⅱ阶段流体氧同位素组成相近,暗示着二者可能具有成

表 2　研究区流体包裹体碳、氢、氧同位素分析结果

Table 2　The analysized results of carbon, hydrogen and oxygen isotopes of fluid inclusions

成矿阶段	$\delta^{18}O_{q\text{-}SMOW}$(‰)	$\delta D_{H_2O\text{-}SMOW}$(‰)	$\delta^{13}C_{v\text{-}PDB}$(‰)	均一温度(℃)	$\delta^{18}O_{H_2O\text{-}SMOW}$(‰)
Ⅱ	5.7	−127.3	−5.0	400	2.45
	5.9	−130.5	−5.8	400	2.65
Ⅳ	−2.0	−125.5	−9.7	300	−7.58
	4.1	−132.2	−5.8	300	−1.48
Ⅴ	0.5	−136.0	−7.2	200	−9.04
	−4.8	−144.1	−10.2	200	−14.34

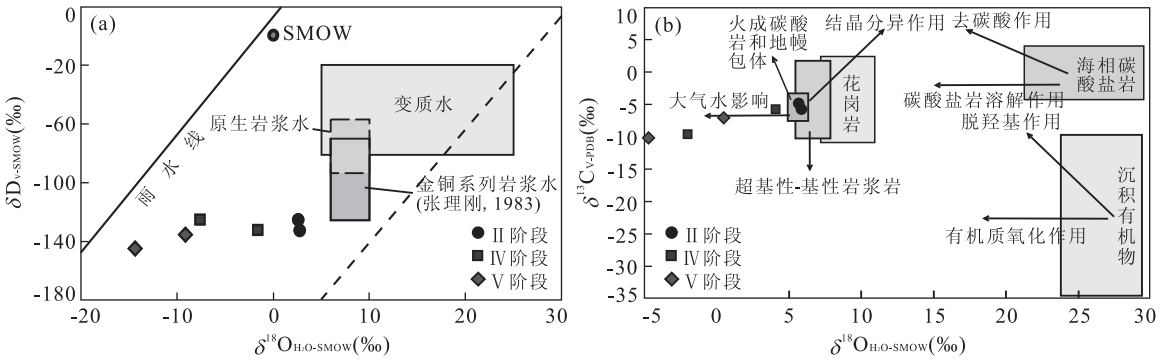

图 5　流体包裹体氢—氧同位素(a)和碳—氧同位素(b)组成图解

Fig. 5　The composition of hydrogen-oxygen isotope (a) and composition of carbon-oxide isotope (b) of fluid inclusions

图 a 底图据张理刚,1985;图 b 据张瑞斌等,2003

因联系. Ⅱ→Ⅳ→Ⅴ阶段成矿流体 $\delta^{18}O_{H_2O\text{-}SMOW}$ 值依次降低,愈晚愈靠近大气降水线,该演化趋势系为大气降水影响的结果,也与成矿温度的取值有关(张理刚,1985). 上述分析结果表明红岭铅锌矿床的成矿流体源于由岩浆水与大气降水两个端元组成的混合流体,早期流体以岩浆水为主,仅有少量大气降水参与;从早至晚,大气降水的贡献逐渐增强,至晚期成矿流体逐渐演化为以大气降水为主.

镜下观测表明,红岭铅锌矿区没有含 CO_2 及纯 CO_2 包裹体,但这并不代表成矿流体中绝对没有 CO_2 的存在,只是成矿流体中 CO_2 成分含量较低,未能不混溶形成独立相. 由于不同地质体或碳储库的 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值差别较大,使得碳同位素能够成为示踪流体来源的重要手段之一(李晶等,2007). 目前,多数学者认为热液中 CO_2 有 3 种来源:岩浆来源或地幔射气、沉积碳酸盐岩和地层有机质,它们的 $\delta^{13}C_{v\text{-}PDB}$ 值变化范围分别是−3‰～−9‰、−5‰～−7‰,0.5‰和−27‰(李晶等,2007). 本次所测样品的 $\delta^{13}C_{v\text{-}PDB}$ 值分布区间为−5.0‰～ −10.2‰,由Ⅱ→Ⅳ→Ⅴ阶段 $\delta^{13}C_{v\text{-}PDB}$ 值有逐渐降低的趋势;暗示着红岭铅锌矿床成矿流体早期碳源应为岩浆来源、幔源或二者兼有,而晚期的碳同位素漂移系为流体与大石寨组中有机质物质交换,达到碳同位素平衡导致. 在碳—氧同位素组成图解中(图 5b),Ⅱ阶段样品落入火成碳酸盐和地幔包体区域内,Ⅳ、Ⅴ阶段样品明显受到大气降水的影响,亦证实大气降水对成矿的贡献;虽然大气降水本身不能影响流体的碳同位素组成,但它可以作为溶剂萃取围岩中的有益物质,同时促进水—岩之间的 C、H、O 同位素平衡.

3.2　成矿流体地球化学性质

流体包裹体岩相学及显微测温研究结果显示,红岭铅锌多金属矿床Ⅰ阶段石榴石中发育 SL、LV 及 VL 共 3 种类型的原生流体包裹体,在石榴石颗粒中常见 3 类包裹体共生发育的现象(图 3a～3c),且共生的 LV 及 VL 型包裹体均一温度变化范围相近,前者均一至气相,后者均一为液相;SL 型包裹体表现出 3 种均一方式,尤其存在着较多的子矿物和气泡同时均一于液相的包裹体,上述特征表明成矿流体为中—高温、高盐度的不混溶 $NaCl\text{-}H_2O$ 体系热液(Roedder, 1984; Drummond and Ohmoto, 1985;王可勇等,2010). Ⅱ阶段中石英颗粒主要发育 LV 和 VL 两种类型的原生流体包裹体(图 3d～3e),前者均一至气相,后者均一为液相,其均一温度、盐度较矽卡岩期均有所降低,为中—高温、中等盐度的不均匀 $NaCl\text{-}H_2O$ 体系热液. Ⅰ阶段→Ⅱ阶

段，SL 型包裹体消失，暗示着流体体系内盐度明显降低，可能是角闪石、透闪石、绿帘石等含 Cl 矿物的吸收作用的结果(赵一鸣等，1980)；LV 及 VL 型包裹体均一温度、盐度参数略有降低，密度略显增大，反映了以单一岩浆热液来源为主的成矿流体所经历的自然冷却降温、沸腾作用及矿质沉淀过程.

Ⅲ→Ⅵ阶段，石英颗粒中主要发育较单一的 VL 型包裹体(图 3)，并均一至液相. 其中，Ⅲ阶段热液继承Ⅱ阶段成矿流体，表现为热液体系盐度无明显变化、均一温度进一步降低；Ⅲ→Ⅳ阶段，成矿流体温度由 178～266 ℃升高至 286～355 ℃，且盐度明显降低，表明有新的高温、低盐度的流体加入成矿体系中，对早期的流体有升温和稀释盐度的作用. Ⅳ→Ⅴ→Ⅵ阶段成矿流体均一温度及盐度依次降低，体现了一种不断与外来天水混合的演变趋势；随着温度的降低，成矿物质依次沉淀. 整体而言，Ⅲ→Ⅵ阶段成矿流体为中低温、低盐度 $NaCl\text{-}H_2O$ 型与大气降水混合来源热液，这与包裹体 C、H、O 同位素分析结果完全吻合.

3.3 成矿物质来源示踪

硫是 Cu、Pb、Zn 等亲硫元素沉淀形成硫化物矿床的主要矿化剂，硫同位素组成是推断成矿物质来源和成矿过程的主要依据之一(陈永清等，2009). 本次工作对红岭矿区不同成矿阶段矿石硫化物硫同位素结果列于表 3，所有样品 $\delta^{34}S_{CDT}$ 值介于－2.7‰～－1.1‰之间；其中，黄铜矿取自Ⅳ阶段，方铅矿和闪锌矿取自Ⅲ阶段. 结合前人数据得出：红岭铅锌矿床 2 件毒砂样品 $\delta^{34}S_{CDT}$ 值介于－0.5‰～0.5‰之间，2 件磁黄铁矿样品 $\delta^{34}S_{CDT}$ 值在－0.5‰～1‰之间，5 件黄铜矿样品 $\delta^{34}S_{CDT}$ 值介于－1.5‰～1.8‰之间，19 件闪锌矿样品中有 18 件样品 $\delta^{34}S_{CDT}$ 值在 0.4‰～－3.8‰之间，20 件方铅矿 $\delta^{34}S_{CDT}$ 值介于－0.5‰～－8.0‰之间. 黄铜矿样品 $\delta^{34}S_{CDT}$ 值高于闪锌矿，这与它们并非共生矿物的地质事实相符. 除黄铜矿外，所取样品 $\delta^{34}S_{CDT}$ 值随硫化物生成顺序由早到晚依次降低，表明铅锌主矿化阶段形成时处于大范围内相对稳定均一的热液环境，体现平衡条件下的分馏结晶特征.

一般认为，$\delta^{34}S_{CDT}$ 有地幔硫、现代海水硫和沉积(还原)硫 3 种不同的来源(郑永飞和陈江峰，2000). 源自上地幔的基性－超基性岩 $\delta^{34}S_{CDT}$ 值接近 0±3‰；中酸性岩浆岩 $\delta^{34}S_{CDT}$ 值多介于－13.4‰～26.7‰之间；变质岩 $\delta^{34}S_{CDT}$ 值整体大约为－20‰～20‰；沉积岩 $\delta^{34}S_{CDT}$ 值差别非常大，常见的正负极值均见于沉积岩(陕亮等，2009). 根据上段总结的分析结果可知，红岭铅锌矿床 $\delta^{34}S_{CDT}$ 值介于－8.0‰～1.9‰之间变异系数低；硫同位素分布具明显塔式效应，其峰值靠近 0(图 6)，说明硫源较均一. 上述硫同位素特征显示出该矿床的硫源显然不符合基性－超基性岩和沉积岩的范畴；考虑到工区内几乎没有变质岩的出露，而矽卡岩型矿床的必备条件之一便是中酸性侵入体的存在，因此，区内的硫源应为深源岩浆.

表 3 红岭铅锌矿床硫同位素特征

Table 3 Sulfur isotope distribution of Hongling Pb-Zn deposit

样品号	测试内容	分析结果 $\delta^{34}S_{CDT}$(‰)
HL-1	黄铜矿	－1.1
HL-2	黄铜矿	－1.2
HL-3	黄铜矿	－1.6
HL-4	闪锌矿	－0.9
HL-5	闪锌矿	－1.4
HL-6	闪锌矿	－1.6
HL-7	方铅矿	－2.0
HL-8	方铅矿	－2.7
HL-9	方铅矿	－2.3

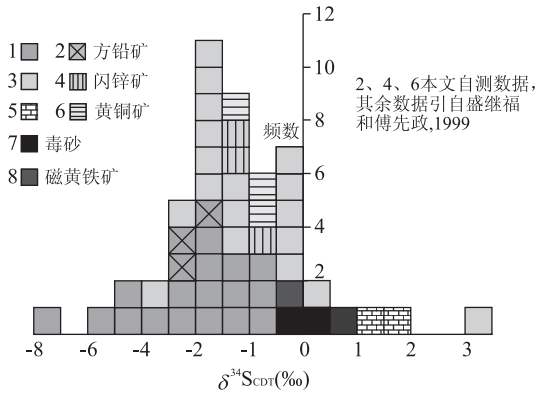

图 6 红岭铅锌矿床硫同位素组成直方图

Fig. 6 Distributions of the sulfur isotopic compositions from Hongling Pb-Zn deposit

内蒙古一一五地质队通过对研究区方铅矿和钾长石进行铅同位素分析表明(内蒙古一一五地质队，浩布高多金属矿详查地质报告，1992)，方铅矿 $^{206}Pb/^{204}Pb$、$^{207}Pb/^{204}Pb$ 和 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 3 个值的变化范围为 18.248 2～18.479 0、15.510 8～15.634 0 和 37.927 0～38.436 0；钾长石 $^{206}Pb/^{204}Pb$、$^{207}Pb/^{204}Pb$ 和 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 共 3 个值的变化范围集中在 18.215 1～18.563 2、15.492 0～15.605 9 和 13.125 8～38.501 4；在 $^{207}Pb/^{204}Pb$-$^{206}Pb/^{204}Pb$ 和 $^{208}Pb/^{204}Pb$-$^{206}Pb/^{204}Pb$ 构造环境判别图解中，所有

样品均落入上地幔和造山带铅的演化线附近,暗示着成矿物质源属壳幔混源性质.值得注意的是,中粗粒花岗岩中钾长石与方铅矿样品的分布范围几乎完全一致,说明二者可能具有相同的来源.

3.4　矿床成因

结合前面的讨论,可以对红岭铅锌多金属矿床的成因机制总结如下:中粗粒花岗岩侵位于地壳较浅部位,随着结晶作用分异出 NaCl-H_2O 体系流体;在熔体流体相分离的过程中,Cu、Fe、Zn、Pb 等元素优先进入卤水相(肖庆辉等,2002; Heinrich, 2007;冷成彪等,2009),出溶的流体渐变为富含有益元素的成矿流体.成矿流体因压力降低而发生沸腾作用,这也是导致铅锌等元素得以富集的重要机制(Reed and Spycher, 1985; Logan, 1999; Yao *et al*., 2001; Calagari, 2004; Zhou *et al*., 2007);当其遇到二叠系大石寨组大理岩即形成石榴石-矽卡岩的矿物组合,与石榴石颗粒中发育 SL、LV 及 VL 共 3 种类型的原生流体包裹体的事实相符合. Baker *et al*.(2004)在研究墨西哥 Bismark 矽卡岩型矿床时,利用质子诱发 X 射线(PIXE)精确测定了卤水、富气以及低盐度富液包裹体的成分,同时发现岩浆热液相分离形成的卤水和富气包裹体中 Pb、Zn 的浓度较高,晚期低盐度富液包裹体中 Cu、Zn、Pb 的浓度降低;进而他提出上述金属元素在热液中以 Cl^- 络合物的形式运移.红岭铅锌矿床Ⅰ→Ⅱ阶段成矿流体的盐度明显降低,Cl^- 含量的降低破坏了铅、锌等成矿元素的运载平衡,进而导致成矿物质沉淀卸载.到了Ⅳ阶段有新的高温、低盐度的流体加入成矿体系中;而Ⅳ→Ⅴ→Ⅵ阶段成矿流体均一温度及盐度依次降低,体现了一种不断与外来天水混合的演变趋势,随着温度的降低,成矿物质依次沉淀.

综上所述,红岭矿床成矿物质具深源特点;成矿流体源于由岩浆水与大气降水两个端元组成的混合流体,早期流体以岩浆水为主;至晚期成矿流体逐渐演化为以大气降水为主.成矿时代为燕山晚期(万多等,2014),矿床类型属矽卡岩型矿床.

4　结论

(1)按矿物组合差异及矿脉之间的穿切关系,可将成矿作用划为矽卡岩期和石英-硫化物期,前者进一步细分为石榴石-矽卡岩阶段(Ⅰ)和磁铁矿-石英阶段(Ⅱ),后者进一步划分为闪锌矿-方铅矿-石英阶段(Ⅲ)、闪锌矿-黄铜矿-方铅矿-方解石阶段(Ⅳ)、方铅矿-黄铜矿-方解石阶段(Ⅴ)及晚期方解石阶段(Ⅵ).

(2)区内矽卡岩期Ⅰ阶段石榴石中均发育 SL、LV 及 VL 共 3 种类型的原生流体包裹体,Ⅱ阶段中石英颗粒主要发育 LV 和 VL 两种类型的原生流体包裹体,石英-硫化物期Ⅲ→Ⅵ阶段透明矿物中均主要发育较单一的 VL 型包裹体.测温结果表明矽卡岩期成矿流体属中-高温较高盐度的不均匀热液体系.石英-硫化物期Ⅲ阶段成矿流体为中温、中等盐度的 NaCl-H_2O 体系热液;到了Ⅳ阶段有高温、低盐度的流体加入;Ⅴ→Ⅵ阶段热液体系均一温度及盐度逐渐降低.

(3)流体包裹体 C、H、O 同位素地球化学研究表明,红岭铅锌多金属矿床矽卡岩期成矿流体以岩浆水为主,至晚期成矿流体逐渐演化为以大气降水为主.矿床 S、Pb 同位素研究表明,区内成矿物质具深源特点.

References

Bai, D. M., Fu, G. L., Nei, F. J., et al., 2011. Integrated Ore-Prospecting Model for the Skarn Polymetallic Deposit in Southeastern Inner Mongolia. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(6): 1968-1976 (in Chinese with English abstract).

Bai, D. M., Liu, G. H., 1996. Application of Geologic, Geophysical, Geochemical Peospecting Method in the Haobugao Pb-Zn-Sn-Cu Polymetallic Deposit. *Geological Exploration for Non-Ferrous Metals*, 5(6): 361-367 (in Chinese with English abstract).

Baker, T., Van, A. E., Ryan, C. G., et al., 2004. Composition and Evolution of Ore Fluids in a Magmatic-Hydrothermal Skarn Deposit. *Geology*, 32 (2): 117-120.

Brown, P. E., Hagemann, S. G., 1995. MacFlincor and Its Application to Fluids in Archean Lode-Gold Deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59 (19): 3943-3952.

Calagari, A. A., 2004. Fluid Inclusion Studies in Quartz Veinlets in the Porphyry Copper Deposit at Sungun, East-Azarbaidjan, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(2): 179-189.

Chen, Y. Q., Huang, J. N., Lu, Y. X., et al., 2009. Geochemistry of Elements, Sulphur-Lead Isotopes and Fluid Inclusions from Jinla Pb-Zn-Ag Poly-Metallic Ore Field at the Joint Area across China and Myanmar Border. *Earth Science—Journal of China University of Geo-*

sciences, 34(4): 585－594 (in Chinese with English abstract).

Clayton, R. N., O'Neil, J. R., Mayeda, T. K., 1972. Oxygen Isotope Exchange between Quartz and Water. *Geophys. Res.*, 77: 3057－3067.

Deng, J., Yang, L. Q., Gao, B. F., et al., 2009. Fluid Evolution and Metallogenic Dynamics during Tectonic Regime Transition: Example from the Jiapigou Gold Belt in Northeast China. *Resource Geology*, 59 (2): 140－152.

Driesner, T., 1997. The Effect of Pressure on Deuterium-Hydrogen Fractionation in High-Temperature Water. *Science*, 277(5327): 91－794.

Drummond, S. E., Ohmoto, H., 1985. Chemical Evolution and Mineral Deposition in Boiling Hydrothermal Systems. *Econ. Geol.*, 80: 126－147.

Heinrich, C. A., 2007. Fluid-Fluid Interact Ions in Magmatic-Hydrothermal Ore Formation. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 65: 1－363.

Horita, J., Driesner, T., Cole, D. R., 1999. Pressure Effect on Hydrogen Isotope Fractionation between Brucite and Water at Elevated Temperatures. *Science*, 286(5444): 1545－1547.

Leng, C. B., Zhang, X. C., Wang, S. X., et al., 2009. Advances of Researches on the Evolution of Ore-Forming Fluids and the Vapor Transport of Metals in Magmatic-Hydrothermal Systems. *Geological Review*, 55 (1): 100－112 (in Chinese with English abstract).

Li, J., Chen, Y. J., Li, Q. Z., et al., 2007. Fluid Inclusion Geochemistry and Genetic Type of the Yangshan Gold Deposit, Gansu, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2144－2154 (in Chinese with English abstract).

Logan, M. A., 1999. Mineralogy and Geochemistry of the Gualilean Skarn Deposit in the Precordillera of Western Argentina. *Ore Geology Reviews*, 17: 113－138.

O'Neil, J. R., Clayton, R. N., Mayeda, T. K., 1969. Oxygen Isotope Fractionation in Divalent Metal Carbonates. *Journal of Chemical Physics*, 51(12): 5547－5558.

Reed, M. H., Spycher, N. F., 1985. Boiling, Cooling and Oxidation in Epithermal Systems: A Numerical Modeling Approach. *Reviews in Economic Geology*, 2: 249－272.

Roedder, E., 1984. Fluid Inclusions. Reviews in Mineralogy, 12. Book Crafters, Michigan.

Shan, L., Zheng, Y. Y., Xu, R. K., et al., 2009. Review on Sulfur Isotopic Tracing and Hydrothermal Metallogenesis. *Geology and Resources*, 18(3): 197－203 (in Chinese with English abstract).

Sheng, J. F., Fu, X. Z., 1999. Geological Setting and Copper-Polymetallic Deposits in the Central Part of the Da Hinggan Mountains. Seismological Press, Beijing (in Chinese).

Wan, D., Li, J. F., Wang, Y. C., et al., 2014. Re-Os Radiometric Dating of Molybdenite in Hongling Lead-Zinc Polymetallic Deposit, Inner Mongolia, and Its Significance. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(6): 687－695 (in Chinese with English abstract).

Wang, K. Y., Qing, M., Sun, F. Y., et al., 2010. Study on the Geochemical Characteristics of Ore-Forming Fluids and Genesis of Xiaoxinancha Gold-Copper Deposit, Jilin Province. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3727－3734 (in Chinese with English abstract).

Wang, L. J., Wang, J. B., Wang, Y. W., et al., 2004. Oxygen Isotope Characteristics of Granite Related to the Skarn Type Deposit in Eastevn Inner Mongolia—Taking Haobugao Deposit as an Example. *Geological Review*, (5): 513, 560 (in Chinese).

Xiao, Q. H., Deng, J. F., Ma, D. Q., et al., 2002. The Way of Investigation on Granitoids. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

Xiong, S. F., He, M. C., Yao, S. Z., et al., 2014. Compositions and Microthermometry of Fluid Inclusions of Chalukou Porphyry Mo Deposit from Great Xing'an Range: Implications for Ore Genesis. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(7): 820－836 (in Chinese with English abstract).

Yang, L. Y, Yang, L. Q., Yuan, W. M., et al., 2013. Origin and Evolution of Ore Fluid for Orogenic Gold Traced by D-O Isotopes: A Case from the Jiapigou Gold Belt, China. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 4025－4035 (in Chinese with English abstract).

Yang, Z. H., Wang, J. P., Liu, J. J., et al., 2012. Characteristics and Its Geological Significance of Fluid Inclusions of the Wurinitu W-Mo Deposit in Inner Mongolia, China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(6): 1268－1278 (in Chinese with English abstract).

Yao, M. J., Liu, J. J., Zhai, D. G., et al., 2012. Sulfur and Lead Isotopic Compositions of the Polymetallic Deposits in the Southern Daxing'anling: Implications for Metal Sources. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42 (2): 362－373 (in Chinese with English abstract).

Yao, Y., Murphy, P., Robb, L. J., 2001. Fluid Characteristics of Granitoid-Hosted Gold Deposits in the Birimian Terrane of Ghana: A Fluid Inclusion Microthermometric and Raman Spectroscopic Study. *Econ. Geol.*, 96(7):

1611－1643.

Zhang, L. G., 1985. The Application of the Stable Isotope to Geology. Shaanxi Science and Technology Press, Xi'an, 91－94 (in Chinese).

Zhang, R. B., Liu, J. M., Ye, J., et al., 2003. C & O Isotopic Geochemistry of Shouwangfen Copper Deposit, Hebei Province. *Mineral Resources and Geology*, 17(2): 122－126 (in Chinese with English abstract).

Zhao, Y. M., Tan, H. J., Yuan, R. G., et al., 1980. Discovery of the Cl-Bearing Amphibole in the Iron Skarn Deposits of Southwestern Fujian, and Its Geological Significance. *Geological Review*, 26(4): 300－306 (in Chinese).

Zheng, Y. F., Chen, J. F., 2000. Stable Isotope Geochemistry. Science Press, Beijing (in Chinese).

Zhou, T. F., Yuan, F., Yue, S. C., et al., 2007. Geochemistry and Evolution of Ore-Forming Fluids of the Yueshan Cu-Au Skarn and Vein-Type Deposits, Anhui Province, South China. *Ore Geology Reviews*, 3: 279－303.

附中文参考文献

白大明,付国立,聂风军,等,2011. 内蒙古东南部矽卡岩型金属矿床的综合找矿模式. 吉林大学学报(地球科学版), 41(6): 1968－1976.

白大明,刘光海,1996. 浩布高铅锌铜锡矿床地物化综合找矿模式探讨. 有色金属矿产与勘查,5(6): 361－367.

陈永清,黄静宁,卢映祥,等,2009. 中缅毗邻区金腊 Pb-Zn-Ag 多金属矿田元素、稳定同位素和流体包裹体地球化学. 地球科学——中国地质大学学报, 34(4): 585－594.

冷成彪,张兴春,王守旭,等,2009. 岩浆－热液体系成矿流体演化及其金属元素气相迁移研究进展. 地质论评,55(1): 100－112.

李晶,陈衍景,李强之,等,2007. 甘肃阳山金矿流体包裹体地球化学和矿床成因类型. 岩石学报, 23(9): 2144－2154.

陕亮,郑有业,许荣科,等,2009. 硫同位素示踪与热液成矿作用研究. 地质与资源,18(3): 197－203.

盛继福,傅先政,1999. 大兴安岭中段成矿环境与铜多金属矿床地质特征. 北京:地震出版社.

万多,李剑锋,王一存,等,2014. 内蒙古红岭铅锌多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其意义. 地球科学——中国地质大学学报,39(6): 687－695.

王可勇,卿敏,孙丰月,等,2010. 吉林小西南岔金－铜矿床成矿流体地球化学特征及矿床成因研究. 岩石学报,26(12): 3727－3734.

王莉娟,王京彬,王玉往,等,2004. 内蒙古东部与矽卡岩型矿床有关的花岗岩氧同位素特征——以浩布告矿床为例. 地质评论,(5): 513, 560.

肖庆辉,邓晋福,马大铨,等,2002. 花岗岩研究思维与方法. 北京:地质出版社.

熊索菲,何谋春,姚书振,等,2014. 大兴安岭岔路口斑岩钼矿床流体成分及成矿意义. 地球科学——中国地质大学学报,39(7): 820－836.

杨利亚,杨立强,袁万明,等,2013. 造山型金矿成矿流体来源与演化的氢－氧同位素示踪:夹皮沟金矿带例析. 岩石学报,29(11): 4025－4035.

杨增海,王建平,刘家军,等,2012. 内蒙古乌日尼图钨钼矿床成矿流体特征及地质意义. 地球科学——中国地质大学学报,37(6): 1268－1278.

要梅娟,刘家军,翟德高,等,2012. 大兴安岭南段多金属成矿带硫、铅同位素组成及其地质意义. 吉林大学学报(地球科学版),42(2): 362－373.

张理刚,1985. 稳定同位素在地质科学中的应用. 西安:陕西科学技术出版社,91－94.

张瑞斌,刘建明,叶杰,等,2003. 河北寿王坟铜矿碳－氧同位素地球化学特征及其意义. 矿产与地质,17(2): 122－126.

赵一鸣,谭惠静,袁润光,等,1980. 含氯角闪石在闽西南矽卡岩铁矿床中的发现及其地质意义. 地质论评, 26(4): 300－306.

郑永飞,陈江峰,2000. 稳定同位素地球化学. 北京:科学出版社.