

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

青海驼路沟钴(金)矿床成矿物质来源的黄铁矿 氦氩硫铅同位素示踪

丰成友, 余宏全, 张德全, 李大新, 李进文, 崔艳合

中国地质科学院矿产资源研究所, 成矿作用与资源评价重点开放实验室, 北京, 100037

内容提要: 为查明青海驼路沟新型独立钴(金)矿床的成因和成矿物质来源, 文章对矿区发育的块状、条带状和浸染状黄铁矿矿石进行了黄铁矿流体包裹体氦氩同位素和黄铁矿硫、铅同位素测试。结果表明, 不同类型矿石的成矿流体氦、氩同位素组成基本一致, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 介于 $0.10 \sim 0.31 \text{ Ra}$ (平均 0.21 Ra), $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值为 $302 \sim 569$ (平均 373), 反映钴矿化流体主要来源于在赋矿岩系中深循环的大气降水; 矿石黄铁矿硫同位素值分布集中且接近于零, $\delta^{34}\text{S}$ 变化于 $-4.5\% \sim +1.5\%$, 集中在 $-1.8\% \sim -0.2\%$, 显示深部来源; 矿石铅以高放射性成因特征 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 19.279$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 15.691$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 39.627$), 且自地层围岩→区域早古生代火山岩→矿石依次明显增大, 可能指示高放射性成因矿石铅主要是由以深循环大气降水来源为主的热液不断从围岩地层中淋取而来。

关键词: 氦氩硫铅同位素; 成矿物质来源; 黄铁矿; 大气降水; 钴矿床; 青海驼路沟

稀有气体尤其是氦和氩在地壳和地幔储库中具有极不相同的同位素组成, 被作为同位素示踪极灵敏的示踪剂, 因此, 自 Zartman et al. (1961) 20世纪60年代初用其示踪地壳现代流体的来源与演化之后, 于80年代末扩展至成矿古流体的研究上, 并得到蓬勃发展。概括起来, 当前国内外成矿古流体氦氩同位素示踪研究在矿种上主要集中在金矿(毛景文等, 1997, 2001; 胡瑞忠等, 1999; 孙晓明等, 1999; 张连昌等, 2002; 王宝德等, 2003; 李晓峰等, 2004; 申萍等, 2004)、少量铜矿(胡瑞忠等, 1997; 朱华平等, 2005)、铅、锌、锡等多金属矿床(Simmons et al., 1987; Stuart et al., 1995; 胡瑞忠等, 1998; 赵葵东等, 2002; 薛春纪等, 2003; 王彦斌等, 2004; 蔡明海等, 2004)以及一些现代海底热水沉积硫化物黄铁矿等(Lupton et al., 1977; Jenkins et al., 1978; Turner et al., 1992; Stuart et al., 1994; Baptiste et al., 1996; 侯增谦等, 1999; 曾志刚等, 2000; Hou et al., 2005); 成矿时代主要为喜马拉雅期(Stuart et al., 1995; Baptiste et al., 1996; 胡瑞忠等, 1997, 1998, 1999; Burnard et al., 1999; 王登红等, 2002; 李晓峰等, 2004)和燕山期(张连昌等, 2002; 王宝德等, 2003; 蔡明海等, 2004), 仅近年, 申萍等(2004)、朱华

平等(2005)报道了海西期成矿流体氦氩同位素结果, 尚未有更老年龄矿床的数据报道。可见, 无论是用氦氩同位素示踪研究的矿种, 还是成矿时代均仍十分有限。

青海驼路沟矿床作为一种新类型独立钴矿床, 自发现以来, 已进行一些研究(李厚民等, 2000; 张德全等, 2002; 唐健等, 2004; 朱华平等, 2004), 最新的同位素年代学数据表明其形成于加里东期(丰成友等, 2006), 然而, 对包括成矿流体在内的成矿物质同位素示踪研究尚属空白, 制约了对该矿床成矿机制的深入认识。本文以矿区发育的典型黄铁矿矿石为对象, 通过对黄铁矿流体包裹体氦氩同位素和黄铁矿的硫、铅同位素研究, 探讨了成矿物质来源和矿床成因机制。

1 矿床地质概况

驼路沟钴(金)矿床位于青藏高原北缘、东昆仑之昆南构造带的中段。矿区出露一套浅变质(绿片岩相)的火山—沉积岩系, 自下而上分为变黑色页岩段、变凝灰岩—砂岩段、变火山—沉积岩段和变砂岩段4个岩性段(张德全等, 2002), 其中变火山—沉积岩段是主要的钴(金)含矿层(图1)。该含矿岩系之上

注: 本文为国家重点基础研究规划“973”项目(编号 2002CB412609)和国家自然科学基金项目(编号 40302019)资助的成果。

收稿日期: 2006-06-22; 改回日期: 2006-07-11; 责任编辑: 郝梓国、刘志强。

作者简介: 丰成友, 男, 1971年生。博士, 副研究员, 从事矿床地质、地球化学研究。通讯地址: 100037, 中国地质科学院矿产资源研究所; Email: fengchy@yahoo.com.cn。

为一套厚的下二叠统碳酸盐岩,野外观察表明,两者之间为断层接触。在变火山—沉积岩段中发育典型的喷气沉积岩—石英钠长石岩,它不仅是重要的含矿主岩,也是本矿床喷气沉积成因的重要鉴别标志,一般呈层状、似层状与围岩整合产出,有的因受后期构造作用而呈透镜状,规模大小不一,但大多与片岩一起被揉皱。石英钠长石岩呈淡肉红色—黄褐色,块状、条纹条带状构造,主要矿物成分包括石英、钠长石和碳酸盐矿物(铁白云石、方解石),少量绢云母、绿泥石。岩石的 SiO_2 和 Al_2O_3 含量分别变化于

56.34%~70.41%和6.88%~15.03%之间, $\text{Na}_2\text{O}/(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})=0.92\sim0.99$,显示为高度富钠的热液沉积岩(张德全等,2002)。矿区构造为一轴向近EW的紧闭复式背斜,轴部由黑色页岩组成,翼部地层层级褶皱、小褶曲十分发育。断裂构造主要有2种,其一为近于平行褶皱轴向的逆冲断裂,宽>200 m,延伸长,发育较强烈的塑性变形;其二是短小的切层断裂,具右行滑移特点,它们均为破矿构造。未见侵入岩出露。

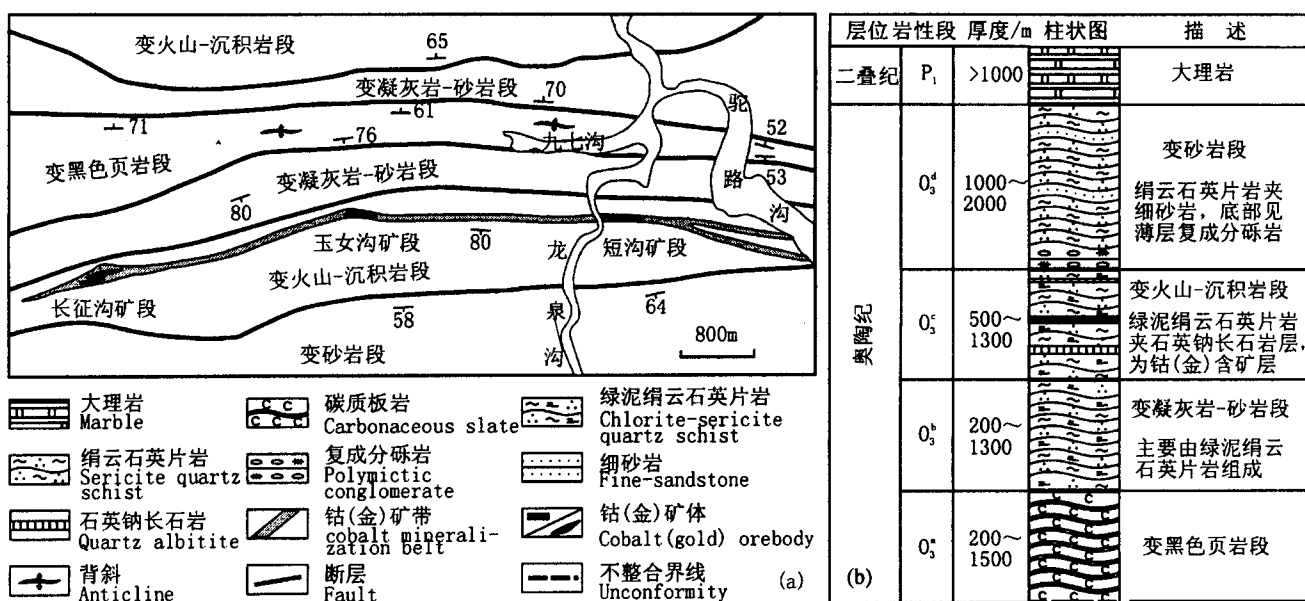


图1 驼路沟矿区地质图(a)和含矿岩系柱状图(b)

Fig. 1 Schematic geological map (a) and stratigraphic section of the ore-bearing sequence (b) in the Tuolugou ore district

在一个东自短沟、西至长征沟长约7 km、宽15~50 m(最宽200m)近EW向展布的钴金含矿层中共圈定短沟、玉女沟、长征沟3个矿段、计23个矿体。单个矿体呈层状(图2a)、透镜状(图2b)产于矿化层中,一般长50~500 m,平均厚1.31~7.71 m,Co平均品位为0.06%,最高达0.46%,伴生Au平均品位为 $0.45\times10^{-6}\sim1.05\times10^{-6}$,最高达 5.19×10^{-6} 。矿体倾向以NNE($5^{\circ}\sim35^{\circ}$)为主,少数NNW($345^{\circ}\sim353^{\circ}$),倾角陡($60^{\circ}\sim86^{\circ}$)。矿石为典型的黄铁矿型,根据矿石构造又可划分为块状(黄铁矿80%±)、条带状(黄铁矿30%~50%)和浸染状(黄铁矿30%±)三种,它们即为本次研究的主要对象。矿石矿物以黄铁矿为主,另含少量毒砂、黄铜矿、斑铜矿、闪锌矿和痕量钴镍黄铁矿、含钴黄铁矿、自然金、自然铜、自然锡等,脉石矿物主要有石英、钠长石、碳酸盐、绢

云母、绿泥石等。矿石中独立钴矿物含量甚少,通过反光镜下观测及电子探针分析显示,钴主要赋存于黄铁矿中。丰成友等(2006)最新获得黄铁矿Re-Os等时线年龄为 432 ± 23 Ma和 442 ± 17 Ma。

2 样品及分析方法

用于氢氡硫铅同位素分析的样品主要为块状、条带状和浸染状黄铁矿矿石,矿石全部采自工作程度最高的短沟矿段和玉女沟矿段的平硐内。为了便于对比,还对赋矿围岩进行了铅同位素分析。黄铁矿样品先后经过重力分离、电磁分离和在实体显微镜下挑选获得,全部为含钴较高的细粒黄铁矿,纯度在99%以上。

黄铁矿流体包裹体氢氡同位素分析在国土资源部同位素地质开放研究实验室用压碎法完成,测试

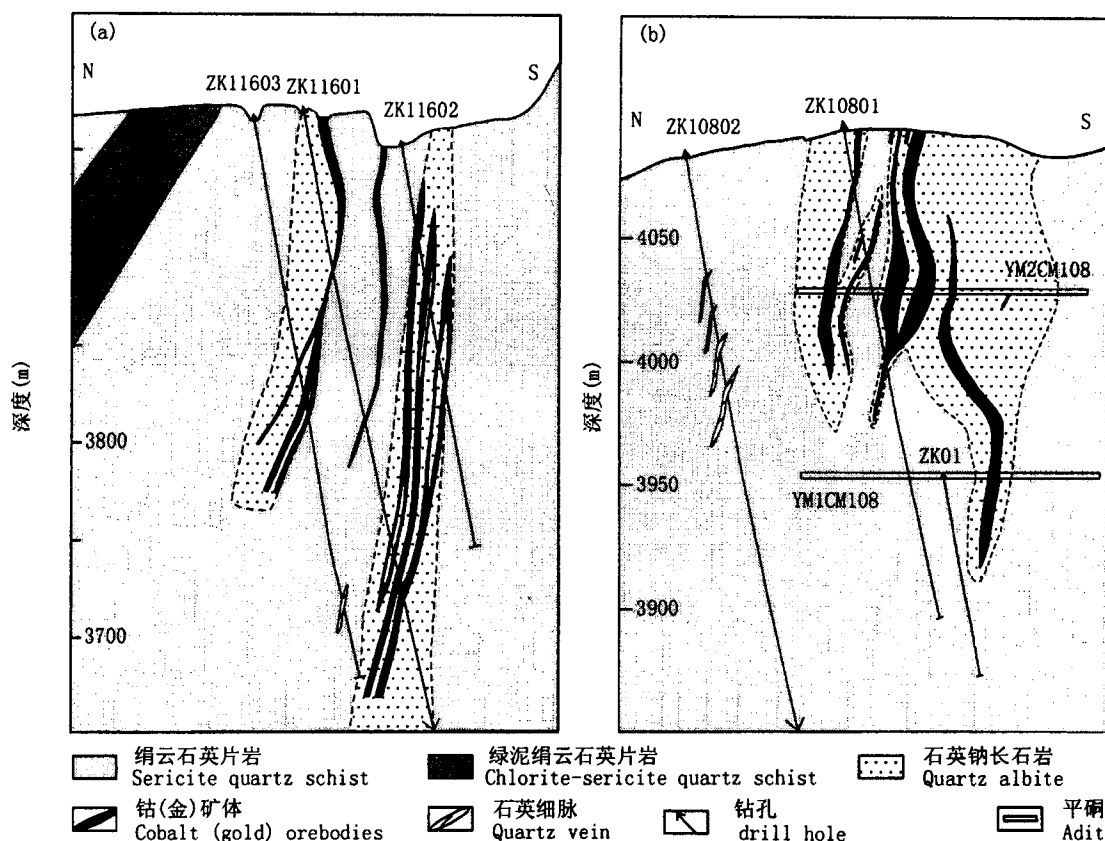


图2 驼路沟钴(金)矿床短沟矿段地质剖面图(据青海省地质调查院,2003,略修改)

Fig. 2 Geologic sections in the Duangou ore block of the Tuolugou deposit (Modified from Qinghai Geological Survey, 2003)

仪器为乌克兰产 MI 1201 IG 惰性气体同位素质谱仪, ^3He 用电子倍增器接收(分辨率为1200), ^4He 用法拉第杯接收(分辨率为760),工作标准为北京大气,其 $^3\text{He}/^4\text{He}=1.4\times 10^{-6}$ 。详细分析过程见李延河等(2002),现简述如下:真空条件下压碎黄铁矿,释放流体包裹体中的气体,经海绵钛泵、锆铝泵、活性碳液氮冷却4次纯化,除去杂质气体,氩、氦被冷冻,纯净的 He、Ne 进入分析系统,He、Ne 经加液氮的钛升华泵再次纯化,在 -78°C 释放 Ar,分别将氦和氩送入质谱仪作同位素分析,最后根据压碎后通过160目的样品重量计算样品的氩氦含量。

硫同位素测试在中国地质科学院矿产资源研究所同位素室 Finnigan-MAT251 质谱仪上进行,以 Cu_2O 作氧化剂制样,采用的国际标准为 CDT,分析精度分别为 $\pm 0.2\%$ 。铅同位素在中国地质科学院地质研究所同位素地质年代学实验室 MAT-262 质谱仪上测定,全岩样品用 HNO_3 和 HF 溶解后过阴离子交换树脂提取 Pb,蒸干后用磷酸提取样品,单铋带硅胶作发射剂质谱测试,国际标样 NBS-981 的测

定值为 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=16.937$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.491$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=36.722$ 。

3 结果与讨论

3.1 氩氦同位素

驼路沟矿床黄铁矿流体包裹体氩氦同位素分析结果见表1。

3.1.1 测试数据的影响因素分析

由于成矿后地质过程仍很复杂,因此,在利用氩氦同位素示踪成矿古流体研究中应对后生过程对流体包裹体初始氩氦同位素组成的影响作出正确评估(胡瑞忠,1997)。已有研究(Stuart et al., 1994, 1995; Baptiste et al., 1996; 胡瑞忠等,1997,1999; Burnard et al., 1999; 赵葵东等,2002; 薛春纪等,2003)表明喜马拉雅期—燕山期成矿古流体形成后的过程对氩氦初始同位素组成无明显影响,但对加里东期成矿流体是否有影响,需根据具体情况分析后确定。主要影响因素包括:① 成矿后流体活动,② 放射性成因,③ 扩散丢失,④ 同位素分馏等。

表 1 驼路沟钴(金)矿床黄铁矿氦、氩同位素组成

Table 1 He and Ar isotopic composition of the inclusions in the pyrite from the Tuolugou Co(Au) deposit

样号	采样位置	产状	$^3\text{He}/^4\text{He}$ ($\times 10^{-6}$)	^4He ($\times 10^{-6}$) $\text{cm}^3\text{STP/g}$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$	^{40}Ar ($\times 10^{-7}$) $\text{cm}^3\text{STP/g}$	R/Ra	$^{40}\text{Ar}/^4\text{He}$	Th ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)
Tlg-1	短沟矿段 I-1矿体	块状黄铁矿矿石	0.35 ± 0.05	3.42	379 ± 2	2077 ± 18	8.38	0.25	0.25	2.65	0.68
TL-100		块状黄铁矿矿石	0.32 ± 0.02	2.90	304 ± 2	1625 ± 5	23.07	0.23	0.80	0.50	0.20
Dg-4		块状黄铁矿矿石	0.26 ± 0.02	5.46	315 ± 2	1696 ± 13	46.66	0.19	0.85	2.45	0.83
TL-84	短沟矿段 I-2矿体	块状黄铁矿矿石	0.34 ± 0.12	1.35	502 ± 2	2699 ± 13	0.10	0.24	0.01	0.45	0.14
Dg-10		块状黄铁矿矿石	0.44 ± 0.06	2.77	328 ± 3	1673 ± 9	11.89	0.31	0.43	0.44	0.17
Dg-15		块状黄铁矿矿石	0.21 ± 0.05	2.80	328 ± 0	1768 ± 5	7.20	0.15	0.26	0.42	0.23
Dg-6		条带状黄铁矿矿石	0.20 ± 0.03	5.89	302 ± 4	1634 ± 26	46.41	0.14	0.79	2.62	0.79
Dg-16		浸染状黄铁矿矿石	0.14 ± 0.05	4.07	333 ± 1	1802 ± 14	12.35	0.10	0.30	1.62	1.19
TL-109	玉女沟矿段 I-1矿体	块状黄铁矿矿石	0.41 ± 0.10	3.61	569 ± 10	3019 ± 33	2.49	0.29	0.07	1.19	0.43

注: R 为样品的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 实测值, Ra 为北京标准大气 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值(1.4×10^{-6})。

笔者在对与黄铁矿共生的石英流体包裹体岩相学及显微测温研究时得知,黄铁矿应以原生流体包裹体为主,其成分可代表钴沉淀时成矿流体的成分。为了尽量消除少量次生包裹体的影响,在样品分析测试之前对其进行了预处理:①蒸馏水洗净的黄铁矿用丙酮在超声波中清洗 20 min 后烘干,②在真空中加热到 120°C 持续去气 24 h 以上,以去除次生包裹体和黄铁矿表面吸附的氦和氩,从而排除了成矿后流体活动的影响。

矿物中的 U、Th、K 等衰变可产生 ^4He 和 ^{40}Ar 等,从而使富含放射性元素的矿物的初始同位素比值迅速被改变(李延河等,2002)。事实上,驼路沟矿床黄铁矿的 U、Th 含量并不高,9 件样品的 U 介于 $0.14 \times 10^{-6} \sim 1.19 \times 10^{-6}$, 平均 0.53×10^{-6} , Th 为 $0.42 \times 10^{-6} \sim 2.65 \times 10^{-6}$, 平均 1.40×10^{-6} (表 1), 均大约只有中国陆壳平均值($U = 5.6 \times 10^{-6}$, $Th = 17 \times 10^{-6}$)的十分之一,而且矿物流体包裹体中的氦较矿物晶格中的放射性成因氦扩散系数更低,更能保持矿物形成时流体的氦同位素特征。黄铁矿为非含钾矿物,其流体包裹体内原地放射成因 ^{40}Ar 的量可忽略不计。另外,本研究所采用的手动真空压碎提取方法仅释放出很少量矿物晶格中放射性成因氦和氩,是测定矿物流体包裹体氦氩同位素组成的较理想方法,可将放射性成因 ^4He 的影响降到最低(Stuart et al., 1994)。Baptiste 等(1996)研究表明,黄铁矿具很低的氦扩散系数,是保存氦的理想矿物,并指出黄铁矿包裹体中的氦在 100 Ma 内没有大量丢失。但对驼路沟矿床在 432 Ma 内是否有大量丢失呢?尽管目前对矿物形成后至今的 ^3He 、 ^4He 逸散量尚未有可靠的定量计算方法,但可根据实际地质条

件综合分析。如前所述,驼路沟矿床为近地表产出的喷气沉积型钴(金)矿床,矿区含矿火山—沉积岩系仅遭受绿片岩相变质作用(张德全等,2003),不利于黄铁矿晶格中氦的大量扩散,同时,包裹体壁是防止气体扩散的重要屏障,流体包裹体中氦的扩散系数比矿物晶格中放射成因氦的扩散系数低几个数量级(李延河等,2002)。与氦相比,氩在黄铁矿及其流体包裹体中的扩散系数更低(Burnard et al., 1999; 李延河等,2002),流体包裹体中的氩更不会扩散。另外, ^3He 、 ^4He 应为同步扩散丢失,氦的扩散丢失对其 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值一般影响不大,Stuart et al. (1994)认为流体包裹体中的氦扩散丢失 $> 70\%$ 时才对 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值产生可观测的影响。由此可见,黄铁矿流体包裹体中的氦在其形成之后很少扩散,未对 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值造成较大影响。

其他如宇宙成因 ^3He , 因本次研究所用的样品均为采自矿区地下坑道的新鲜黄铁矿矿石,因此排除了宇宙成因 ^3He 污染的可能性。胡瑞忠(1997)、李延河等(2002)研究表明,无论是在成矿时捕获流体包裹体的过程中,还是在用真空压碎法获取流体包裹体样品的过程中,稀有气体都不会产生明显的同位素分馏。综合上述,无论本研究所选取的测试对象(黄铁矿),还是分析技术方法(手动真空压碎法)均是可行的、恰当的。矿区钴矿化流体形成之后的各种作用对流体包裹体中氦氩初始同位素组成未造成较大影响,本次测得的数据可代表流体包裹体被捕获时成矿流体的初始值。

3.1.2 成矿流体来源

热液流体中稀有气体可能有 4 种来源,而且不同来源气体的氦、氩同位素组成及其特征比值具有显

著差别(Simmons et al., 1987; Stuart et al., 1995; 胡瑞忠等, 1999; Burnard et al., 1999): ① 大气饱和水(ASW), 包括大气降水和海水, 其典型的 He 和 Ar 同位素组成为: $^3\text{He}/^4\text{He}=1\text{Ra}$ (Ra 代表大气氦的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值, 为 1.4×10^{-6}), $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}=295.5$, $^{40}\text{Ar}/^4\text{He}$ 值约为 0.01; ② 地幔流体, 具有高 ^3He 的特征, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的特征值一般为 $6 \sim 9\text{Ra}$, Ar 以放射性 ^{40}Ar 为主, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} > 40000$, $^{40}\text{Ar}/^4\text{He}$ 比值为 $0.33 \sim 0.56$; ③ 地壳放射成因的 He 和 Ar, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的特征值 $\leq 0.1\text{Ra}$ (绝大多数情况下介于 $0.01 \sim 0.05\text{Ra}$ 之间), $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} \geq 45000$, $^{40}\text{Ar}/^4\text{He}$ 比值为 $0.16 \sim 0.25$; ④ 大气 He 和 Ar, 由于大气 He 含量很低, 不足以对地壳流体中的 He 同位素组成产生影响, 但无法区分流体中是否有大气 Ar 的混入。由表 1 可见, 驼路沟矿床不同类型矿石中黄铁矿流体包裹体的氢、氩同位素组成变化不大, ^4He 为 $1.35 \times 10^{-6} \sim 5.89 \times 10^{-6} \text{cm}^3 \text{STP/g}$, 平均 $3.59 \times 10^{-6} \text{cm}^3 \text{STP/g}$; ^{40}Ar 为 $0.10 \times 10^{-6} \sim 46.66 \times 10^{-7} \text{cm}^3 \text{STP/g}$, 平均 $17.6 \times 10^{-7} \text{cm}^3 \text{STP/g}$ 。 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值比较一致, 介于 $0.10 \sim 0.31\text{Ra}$, 大大低于地幔流体相应特征值, 而高于地壳流体的比值。在 $^3\text{He}-^4\text{He}$ 同位素演化图解(图 3)上, 投点集中分布在地壳氦与地幔氦的过渡带偏地壳组成一侧, 反映出以地壳组成为主的特征。在 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}-\text{R/Ra}$ 图解(图 4)中, 样品位于地壳流体和饱和空气水之间, 而远离地幔流体区域。驼路沟矿床黄铁矿流体包裹体的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值介于 $302 \sim 569$ 之间, 平均值为 373, 略高于溶解在雨水中的大气氩的同位素组成 ($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 295.5$), 大大低于地

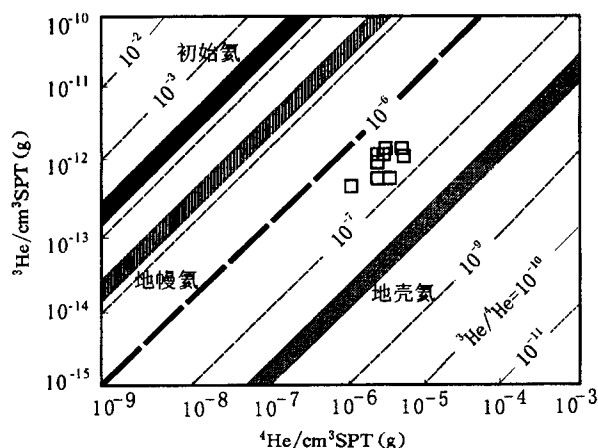


图 3 驼路沟矿床成矿流体 $^3\text{He}-^4\text{He}$ 图解

Fig. 3 ^3He vs. ^4He diagram of ore-forming fluids in the Tuolugou deposit

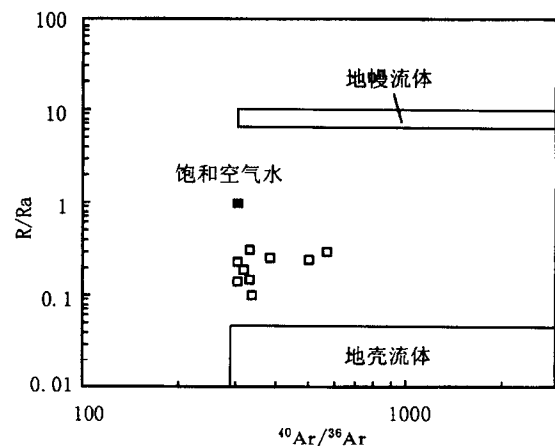


图 4 驼路沟矿床成矿流体 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}-\text{R/Ra}$ 图解

Fig. 4 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ vs. R/Ra diagram of ore-forming fluids in the Tuolugou deposit

壳和地幔流体的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值, 2 件样品 (TL-84、TL-109) 的 $^{40}\text{Ar}/^4\text{He}$ 比值与雨水的 (≈ 0.01) 十分接近。总体来看, 该矿床成矿流体以壳源大气降水为主。

对驼路沟矿床石英流体包裹体显微测温和氢、氧同位素研究表明, 钴成矿流体为低温 ($180 \sim 200^\circ\text{C}$) 的 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ 体系, 块状、条带状和浸染状黄铁矿矿石中石英的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 $-0.37\text{‰} \sim +3.68\text{‰}$, δD 为 $-90\text{‰} \sim -74\text{‰}$, 在成矿流体 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 关系图上的投点落在变质水与大气降水线之间, 且有向大气降水演化的趋势, 显示成矿流体可能主要为经过下渗循环的大气降水, 此与上述黄铁矿流体包裹体氢、氩同位素示踪结果相一致。

3.2 硫同位素

用于硫同位素分析的样品采自矿区中东部的短沟矿段和玉女沟矿段, 主要为不同类型矿石及少量矿化岩石, 测试对象均为黄铁矿。从表 2 和图 5 可见, 黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围不大 ($-4.5\text{‰} \sim +1.5\text{‰}$, 均值 -1.2‰), 而且 19 件样品中有 14 件黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值集中在 $-1.8\text{‰} \sim -0.2\text{‰}$ 之间, 平均为 -1.0‰ , 说明硫同位素均一化程度很高。一些研究表明, 块状硫化物矿床 (包括 Sedex 和 VMS) 的硫主要有两个来源, 即还原海水硫酸盐和岩浆硫, 后者可直接来自喷气作用和从喷发的火山岩中淋滤而来。驼路沟矿床矿石及蚀变岩中缺少硫酸盐矿物、磁黄铁矿、磁铁矿等, 而且硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 较均一, 反映成矿流体的化学态较为稳定, 因此成矿流体中的硫同位素成分在迁移、成矿过程中也基本保持稳定, 据此可以认为

成矿中的硫是由喷气作用直接提供的,接近于零的 $\delta^{34}\text{S}$ 值表明其来源较深。

在 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 与 $\delta^{34}\text{S}$ 相关关系图(图6)上,二者总

体呈现反相关关系,即随着 $\delta^{34}\text{S}$ 值趋向于零,而 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 向地壳流体方向演化,表明它们的来源明显不同。

表 2 驼路沟钴(金)矿床黄铁矿的硫同位素组成

Table 2 $\delta^{34}\text{S}$ values of pyrite in the Tuolugou cobalt deposit

样号	产状	$\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}(\text{‰})$	样号	产状	$\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}(\text{‰})$
短沟矿段			短沟矿段		
Dg-4	块状黄铁矿矿石	-1.0	TL-88	浸染状黄铁矿化石英钠长石岩	-0.6
Dg-6	条带状黄铁矿矿石	+0.7	TL-90	浸染状黄铁矿化绢云石英千枚岩	-1.0
Dg-8	细条带状黄铁矿矿石	-1.5	TL-92	浸染状黄铁矿化石英钠长石岩	-3.5
Dg-10	块状黄铁矿矿石	-0.7	TL-100	块状黄铁矿矿石	-0.2
Dg-15	块状黄铁矿矿石	-0.4	TL-103	条带状黄铁矿矿石	-2.7
Dg-16	浸染状黄铁矿矿石(粗晶黄铁矿)	-0.7	BI32	块状黄铁矿矿石	-0.6
Dg-16	浸染状黄铁矿矿石(细粒黄铁矿)	-0.3	玉女沟矿段		
TLg-1	块状黄铁矿矿石	-4.5	TL-109	块状黄铁矿矿石	-1.9
TL-1	浸染状黄铁矿矿石	-1.3	Ylg-4	浸染状黄铁矿矿石	+1.5
TL-84	块状黄铁矿矿石	-1.8	BI48	块状黄铁矿矿石	-1.8

测试单位:中国地质科学院矿产资源研究所,白瑞梅分析。

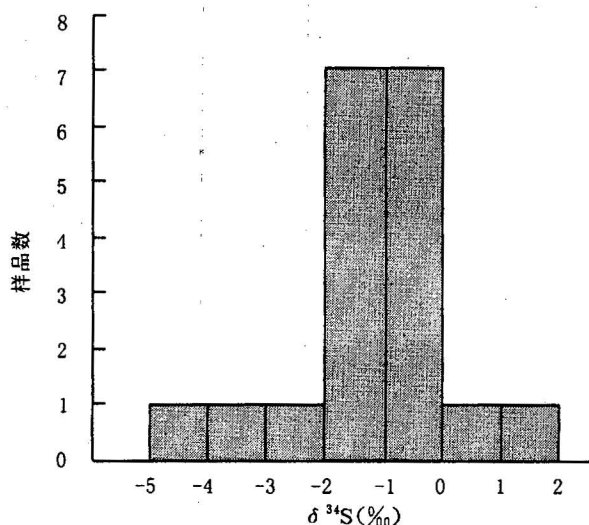


图 5 驼路沟矿床黄铁矿硫同位素直方图

Fig. 5 Histogram showing $\delta^{34}\text{S}$ values of pyrite from the Tuolugou deposit

3.3 铅同位素

为了便于对比和探讨成矿物质来源,分别对矿石、容矿围岩和喷气沉积岩进行了铅同位素分析,结果见表3。2件石英钠长石岩($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为16.769~16.702、15.288~15.239和36.838~36.656)与围岩地层(3组铅同位素组成分别为16.715~17.380、15.256~15.420和36.918~37.583)具有相近铅同位素组成,而矿石和矿化岩石的黄铁矿明显富放射性成因铅,其

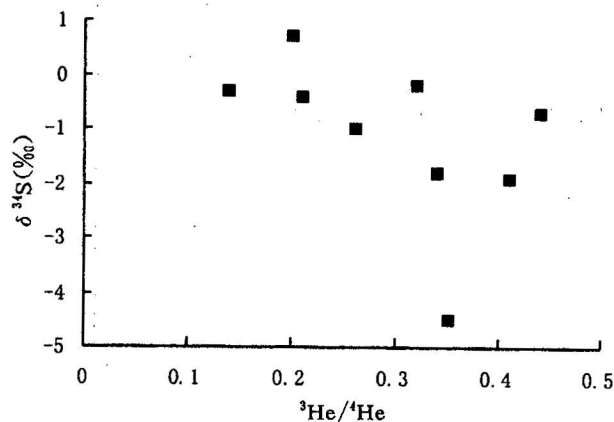


图 6 驼路沟矿床黄铁矿 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 与 $\delta^{34}\text{S}$ 相关图解

Fig. 6 $^3\text{He}/^4\text{He}$ vs. $\delta^{34}\text{S}$ for pyrite from the Tuolugou deposit

$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为19.279~20.739、15.691~15.842、39.627~41.474。在铅同位素组成相关图解上(图7),3组铅同位素比值从地层围岩、区域早古生代火山岩到矿石依次明显增大,可能指示矿石铅主体来自赋矿围岩火山—沉积岩系。高放射性成因矿石铅主要是由于以深循环大气降水来源为主的热液不断淋滤围岩地层岩石,在此过程中地壳放射性成因铅首先进入到溶液,从而导致放射性成因铅的逐渐积累,造成铅同位素组成明显偏高。

表 3 驼路沟钴(金)矿床铅同位素组成
Table 3 Lead isotopic compositions of the Tuolugou cobalt deposit

样号	岩性	测试对象	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
TL-33	绿泥绢云千枚岩	全岩	16.715	15.256	36.918
TL-38	绿泥绢云千枚岩	全岩	16.936	15.359	37.109
TL-39	绿泥绢云石英片岩	全岩	16.982	15.420	37.085
TL-43	绿泥绢云千枚岩	全岩	17.231	15.419	37.415
TL-53	绢云绿泥片岩	全岩	17.024	15.368	37.126
TL-97	绿泥绢云千枚岩	全岩	17.380	15.411	37.583
TL-27	石英钠长石岩	全岩	16.769	15.288	36.838
TL-80	方解石英钠长石岩	全岩	16.702	15.239	36.656
TL-1	浸染状黄铁矿矿石	黄铁矿	19.367	15.769	39.853
TL-84	块状黄铁矿矿石	黄铁矿	20.525	15.842	41.046
B-132	块状黄铁矿矿石	黄铁矿	19.279	15.691	39.627
B-148	块状黄铁矿矿石	黄铁矿	20.164	15.756	40.102
TL-88	浸染状黄铁矿化石英钠长石岩	黄铁矿	20.739	15.837	41.474
TL-92	浸染状黄铁矿化石英钠长石岩	黄铁矿	20.279	15.813	41.245

测试单位:中国地质科学院地质研究所同位素地质开放实验室,杨淳、张巧大分析。

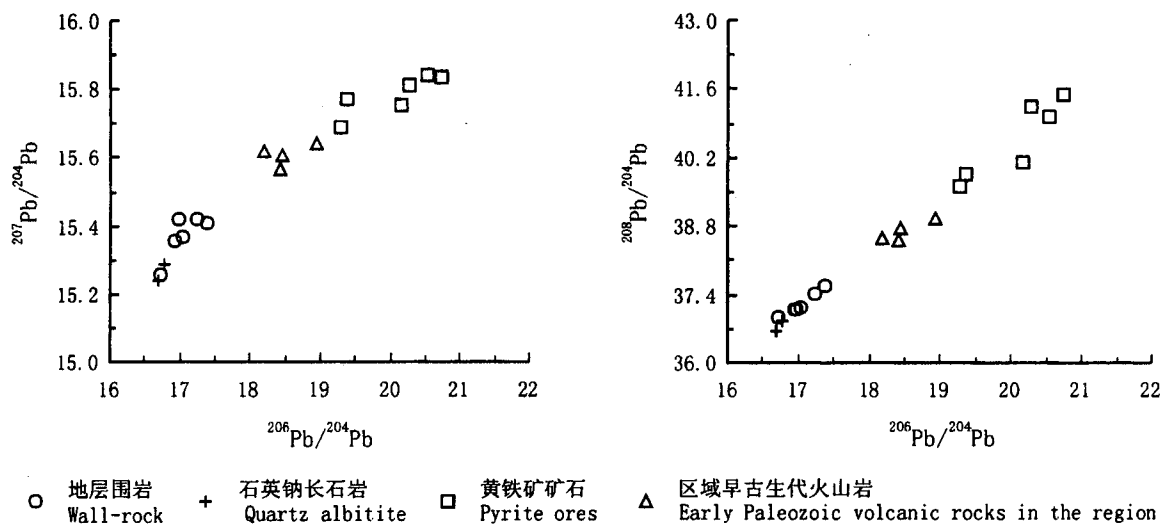


图 7 驼路沟矿区铅同位素组成图解

Fig. 7 Diagram of lead isotopic compositions in the Tuolugou ore district

3.4 矿床成因指示意义

青海东昆仑地区早古生代构造演化以两次重要的板块拉伸裂解为特征,继震旦纪—寒武纪(?)裂解作用形成万保沟群细碧—角斑岩系及块状硫化物型(VHMS)铜多金属矿之后,于晚奥陶世—早志留世(黄铁矿 Re-Os 等时线年龄为342~332Ma,丰成友等,2006)再次拉伸裂解,形成活动陆缘裂陷海盆及受控的同生断裂或生长断裂,并发生强烈的热水喷流活动和相应的钴金等矿化作用,具体表现为强烈发育的富钠热水沉积岩、顺层产出钴金矿体以及典型热水沉积矿石组构等。东昆仑地区上地幔

的富 Co 特征、驼路沟矿区接近于零的黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值、钴含量与黄铁矿含量的正相关关系以及钴具强的亲铁亲硫双重性等均显示原始钴与硫具相同的深部来源。由于大约晚奥陶世始洋(海)盆又开始俯冲消减,因此,裂解的结果仅为局限裂陷槽。氢、氩同位素研究结果表明,热水活动流体是以 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值较低的大气降水为主,经在地层围岩中反复循环后喷出,然后在较远离喷口位置沉积,形成喷气岩和条带状、块状矿石,几乎没有海水的参与。嗣后,本区因受晚加里东期和晚华力西—印支期造山作用的影响(张德全等,2001,2005),不仅遭受绿片

岩相变质作用,使 Co 从先存细粒黄铁矿中析出,形成钴矿物,构成较高品位独立钴矿床,而且以大气降水来源为主的热液不断淋滤围岩岩石,在此过程中放射性成因铅首先进入到溶液,从而导致放射性成因铅的逐渐积累,造成矿石铅同位素组成明显偏高。

4 主要结论

(1) 驼路沟矿区钴矿化流体形成之后的各种作用对流体包裹体中的氦、氩初始同位素组成影响较小,可利用其进行该矿床成矿流体来源示踪。对矿区发育的块状、条带状和浸染状等不同类型黄铁矿矿石进行的黄铁矿流体包裹体氦、氩同位素测试结果表明,它们的氦、氩同位素组成基本一致, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 为 0.10~0.31 Ra, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 为 302~569,反映钴矿化流体主要来源于在赋矿岩系中深循环的大气降水。

(2) 矿石黄铁矿硫同位素值分布集中且接近于零,但 $\delta^{34}\text{S}$ 与 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值呈反相关关系,表明它们的来源不同,硫为深部来源;矿石铅以高放射性成因特征,且自地层围岩→区域早古生代火山岩→矿石依次明显增大,可能指示高放射性成因矿石铅主要是由以深循环大气降水来源为主的热液不断从围岩地层中淋取而来。

致谢: 野外工作期间得到了青海省地质调查院有关领导的大力支持,贾群子、闫升好、徐文艺、姚文光等也参加了部分野外工作。国土资源部同位素开放研究实验室的李延河、田世洪、乐国良对氦氩同位素测试给予了大力帮助,并就相关问题进行了有益探讨,在此一并表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- 蔡明海,毛景文,梁婷,吴付新. 2004. 广西大厂锡多金属矿床氦、氩同位素特征及其地质意义. 矿床地质, 23(2): 225~231.
- 丰成友,张德全,屈文俊,杜安道,李大新,余宏全. 2006. 青海格尔木驼路沟喷流沉积型钴(金)矿床的黄铁矿 Re-Os 定年. 地质学报, 80(4): 571~576.
- 侯增谦,李延河,艾永德,张琦玲,唐绍华. 1999. 冲绳海槽海底活动热力成矿系统中的地幔氦氮-氧同位素证据. 中国科学(D 辑), 29(4): 285~292.
- 胡瑞忠,毕献武,Turner G, Burnard P G. 1997. 马厂箐铜矿床黄铁矿流体包裹体 He、Ar 同位素体系. 中国科学(D 辑), 27(6): 503~508.
- 胡瑞忠,毕献武,邵树勋,Turner G, Burnard P G. 1997. 云南马厂箐铜矿床氩同位素组成研究. 科学通报, 42(17): 1542~1545.
- 胡瑞忠,毕献武. 1999. 哀牢山金矿带金成矿流体 He 和 Ar 同位素地球化学. 中国科学(D 辑), 29(4): 321~330.
- 胡瑞忠,钟宏,叶造军,毕献武. 1998. 金顶超大型铅-锌矿床氦、氩同位素地球化学. 中国科学(D 辑), 28(3): 208~213.
- 胡瑞忠. 1997. 成矿流体氦、氩同位素地球化学. 矿物岩石地球化学通报, 16(2): 120~123.
- 李厚民,沈远超,胡正国. 2000. 青海东昆仑骆驼沟钴(金)矿床地质特征. 矿物岩石地球化学通报, 19(4): 321~322.
- 李晓峰,毛景文,王登红,罗辅勋. 2004. 四川大渡河金矿田成矿流体来源的氦氩硫氢氧同位素示踪. 地质学报, 78(2): 203~210.
- 李延河,李金城,宋鹤彬,乐国良. 2002. 矿流体包裹体的氩同位素分析及地质应用. 矿床地质, 21(增刊): 982~985.
- 毛景文,李延河,李红艳,王登红,宋鹤彬. 1997. 湖南万古金矿床地幔流体成矿的氩同位素证据. 地质论评, 43(6): 646~649.
- 毛景文,李荫清. 2001. 河北省东坪碛化物金矿床流体包裹体研究: 地幔流体与成矿关系. 矿床地质, 20(1): 23~36.
- 申萍,沈远超,曾庆栋,刘铁兵,李光明. 2004. 新疆萨吾尔金矿带成矿流体氦氩同位素示踪. 科学通报, 49(12): 1199~1204.
- 孙晓明, Norman D I, 孙凯, 陈炳辉, 陈敬德. 1999. 粤中长坑金银矿成矿流体 N_2 -Ar-He 示踪体系及来源. 中国科学(D 辑), 29(3): 240~246.
- 唐健,王发明,许红英,李善平,张林. 2004. 青海驼路沟地区钴金矿床赋矿地层与控矿构造特征. 西北地质, 37(1): 86~96.
- 王宝德,牛树银,孙爱群,李红阳. 2003. 冀北地区金矿床 He、Ar、Pb 同位素组成及其成矿物质来源. 地球化学, 32(2): 181~187.
- 王登红,余金杰,杨建民,闫升好,薛春纪,陈毓川. 2002. 中国新生代成矿作用的情性气体同位素研究与动力学背景. 矿床地质, 21(2): 179~186.
- 王彦斌,曾普胜,李延河,蒙义峰,杨竹森,田世洪. 2004. 安徽铜陵新桥铜金矿床的 He、Ar 同位素组成及其意义. 现代地质, 18(4): 521~528.
- 王彦斌,曾普胜,李延河,田世洪. 2004. 云南金顶和白秧坪矿床 He、Ar 同位素组成及其意义. 矿物岩石, 24(4): 76~80.
- 薛春纪,陈毓川,王登红,杨建民,杨伟光,曾荣. 2003. 滇西北金顶和白秧坪矿床: 地质和 He、Ne、Xe 同位素组成及成矿时代. 中国科学(D 辑), 33(4): 315~322.
- 曾志刚,秦蕴珊,崔世奎. 2000. 大西洋中脊 TAO 热液区硫化物中流体包裹体的 He-Ne-Ar 同位素组成. 中国科学(D 辑), 30(6): 628~633.
- 张德全,党兴彦,余宏全,李大新,丰成友,李进文. 2005. 柴北缘—东昆仑地区造山型金矿床的 Ar-Ar 测年及其地质意义. 矿床地质, 24(2): 87~98.
- 张德全,丰成友,李大新,徐文艺,闫升好,余宏全,董英君,崔艳合. 2001. 柴北缘—东昆仑地区的造山型金矿床. 矿床地质, 20(2): 137~146.
- 张德全,王彦,丰成友,李大新,闫升好,崔艳合. 2002. 驼路沟喷气沉积型钴(金)矿床的地质—地球化学. 矿床地质, 21(3): 213~222.
- 张连昌,沈远超,李厚民,曾庆栋,李光明,刘铁兵. 2002. 胶东地区金矿床流体包裹体的 He、Ar 同位素组成及成矿流体来源示踪. 岩石学报, 18(4): 559~565.
- 赵葵东,蒋少涌,肖红权. 2002. 大厂锡—多金属矿床成矿流体来源的 He 同位素证据. 科学通报, 47(8): 632~635.
- 朱华平,孙丰月,李碧乐,陈国华,迟效国. 2004. 青海驼路沟钴矿床地质特征及找矿方向研究. 地质找矿论丛, 19(3): 147~152.
- 朱华平,张德全,张汉斌,余宏全,丰成友,李虹. 2005. 陕西柞山地区穆家庄铜矿床成矿流体来源的氦氩硫氢氧同位素示踪. 地质与勘探, 41(5): 22~26.

- Baptiste P J, Fouquet Y. 1996. Abundance and isotopic composition of helium in hydrothermal sulfides from the East Pacific Rise at 13°N. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60: 87~93.
- Burnard P G, Hu R Z, Turner G, Bi X W. 1999. Mantle, crustal and atmosphere noble gases in Ailaoshan Gold deposits, Yunnan Province, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63: 1595~1604.
- Hou Zengqian, Khin Zaw, Zhang Qiling, Li Yakhe, Zeng Zhigangm, Urabe T. 2005. Contribution of magmatic fluid to the active hydrothermal system in the JADE field Okinawa trough: evidence from fluid inclusion, oxygen and helium isotopes. *International Geology Review*, 47: 420~437.
- Jenkins W, Edmond J M, Corliss J B. 1978. Excess ^3He and ^4He in Galapagos submarine hydrothermal waters. *Nature*, 272: 156~159.
- Lupton J E, Weiss R F, Craig H. 1977. Mantle helium in hydrothermal plumes in the Galapagos Rift. *Nature*, 267: 603~604.
- Simmons S F, Sawkins F J, Schlutter D J. 1987. Mantle-derived helium in two Peruvian hydrothermal ore deposits. *Nature*, 329: 429~432.
- Stuart F M, Burnard P G, Taylor R P, Turner G. 1995. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluids: He-Ar isotopes in fluid inclusions from DaeHwa W-Mo mineralisation, South Korea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 4663~4673.
- Stuart F M, Turner G, Duckworth R C, Fallick A E. 1994. Helium isotopes as tracers of trapped hydrothermal fluids in ocean floor sulfides. *Geology*, 22: 823~826.
- Stuart F, Turner G, Taylor R. 1994. He-Ar isotope systematics of fluid inclusion: Resolving mantle and crustal contributions to hydrothermal fluids. In: Matsuda J, ed. *Noble Gas Geochemistry and Cosmochemistry*. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company.
- Torgersen T, Jenkins W J. 1982. Helium isotopes in geothermal systems: Iceland, The Geysers, Raft River and Steamboat Springs. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46: 739~748.
- Trull T W, Kurz M D, Jenkins W J. 1991. Diffusion of cosmogenic ^3He in olivine and quartz: Implications for surface exposure dating. *Earth and Planetary Science Letters*, 103: 241~251.
- Turner G, Stuart F. 1992. Helium/heat ratios and deposition temperatures of sulfides from the ocean floor. *Nature*, 357: 581~583.
- Zartman R E, Wasserburg G J, Reynolds J H. 1961. Helium, argon and carbon in some natural gases. *Journal of Geophysical Research*, 66: 277~306.

Helium, Argon, Sulfur and Lead Isotope Tracing for Sources of Ore-forming Material in the Tuolugou Cobalt (Gold) Deposit, Golmud City, Qinghai Province, China

FENG Chengyou, SHE Hongquan, ZHANG Dequan, LI Daxin, LI Jinwen, CUI Yanhe

Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Institute of Mineral Resources,

Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

Abstract

In order to study the genesis and sources of ore-forming material in the newly discovered Tuolugou cobalt (gold) deposit in Qinghai Province, this paper analyzed the helium and argon isotopic compositions of fluid inclusions, and sulfur and lead compositions in pyrite from massive, banded and disseminated ores. The result indicates that helium and argon isotopic compositions of the Tuolugou cobalt (gold) deposit are consistent. The $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios are 0.10 to 0.31 Ra with a mean of 0.21 Ra, the $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratios vary from 302 to 569 with a mean of 373, indicating that ore fluids were deeply circulating meteoric water. Near zero $\delta^{34}\text{S}$ values of pyrite concentrating in the range of -1.8‰ to -0.2‰ indicate a deep source for S and largely exhalative origin. Lead isotope of ores is characterized by high radioactivity with $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 19.279$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 15.691$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 39.627$. Moreover, the lead isotope ratios increase from wall-rocks, through regional volcanic rocks to ores, it is inferred that the ore lead was leached predominantly from wall-rocks by deeply circulating meteoric water.

Key words: helium, argon, sulfur and lead isotope; sources of ore-forming material; pyrite; meteoric water; cobalt deposit; Tuolugou deposit, Qinghai Province