

对新疆萨日达拉金矿成矿流体的 He、Ar 同位素示踪

王建其¹, 王居里¹, 杨猛^{1,2}

(1. 大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069; 2. 西北有色地质勘查局, 陕西 西安 710054)

摘要:采用稀有气体同位素质谱方法, 通过分析萨日达拉金矿载金黄铁矿中流体包裹体的 He、Ar 同位素组成, 对成矿流体进行示踪研究。结果表明, 萨日达拉金矿黄铁矿流体包裹体中 He 同位素组成变化范围较大, R/Ra 值为 0.34~1.59, 显示壳幔混合特征, 二元混合模型计算结果显示以地壳放射性成因氦为主, 并有地幔氦的加入; Ar 同位素组成较均一, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值为 305~359, 平均 336, $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$ 值为 5.34~5.44, 平均 5.40, 显示叠加有部分放射性成因 ^{40}Ar 的大气降水成因氦同位素组成。综合分析结果表明, 萨日达拉金矿成矿流体为由大气降水深循环改造而成的地壳流体, 其所具有的地幔 He 同位素组成应继承自下部地壳中隐伏的壳幔混合成因地质体。

关键词: He、Ar 同位素; 大气降水; 地壳流体; 成矿流体演化; 萨日达拉金矿

中图分类号: P618.51; P597

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2016)02-0117-07

Helium and Argon Isotopic Compositions of Fluid Inclusions in Pyrite from Saridala Gold Deposit in Xinjiang

WANG Jianqi¹, WANG Juli¹, YANG Meng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 2. North West Mining and Geology Group Co., Ltd for Nonferrous Metals, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Saridala gold deposit is located within Bing Daban ductile shear zone in the northern margin of Middle Tianshan. After analyzing the subsequent processes that may affect He-Ar original isotopic compositions of ore-forming fluid, the helium and argon isotopic compositions of fluid inclusions in pyrite were analyzed to trace fluid origin by using an inert gas isotopic mass spectrometer. Research results indicate that R/Ra ratios range from 0.34~1.59Ra, which primarily consist of crust-radioactive He with some mantle-derived He; Samples share coincident argon isotopic compositions with $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ and $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$ ratios ranging from 305 to 359 with an average of 336, and from 5.34 to 5.44 with an average of 5.40, respectively, which yield Ar isotopic compositions of general atmospheric saturated water with some capture of radioactive ^{40}Ar . He

收稿日期: 2015-05-23; 修回日期: 2015-12-26

基金项目: 国家科技支撑计划项目“西天山天格尔-依连哈比尔尕金矿带大型金矿床定位预测与找矿靶区评价技术与应用研究”(2006BAB07B04-05)和“环巴尔喀什-西准格成矿带矿产资源预测和靶区评价”(2011BAB06B01-03)资助

作者简介: 王建其(1960-), 男, 陕西韩城人, 工程师, 主要从事地球化学研究及分析测试工作。E-mail: wangjianqi@nwu.edu.cn

and Ar isotopic compositions indicate that ore-forming fluid of the Saridala gold deposit is derived from crust, which origin from deep circulation of atmospheric water, and the mantle-derived He means nothing to do with direct mantle process but drops a hint that may existed certain geologic bodies related to the interaction between mantle and crust.

Keywords: He-Ar isotopes; atmospheric water; crustal fluid; ore-forming fluid evolution; Saridala gold deposit

萨日达拉金矿位于新疆西天山东部、天格尔金矿带西段,形成于华力西中晚期区域由挤压向伸展转换的后碰撞环境(王居里等,2009)。就成矿流体性质及示踪研究而言,前人主要对矿石中脉石矿物石英、方解石等进行 C、H、O 稳定同位素示踪、对比,研究结果显示区内成矿具有多元性特征(王居里等,2001,2002,2011;李新峰等,2005),成矿流体为变质热液与大气降水的混合成因流体(陈衍景等,1998;刘春发等,2010),而对与金密切共生的黄铁矿中流体包裹体研究较少,仅见杨猛等(2012)报道了矿带东部望峰金矿成矿流体的氦、氩同位素示踪结果,这在一定程度上影响到对天格尔金矿带矿床成因及成矿过程的认识。稀有气体尤其是氦、氩,由于其化学性质不活泼及不同源区同位素组成差异明显等特点,被广泛应用于成矿古流体示踪研究(王先彬,1989;胡瑞忠,1997;胡瑞忠等,1997a、1997b;申萍等,2004;翟伟等,2006;丰成友等,2006)。笔者采用稀有气体同位素质谱方法,以矿石矿物载金黄铁矿中流体包裹体为研究对象,在分析后期地质作用对成矿流体初始氦、氩同位素组成影响的基础上,对成矿流体进行示踪,并探讨成矿流体演化过程。

1 区域地质与矿床地质概况

研究区位于中天山北缘、冰(胜利)达坂以西,以中天山北缘复合型断裂带为界,南、北两侧分别出露两套地层系统(图1)。断裂带以南为中天山地区,主要出露呈残片、残块状产出的中新元古界变质岩系,主要岩性为黑云母变粒岩、黑云角闪变粒岩、斜长角闪岩、绢云石英千糜岩、钙质千糜岩及片岩类等;断裂带以北为北天山地区,主要出露上泥盆统天格尔组火山-沉积岩系,主要岩性为安山岩、英安岩、流纹岩组合,夹少量粗玄岩、凝灰岩、凝灰质砂岩及灰岩透镜体,局部分布有火山角砾岩,角砾成分以中酸性火山岩为主,另有少量中基性火山岩。侵入

岩主要为新元古代晚期与加里东晚期花岗岩类,二者构成冰达坂复式岩基主体,北侧发育二叠纪红色碱长花岗岩及角闪辉长岩,矿体附近常见变辉绿岩脉。区内断裂构造主要为冰达坂断裂,与冰达坂韧性剪切带共同构成中天山北缘复合断裂带,现今以冰达坂韧性剪切带为主体,该剪切带为一条大型右行走滑剪切构造带,宽2~5km,总体近NW-SEE向展布,由一系列近平行排列的次级剪切带组成,区内岩石、地层几乎均遭受剪切变形、变质作用,宏观表现为片理化带和糜棱岩带(王居里等,2009;2011)。

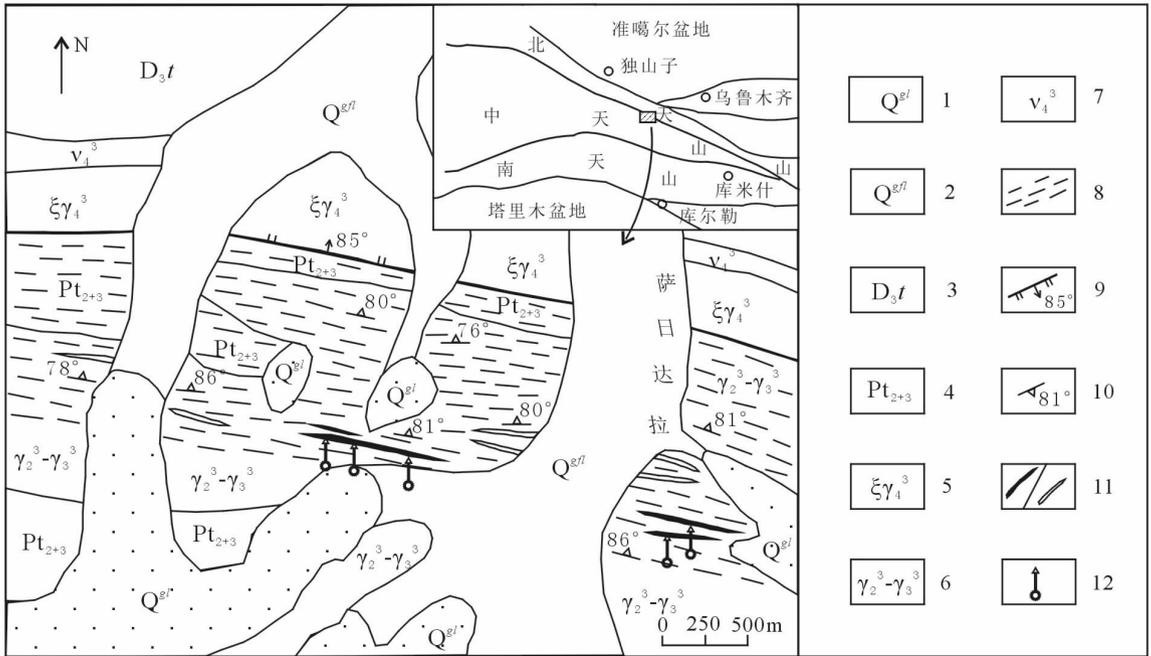
萨日达拉金矿产于冰达坂韧性剪切带的脆韧性变形域中,矿体呈脉状、透镜状,长300~600m,宽数米~数十米不等,走向近东西,产状与糜棱面理一致或小角度与之斜交,倾向 $358^{\circ}\sim 27^{\circ}$,倾角 $70^{\circ}\sim 90^{\circ}$,沿走向具胀缩现象,高品位矿体常产于中低强度应变带及不同强度应变带的过渡部位。矿体直接围岩以加里东晚期花岗岩类为主,其次为中新元古界变质岩系,均遭受韧性剪切变形改造。容矿构造以D型剪切裂隙为主,部分为P型剪切裂隙。矿石类型以钠长石化蚀变糜棱岩型为主,少量为石英脉型,蚀变分带特征明显,自矿体至围岩依次为黄铁矿化-钠长石化-绢英岩化-硅化,矿石矿物组合主要为自然金-磁黄铁矿-黄铁矿等,脉石矿物组合为钠长石-绢云母-石英-方解石等,金以裂隙金、包裹金和粒间金等多种形式赋存,主要以自然金形式产于黄铁矿、黄铁矿裂隙及脉石矿物中。

2 样品特征及分析方法

样品采自矿区开采坑道及坑口附近矿体露头,均为新鲜钠长石化蚀变糜棱岩型矿石样,样品呈灰白色,半自形-自形黄铁矿浸染状沿糜棱面理分布。矿石粉碎分离出黄铁矿单矿物后在显微镜下挑纯,纯度>99%。黄铁矿流体包裹体 He、Ar 同位素测

试在国土资源部同位素质地质开放实验室采用真空压碎法完成,测试仪器为乌克兰产 MI1201IG 型惰性气体同位素质谱仪,工作标准为北京大气($^3\text{He}/^4\text{He} = 1.4 \times 10^{-6}$)。分析过程简介如下:样品用丙酮在超声波中清洗 20min 并烘干,真空中 120℃ 去气 24h 后压碎黄铁矿样品,释放出的气体经海绵钛泵、锆铝泵、活性碳液氮冷阱 4 级纯化,除去活性气体,氦、氩

被冷冻,纯净的氦、氩进入分析系统经加液氮的钛升华泵再次纯化去除微量 H_2 、Ar,于 -78°C 释放氦,分别将氦、氩送入质谱仪进行同位素分析, ^3He 用电子倍增器接收,分辨率 1 200, ^4He 用法拉第杯接收,分辨率 760,最后根据压碎后通过的 160 目(0.100mm)的样品重量,计算样品中氦、氩含量。更详细的测试流程及说明见李延河等(2002)。



1. 冰川和冰川堆积;2. 冰水堆积;3. 上泥盆统天格尔组;4. 中新元古界变质岩系;5. 碱长花岗岩;6. 新元古代—早古生代花岗岩类;7. 基性侵入岩;8. 韧性剪切带;9. 正断层及产状;10. 糜棱面理产状;11. 金矿体/矿化体;12. 采样位置

图 1 新疆萨日达拉金矿区地质简图(大地构造单元划分据 GAO et al,1998)

Fig. 1 The geological sketch map of Saridala gold deposit in Xinjiang

3 分析结果

萨日达拉金矿黄铁矿流体包裹体氦、氩同位素测试结果及相关参数如表 1。

3.1 分析结果影响因素

影响流体包裹体初始氦、氩同位素组成的后期作用因素主要有(胡瑞忠,1997):①成矿期后热液作用改造。②寄主矿物晶格及流体包裹体内初始氦、氩扩散。③流体包裹体内放射成因新生氦、氩。④样品分析过程中同位素分馏及大气污染。

研究区宏观未见后期热液脉体穿插、叠加蚀变等改造或破坏矿体现象,矿相学观察显示矿石中载金金属矿物主要为半自形—自形热液成因黄铁矿,

不含富 Li 矿物,与金密切共生的黄铁矿的形态、晶形、分布特征等显示为同时代,薄片中与载金脉石矿物钠长石、石英共生,样品总体保留成矿期原始组成和组构,黄铁矿中流体包裹体可代表成矿期原生包裹体。黄铁矿晶格中及流体包裹体内氦、氩的扩散系数均很低(BURNAD et al.,1999),以黄铁矿为寄主矿物的流体包裹体中氦、氩的扩散丢失对氦、氩同位素组成影响很小或忽略不计(胡瑞忠,1997)。黄铁矿并非 U、Th、K 的主要赋存矿物,流体包裹体内 U、Th、K 衰变可产生很少量的 ^4He 和 ^{40}Ar ,但对于华力西期成矿而言,其对黄铁矿流体包裹体的初始氦、氩同位素比值影响甚微(申萍等,2004)。研究用样品均采自矿区坑道内或坑口附近矿体露头,未遭

表 1 萨日达拉金矿黄铁矿流体包裹体氦、氩同位素测试结果及相关参数表

Tab. 1 He-Ar isotopic compositions and som parameters of fluid inclusions in pyrite from Saridala gold deposit

样号	³ He/ ⁴ He(10 ⁻⁶)	⁴ He(10 ⁻⁷)	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	⁴⁰ Ar/ ³⁸ Ar	³⁶ Ar/ ³⁸ Ar	⁴⁰ Ar(10 ⁻⁷)	R/Ra	⁴⁰ Ar* / ⁴ He	F ⁴ He
S4-11	2.23±0.24	2.35	325±7	1 742±54	5.34±0.04	0.89	1.59	0.034	5 182
S12-12	0.48±0.13	4.34	359±1	1 959±19	5.43±0.07	0.43	0.34	0.018	21 853
SEA-29	0.59±0.16	4.30	350±1	1 904±8	5.44±0.03	0.42	0.42	0.016	21 652
3-1	0.93±0.21	2.04	339±1	1 822±4	5.40±0.02	0.25	0.66	0.015	16 657
6T-22	0.62±0.22	2.02	305±0	1 645±8	5.39±0.03	0.76	0.44	0.010	4 902

注:R 为样品³He/⁴He 值,Ra 为大气³He/⁴He 值,1Ra=1.4×10⁻⁶,⁴⁰Ar* 为扣除空气⁴⁰Ar 后的放射性成因过剩氩,F⁴He 定义为(⁴He/³⁶Ar)_{样品}/(⁴He/³⁶Ar)_{大气}=0.1655 的值。表中同位素单位为:cm³STP/g。

受宇宙成因³He 的污染。样品分析采用真空压碎法提取流体,该法几乎不对成矿流体中初始 He、Ar 同位素组成造成影响(胡瑞忠等,1997)。样品分析过程中,通过超声波清洗及真空 120℃ 去气 24h,去除次生包裹体及样品表面吸附的氦、氩。大气 He 对样品的污染可采用 F⁴He 参数(KENDRICK et al., 2001)判断,经计算样品 F⁴He 值>4 900(表 1),样品中⁴He 量是大气的 4 900 倍以上,大的 F⁴He 值表明大气污染对测试结果影响很小,同时由于氦在大气中的含量极低,不足以对地壳流体中的氦丰度和同位素组成产生明显影响(STUART et al., 1994),表明样品中氦应主要来源于地幔与地壳。

综上分析,测试结果可代表成矿流体的初始 He、Ar 同位素组成。

3.2 氦同位素组成

如表 1 所示,萨日达拉金矿黄铁矿流体包裹体中⁴He 含量较低且较均一(2.02×10⁻⁷~4.34×10⁻⁷ cm³STP/g),R/Ra 值为 0.34~1.59,介于地壳放射性成因特征值(R/Ra 值为 0.01~0.05, BAL-LENTINE et al., 2002)与地幔特征值(R/Ra 值为 6~9, STUART et al., 1995)之间。在³He-⁴He 同位素组成图解中(图 2a),样点均位于地幔氦与地壳氦之间且偏向地壳氦组成一侧,表明成矿流体中氦为地壳放射性成因 He 与地幔 He 的混合,根据二元混合模型,取典型陆下地幔 R/Ra 值为 6,地壳 R/Ra 值取均值 0.03,计算得地幔氦所占比例为 7.54%~36.85%,表明成矿流体以地壳流体为主,但有幔源物质加入。

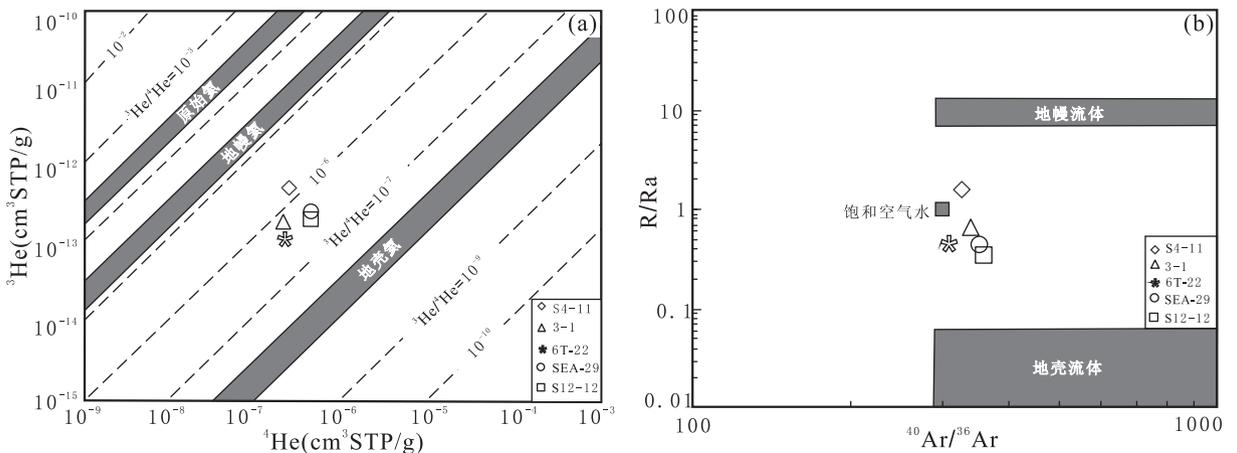


图 2 (a)萨日达拉金矿成矿流体³He-⁴He 图(底图据 MAMYRIN et al,1984)与(b)R/Ra-⁴⁰Ar/³⁶Ar 图(底图据丰成友等,2006)

Fig. 2 (a)³He-⁴He diagram and(b)R/Ra-⁴⁰Ar/³⁶Ar diagram of ore-forming fluid in Saridala gold deposit

3.3 氩同位素组成

萨日达拉样品氩浓度变化范围窄,⁴⁰Ar 含量为 0.25×10⁻⁷~0.89×10⁻⁷ cm³STP/g,氩同位素组成

较均一,⁴⁰Ar/³⁶Ar 值为 305~359,平均 336,³⁶Ar/³⁸Ar 值为 5.34~5.44,平均 5.40,接近大气氩同位素组成(⁴⁰Ar/³⁶Ar=295.5, STUART et al.,

1995; $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}=5.32$, (翟伟等, 2006), 但略偏高, 表明成矿流体中存在地壳放射性成因 ^{40}Ar 加入, 其相对含量可由下式 (KENDRICK et al., 2001) 计算:

$$^{40}\text{Ar}^* \% = [1 - 295.5 / (^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{样品}}] \times 100$$

计算结果显示, 萨日达拉金矿样品中放射性成因 ^{40}Ar 含量为 3.1%~17.7%, 大气 ^{40}Ar 贡献达 82.3%~96.9%, 表明成矿流体中 Ar 主要为大气来源, 与大气平衡的大气降水参与成矿。

由上述可见, 萨日达拉金矿黄铁矿流体包裹体中氩显示为地壳放射性成因氩与地幔氩的混合, 氩主要来源于与大气平衡的大气降水, 部分来源于容矿围岩放射性成因氩。在 $\text{R}/\text{Ra} - ^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 图中 (图 2b), 投点落入地幔流体与地壳流体之间过渡带且偏向地壳流体一侧, 表明成矿流体主要为地壳流体, 并有幔源组分参与。

4 讨论

4.1 成矿流体中的幔源组分成因与氩同位素组成异常

前述表明, 萨日达拉金矿成矿流体中有幔源组分参与, 表现在其具有高的 He 同位素组成上。研究区内无明显放射性元素 U、Th 正异常, 成矿中晚期阶段发生流体沸腾或不混溶作用 (刘春发等, 2010), 这将导致成矿流体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值降低 (胡瑞忠等, 1997a), 意味着流体包裹体被捕获前其氩同位素组成的幔源特征更明显。据已有研究, 同时具有高的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值和高含量 ^3He 为地幔流体所特有 (胡瑞忠等, 1999), 其 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值一般大于 20000 (胡瑞忠, 1997), 且不受流体沸腾作用的影响 (KENDRICK et al., 2001)。萨日达拉样品显示高的氩同位素组成和接近于大气降水的氩同位素组成, 氩、氩同位素组成不显正相关关系 (图 2b), 明显不同于地幔流体, 表明萨日达拉金矿成矿流体中所示地幔组分并非直接源于地幔, 金成矿过程中不存在幔源流体的直接参与, 而应是大气降水深循环至地壳深部, 与先期幔源或壳幔混合成因地质体作用所致, 由于幔源地质体具有与地幔流体接近的 He、Ar 同位素组成, 因此大气降水与之作用所继承的 He、Ar 同位素比值仍很高。已有研究表明, 富水的地壳流体渗透深度可达十几至几十千米 (胡文宣等, 2001), 大气降水下渗可至剪切带的脆-韧性变形过渡域 (SIBSON, 1977), 因此可以认为具有幔源 He 同位素组成的深部地质体更可能是壳幔混合成因, 成矿是地

壳尺度内作用, 而无同期地幔作用。

萨日达拉金矿成矿流体中放射性成因 ^{40}Ar 相对含量为 3.1%~17.7%, 由于流体沸腾作用并不导致 Ar 同位素比值变化, 地壳中几乎不产生放射性成因 ^{36}Ar , 因此萨日达拉金矿成矿流体中 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 相对大气降水值略微偏高, 原因在于成矿前水-岩作用过程, 表明具有大气成因 Ar 同位素组成 ($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}=295.5$) 的大气降水下渗获取容矿围岩中部分放射性成因 ^{40}Ar , 导致 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值升高, 形成改造后的饱和空气水即地壳流体。

萨日达拉金矿成矿流体 $^{40}\text{Ar}^*/^4\text{He}$ 值为 0.010~0.034 (均值为 0.019, 表 1), 低于地壳流体均值 (0.156, 胡瑞忠等, 1999)。由于同一矿物中氩比氦更容易丢失, 样品流体包裹体中 $^{40}\text{Ar}^*/^4\text{He}$ 值的降低不可能是氩丢失引起, 而是 ^4He 含量增加所致。TORGERSEN 等 (1989) 研究认为, 现代地下水 $^{40}\text{Ar}^*/^4\text{He}$ 值的降低是地下水从流经岩石中相对 ^{40}Ar 优先获取 ^4He 的结果, 这与 Ar 和 He 的封闭温度有关。对大多数矿物而言, 其对 Ar 的封闭温度高于 He, ^{40}Ar 主要赋存于富钾矿物云母及钾长石中, 前者 Ar 封闭温度为 300~350°C (MCDUGALL et al., 1999), 后者 $\leq 200^\circ\text{C}$, ^4He 主要赋存于富 U、Th 矿物中, 其封闭温度 $< 200^\circ\text{C}$, 同等温度条件下矿物更易扩散丢失 He, 大气降水下渗优先获得 ^4He (STUART et al., 1995)。王居里 (2011) 的研究结果表明, 萨日达拉金矿成矿流体均一温度集中于 170~350°C, 并可见钠长石交代钾长石、云母等; 刘春发等 (2010) 对石英流体包裹体的测温结果显示主成矿阶段均一温度约为 255~475°C。在上述温度区间内, 富钾矿物对 Ar 封闭或部分开放, 而 He 活性更强, 大气降水下渗流经高 K、U、Th 含量的浅部容矿花岗质糜棱岩类及深部壳幔混合成因地质体, 获取热力及交代作用下从矿物晶格中扩散出的 ^4He , 导致成矿流体的 $^{40}\text{Ar}^*/^4\text{He}$ 值较地壳流体特征值降低。

4.2 成矿流体演化

前已述及, 萨日达拉金矿为受控于构造的韧性剪切带型金矿, 成矿流体为大气降水深循环而成的地壳流体, 且未显示叠加或二次富集成矿特征, 因而其演化必然经历地表下渗、地壳深部循环及上升至地壳浅层次等 3 个过程。

综上所述, 萨日达拉金矿成矿流体演化可概述如下: 华力西晚期, 冰达坂韧性剪切带开始活动, 具有大气 Ar 同位素组成的初始大气降水沿剪切带内脆-韧性变形域上部脆性构造下渗, 与花岗质容矿

围岩及深部壳幔混合成因地质体等发生不均匀水—岩作用,继承其 He 同位素组成及部分放射性成因 ^{40}Ar ,改造而成地壳流体。后循环上升至脆韧性变形域内,流体发生构造减压沸腾作用,使得继承的幔源 He 同位素特征减弱,从而使捕获的流体包裹体具有以地壳放射性为主并继承有幔源特征的 He 同位素组成及叠加有放射性成因 Ar 同位素组成的大气降水成因 Ar 同位素组成。萨日达拉金矿成矿流体为大气降水深循环的产物,成矿流体中并无地幔流体直接参与。

同时,考虑到载金黄铁矿与金矿物的同世代性,大气降水深循环至地壳深部发生水—岩作用的同时,伴有对成矿物质的活化、萃取,表明暗示萨日达拉金矿成矿物质应主要来源于地壳,深循环大气降水作用的地质体即构成矿质主要来源,成矿流体发生构造减压沸腾的过程中,矿质在中低强度应变带及不同强度应变带的过渡部位通过交代、充填等作用卸载、成矿。

5 结论

(1)萨日达拉金矿成矿流体中氦为地壳放射性成因氦与地幔氦的混合,氩为大气降水氩与少量地壳放射性成因氩的混合,成矿流体为由大气降水改造而成的地壳流体。

(2)萨日达拉金矿成矿流体中的幔源氦并不直接来自地幔,而是间接继承自先期定位于下部地壳中的隐伏壳幔混合成因地质体,成矿流体为大气降水深循环作用的产物。

(3)大气降水深循环所形成的初始成矿流体,上升至剪切带内脆韧性变形域发生构造减压沸腾作用,形成演化成矿流体,在中低强度应变带及不同强度应变带的过渡部位发生交代、充填及成矿,成矿物质应主要来源于地壳。

参考文献(References):

陈衍景,李欣,靖军,等.新疆望峰金矿成矿流体研究及其成因意义[J].地球学报,1998,19(2):195-203.

CHEN Yanjing, LI Xin, JING Jun, et al. Study of ore-forming fluid for the Wangfeng gold deposit of Xinjiang and its genetic implication[J]. Acta Geoscientica Sinica, 1998, 19(2): 195-203 (in Chinese with English abstract).

丰成友,余宏全,张德全,等.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[J].地质学报,2006,80(9):1465-1473.

FENG Chengyou, SHE Hongquan, ZHANG Dequan, et al. Helium, Argon, Sulfur and Lead isotope tracing for sources of ore-forming material in the Tuolugou cobalt(gold) deposit, Golmud City, Qinghai Province, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(9): 1465-1473(in Chinese with English abstract).

胡瑞忠.成矿流体氦、氩同位素地球化学[J].矿物岩石地球化学通报,1997,16(2):120-124.

HU Ruizhong. Helium and Argon isotopic geochemistry of ore-forming fluid[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1997, 16(2): 120-124(in Chinese).

胡瑞忠,毕献武,邵树勋,等.云南马厂箐铜矿床氦同位素组成研究[J].科学通报,1997a,42(14):1542-1545.

HU Ruizhong, BI Xianwu, SHAO Shuxun, et al. Study on Helium isotopic compositions of the Machangjing copper deposit, Yunnan Province[J]. Chinese Science Bulletin, 1997a, 42(14): 1542-1545(in Chinese).

胡瑞忠,毕献武, TUMER G, 等.马厂箐铜矿床黄铁矿流体包裹体 He-Ar 同位素体系[J].中国科学(D辑),1997b,27(6):503-508.

HU Ruizhong, BI Xianwu, TUMER G, et al. He-Ar isotopic system of ore-forming fluids in pyrites in Machangjing deposit[J]. Science in China (Series D), 1997b, 27(6): 503-508 (in Chinese with English abstract).

胡瑞忠,毕献武, TUMER G, 等.哀牢山金矿带金成矿流体 He 和 Ar 同位素地球化学[J].中国科学(D辑),1999,29(4):321-330.

HU Ruizhong, BI Xianwu, TUMER G, et al. He-Ar isotopic system of ore-forming fluids in Ailaoshan gold ore-belt[J]. Science in China (Series D), 1999, 29(4): 321-330 (in Chinese with English abstract).

胡文宣,孙睿,张文兰,等.金矿成矿流体特点及深-浅部流体相互作用成矿机制[J].地学前缘,2001,8(4):281-288.

HU Wenxuan, SUN Rui, ZHANG Wenlan, et al. Characteristics of gold ore-forming fluids and metallogenic process by mutual mixing and acting of deep-derived fluids and shallow-seeped ones[J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(4): 281-288(in Chinese with English abstract).

李新峰,张鸿剑,赵春环,等.萨日达拉金矿成矿特征及成因探讨[J].新疆地质,2005,23(2):140-145.

LI Xinfeng, ZHANG Hongjian, ZHAO Chunhuan, et al. Characteristics of gold mineralization at the Saridala gold deposit, Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 2005, 23(2): 140-145(in Chinese with English abstract).

李延河,李金城,宋鹤彬,等.矿物流体包裹体的氦同位素

- 分析及地质应用[J]. 矿床地质, 2002, 21(增刊): 982-985.
- LI Yanhe, LI Jincheng, SONG Hebin, et al. Helium isotope measurement of fluid inclusions and its geological applications[J]. Mineral Deposits, 2002, 21(supp.): 982-985(in Chinese).
- 刘春发, 张莉, 郑义. 新疆萨日达拉金矿床成矿流体特征及地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(10): 3036-3046.
- LIU Chunfa, ZHANG Li, ZHENG Yi. Characteristics of ore fluids of the Saridala gold deposit, Xinjiang and its geological significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(10): 3036-3046(in Chinese with English abstract).
- 申萍, 沈远超, 曾庆栋, 等. 新疆萨乌尔金矿带成矿流体氦氩同位素示踪 [J]. 科学通报, 2004, 49(12): 1199-1204.
- SHEN Ping, SHEN Yuanchao, ZENG Qingdong, et al. Helium and Argon isotopic compositions of the Sawuer mineralization zone, Xinjiang[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(12): 1199-1204(in Chinese).
- 王居里, 刘养杰, 周鼎武, 等. 新疆萨日达拉金矿地质特征及成因探讨[J]. 矿床地质, 2001, 20(4): 385-393.
- WANG Juli, LIU Yangjie, ZHOU Dingwu, et al. Geological features and origin of Saridala gold deposit, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 2001, 20(4): 385-393 (in Chinese with English abstract).
- 王居里, 刘养杰. 新疆胜利达坂地区韧性剪切带型金矿特征及找矿思路[J]. 矿床地质, 2002, 21(增刊): 670-673.
- WANG Juli, LIU Yangjie. Characteristics and prospecting suggestion of ductile shear zone type gold deposit in Shenglidaban Area, Xinjiang [J]. Mineral Deposits, 2002, 21(suppl.): 670-673(in Chinese with English abstract).
- 王居里, 王守敬, 柳小明. 新疆天格尔地区碱长花岗岩的地球化学、年代学及其地质意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(4): 925-933.
- WANG Juli, WANG Shoujing, LIU Xiaoming. Geochemistry, geochronology and geological significance of alkali-feldspar granite from Tianger area, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(4): 925-933 (in Chinese with English abstract).
- 王先彬. 稀有气体同位素地球化学和宇宙化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 1-451.
- WANG Xianbin. Noble gas isotopic geochemistry and cosmochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1989: 1-451.
- 杨猛, 王居里, 王建其, 等. 新疆望峰金矿成矿流体的 He、Ar 同位素示踪[J]. 地球学报, 2012, 33(5): 794-800.
- YANG Meng, WANG juli, WANG Jianqi, et al. Helium and argon isotopic tracing of ore-forming fluid from the Wangfeng gold deposit in Xinjiang[J]. Acta Geoscientifica Sinica, 2012, 33(5): 794-800(in Chinese with English abstract).
- 翟伟, 孙晓明, 贺小平, 等. 新疆阿希低硫型稀有气体同位素地球化学及其成矿意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(10): 2590-2596.
- ZHAI Wei, SUN Xiaoming, HE Xiaoping, et al. Noble gas isotopic geochemistry of Axi gold deposit and its metallogenic implications, Xinjiang, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(10): 2590-2596(in Chinese with English abstract).
- BALLENTINE C J, BURGESS R and MARRY B. Tracing fluid origin, transport and interaction in the crust, Collection in Noble Gases in Geochemistry and Cosmochemistry[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2002, 47(1): 539-614.
- BUMARD P G, HU RZ, TUMER G, et al. Mantle, crustal and atmospheric noble gases in Ailaoshan Gold deposits, Yunnan Province, China[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(10): 1595-1604.
- GAO J, LI MS, XIAO XC, et al. 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China [J]. Tectonophysics, 287: 213-231.
- KENDRICK M A, BURGESS R, PATTRICK R A D, et al. Fluid inclusion noble gas and halogen evidence on the origin of Cu porphyry mineralizing fluids [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(16): 2651-2668.
- MAMYRIN B A, TOLSTIKHIN L N. Helium isotope in Nature [C]//Fyfe W S, (ed.). Developments in geochemistry[J]. Elsevier, Amsterdam, 1984: 273.
- MCDUGALL I, HARRISON T M. Geochronology and thermochronology by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Method[M]. Oxford: Oxford University Press(2nd ed.), 1999: 269.
- SIBSON R H. Fault rocks and fault mechanism[J]. Journal of the Geological Society of London, 1977, 133(3): 191-213.
- STUART F M, BUNARD P G, TAYLOR R P, et al. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluids: He-Ar isotopes in fluid inclusions from Dae Hwa W-Mo mineralization, South Korea[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(22): 4663-4673.
- STUART F M, TUMER G, DUCKWORTH R C, et al. Helium isotopes as tracers of trapped hydrothermal fluids in ocean-floor sulfides [J]. Geology, 1994, 22: 823-826.
- TORGERSEN T, KENNEDY B M, HIYAGON H, et al. Argon accumulation and the crustal degassing flux of ^{40}Ar in the Great Artesian Basin, Australia[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1989, 92(1): 43-56.