

胶西北金成矿区 He、Ar 同位素组成及成矿流体来源研究

王金辉

(山东省地质调查院, 山东 济南 250014)

摘要: 胶东半岛西北地区是我国重要的金成矿区, 主要受三山岛断裂、焦家断裂、招平断裂带控制。为探讨3条主要成矿带成矿流体的来源与区别, 对成矿带内典型矿床载金黄铁矿中流体包裹体进行了 He、Ar 同位素测试。结合前人数据表明三山岛成矿带 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 均值为 1.95 Ra, 焦家成矿带 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 均值为 1.74 Ra, 招平成矿带 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 均值为 1.54 Ra, 从西往东逐渐降低, 说明地幔流体参与成矿自西往东逐渐降低。黄铁矿流体包裹体中放射性成因 Ar 所占比例范围三山岛成矿带 1.17%~87.12%, 平均 33.04%, 焦家成矿带 15.57%~90.00%, 平均 55.75%, 招平成矿带 7.94%~92.69%, 平均 44.23%, 说明在成矿过程中, 地壳成矿流体参与成矿作用焦家成矿带最高, 招平成矿带次之, 三山岛成矿带最低。结合 H、O 稳定同位素研究, 认为成矿流体主要来源于地壳, 并有地幔流体加入, 具地壳流体和地幔流体混合特征, 上升过程中可能还有少量大气降水的参与。

关键词: He、Ar 同位素; 成矿流体; 金成矿区; 胶西北

中图分类号: P618.51; P597.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2020)02-0172-11

A study of the He-Ar isotopic composition and the source of metallogenic fluid in the gold concentration area of Northwestern Jiaodong

WANG Jin-hui

(Shandong Institute of Geological Survey, Jinan 250014, China)

Abstract: The Jiaodong gold province contains more than 4 000 tons of gold reserves and is hence the most important gold-producing area in China. The gold deposits are mainly controlled by the NE-striking Sanshandao, Jiaojia, and Zhaoping faults from west to east, and form three gold metallogenic belts. In order to explore the source of ore-forming fluids in these metallogenic belts, the authors investigated He and Ar isotopes of fluid inclusions in the gold-bearing pyrite from several typical deposits, and the results show that the mean ratio of $^3\text{He}/^4\text{He}$ is 1.95 Ra in the Sanshandao belt, 1.74 Ra in the Jiaojia belt, and 1.54 Ra in the Zhaoping belt, with a decreasing trend from west to east. The values of radioactive Ar are 1.17%~87.12% (averagely 33.04%) in Sanshandao, 15.57%~90.00% (averagely 55.75%) in Jiaojia, and 7.94%~92.69% (averagely 44.23%) in Zhaoping, suggesting that the highest contribution of crustal fluids was from Jiaojia, the medium contribution was from Zhaoping, and the lowest contribution was from Sanshandao. Combined with H-O isotopic data, the authors hold that the ore-forming fluids in the Jiaodong gold province were mainly mixed crust-derived and mantle-derived fluids, with possible contribution of meteoric water during the fluid ascending.

Key words: He, Ar isotopes; ore-forming fluids; gold concentration area; northwestern Jiaodong

收稿日期: 2019-10-28; 接受日期: 2020-02-08; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0600107, 2017YFC0601506); 地质矿产调查项目(12120113060500, 12120113060400)

作者简介: 王金辉(1979-), 男, 高级工程师, 主要从事地质矿产勘查与研究, E-mail: 565058931@qq.com.

Fund support: National Key Research and Development Plan (2016YFC0600107, 2017YFC0601506); Special Geological and Mineral Investigation Project (12120113060500, 12120113060400)

胶西北金成矿区位于胶东半岛的西北部,截至目前累计查明金资源储量超过 4 000 t,成为继南非兰德和乌兹别克斯坦穆龙套之后的世界第三大岩金成矿区(宋明春, 2015),金矿床主要沿三山岛断裂带、焦家断裂带和招平断裂带 3 条断裂带分布,成因类型主要有焦家式破碎带蚀变岩型和玲珑式石英脉型(李士先等, 2007)。金矿主成矿期成矿时代为 120 Ma 左右(杨进辉等, 2000; 李厚民等, 2003; 宋明春等, 2011),与早白垩世岩石圈拉张减薄的峰期时代一致(翟明国等, 2004; 宋明春等, 2011)。

前人对胶西北金成矿区成矿热液来源进行了大量的深入研究,但在矿床成因方面存在着巨大的分歧,主要有以下几种观点:变质热液(沈保丰等, 1994)、岩浆期后热液(李士先等, 2007)、大气降水(卢焕章等, 1999)、岩浆热液为主后期大气降水加入(林文蔚等, 1998)、与中基性脉岩有关的幔源流体(范宏瑞等, 2005)、地幔流体参与了金矿的成矿作用(杨进辉等, 2000; 张连昌等, 2002; 邓军等, 2004; 毛景文等, 2005)等。

稀有气体尤其是 He、Ar 具有化学性质不活泼及不同源区的同位素组成差异明显等特点,被广泛应用于金矿成矿流体来源及成矿机制研究(胡瑞忠, 1997; 毛景文等, 2000; 张连昌等, 2002; 张运强等, 2012; 杨猛等, 2012; 薛建玲等, 2013; 焦学尧等, 2016; 何阳阳等, 2017)。前人对焦家金矿床及招平金成矿带北段的玲珑金矿均进行了 He、Ar 同位素研究(张连昌等, 2002; 毛景文等, 2005),但是按照 3 条断裂成矿带来系统对比研究的基本上没有,不同断裂带控制下的矿床的成矿流体是否有差异?其对成矿作用又有什么指示意义?这对于深入了解研究大区的成矿作用及流体来源有重要意义。本文通过对招平金成矿带中南段的姜家窑金矿床、曹家洼金矿床和近年来新发现的三山岛成矿带的三山岛北部海域金矿床、焦家深部的纱岭金矿床矿石样品的载金黄铁矿中流体包裹体进行 He、Ar 同位素测试,结合前人在该地区其它矿床取得的 He、Ar 同位素数据,在分析后期地质作用对成矿流体初始 He、Ar 同位素造成的影响上,对胶西北金成矿区 3 条主要成矿带内金矿成矿流体进行示踪,探讨成矿流体的来源差异。

1 区域地质矿产特征

胶东地区位于华北克拉通东南部,郯庐断裂之东侧。区内分布着众多超大、中型金矿床,组成了举世闻名的胶东金矿集中区。胶西北金成矿区位于胶东金矿集中区西北部,是其主要组成部分。区内金矿类型主要有焦家式破碎带蚀变岩型和玲珑式石英脉型,均根据胶西北金成矿区典型矿床命名。焦家式破碎带蚀变岩型金矿床主要分布在三山岛金成矿带、焦家金成矿带和招平金成矿带中南段,矿床受规模较大的区域性断裂三山岛断裂、焦家断裂和招平断裂控制。玲珑式石英脉型金矿主要分布于招平金成矿带北段,矿床受招平断裂伴生、派生断裂控制,倾角陡,矿体呈高角度倾斜。

胶西北地层岩体主要有前寒武纪变质岩系和中-新生代地质体组成。前寒武纪变质岩系包括新太古代 TTG 质片麻岩,少量变辉长岩(斜长角闪岩)、中太古代唐家庄岩群及古元古代荆山群,新太古代胶东岩群呈残留包体出现。中生代岩体有侏罗纪玲珑花岗岩、白垩纪郭家岭型花岗岩、伟德山型花岗岩(艾山岩体和南宿岩体)、崂山型花岗岩(大泽山岩体)和酸性、中-基性脉岩,其中以侏罗纪玲珑花岗岩为主。新生代地质体为第四纪松散沉积层,沿海边和河流分布(图 1)。区域内 NE 向断裂发育,自西向东分别为三山岛断裂(F_1)、焦家断裂(F_2)、招平断裂(F_3),具有多期、多阶段活动性,控制着蚀变带及金矿床的空间定位,金矿床严格受三条断裂及其次级断裂控制,沿断裂呈串珠状分布。

三山岛断裂位于陆地上北起三山岛,南至仓上-潘家屋子一带,向南、北两端均延伸入渤海,陆地长度为 12 km,宽 20~400 m 不等,走向 $40^\circ\sim 50^\circ$,倾向 SE,倾角 $30^\circ\sim 40^\circ$,局部达 80° 。断裂在平面上呈“S”形延伸,形态不规则。自南向北控制着仓上、新立、三山岛、西岭、北部海域等金矿床,皆达大型或特大型规模,累计查明金资源储量大于 1 200 t(于学峰等, 2016)。

焦家断裂南端起始于莱州市紫罗姬家,北到龙口市姚家,控制长度约 60 km,宽度 50~500 m,倾向 NW,倾角 $30^\circ\sim 50^\circ$,局部达 78° 。断裂在平面上呈

“S”形展布,形态不规则,局部膨缩,断裂下盘发育与走向平行或呈“入”字形相交的次级断裂。焦家、新城、寺庄、望儿山、河西等金矿床均受焦家断裂或其

下盘次级断裂控制。近年在深部发现纱岭、腾家、朱郭李家、招贤等大型-特大型矿床。目前已探获金资源储量1 400 t(于学峰等, 2016)。

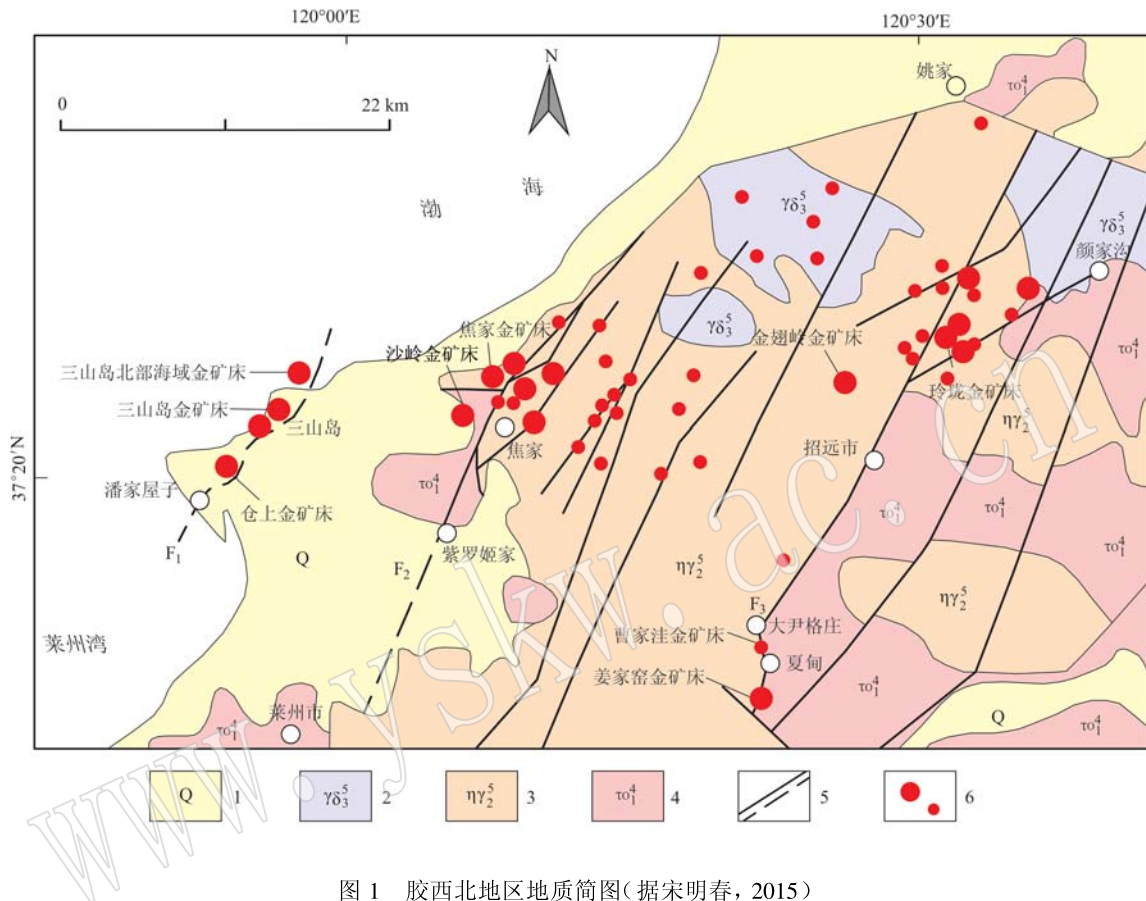


图1 胶西北地区地质简图(据宋明春, 2015)

Fig. 1 Simplified geological map of northwestern Jiaodong area(after Song Mingchun, 2015)

1—第四系; 2—郭家岭型花岗岩; 3—玲珑型花岗岩; 4—新太古代变质岩系; 5—断裂; 6—金矿位置; F₁—三山岛断裂; F₂—焦家断裂; F₃—招平断裂

1—Quaternary; 2—Guojialing type granite; 3—Linglong type granite; 4—Neoproterozoic metamorphic rock complex; 5—fault; 6—gold position; F₁—Sanshandao fault; F₂—Jiaojia fault; F₃—Zhaoping fault

招平断裂是区内规模最大的控矿断裂,南起平度宋格庄,向北经夏甸、大尹格庄、招远城区,抵玲珑矿田,由玲珑向北转为NE向至龙口市颜家沟,长约120 km,总体呈NNE向“S”形展布。按展布方向及矿化特征分为北、中、南三段,北段颜家沟-丁家庄子段(又称破头青断裂),走向50°~70°,带宽40~300 m,最宽800 m;中段招远城-夏甸段,走向10°~20°,宽30~60 m,最宽80 m;南段为山后-山旺段(刘述敏等, 2016)。招平断裂带北段及其下盘的次级断裂控制着玲珑金矿田,有玲珑、台上、东风、水旺庄、阜山、滦家河等大型-特大型金矿床;中段分布有大尹格庄-夏甸金矿田,有大尹格庄、夏甸、姜家窑、曹

家洼、山后等特大型-中型金矿床;南段主断裂上矿化较弱,仅有南墅、下庄、山旺等小型金矿,下盘的次级断裂控制着旧店金矿田。成矿带累计查明金资源储量大于1 100 t(于学峰等, 2016)。

2 样品及分析方法

本次研究用于He-Ar同位素测试的黄铁矿样品分3个断裂带采集。三山岛成矿带样品来自于北部海域金矿床、三山岛金矿床、仓上金矿床;焦家成矿带样品来自于纱岭金矿床、焦家金矿床;招平成矿带样品来自于姜家窑金矿床、曹家洼金矿床、玲珑金矿

床、金翅岭金矿床。其中北部海域金矿床、沙岭金矿床、姜家窑金矿床及曹家洼金矿床数据为本次分析,其余为搜集前人测试数据。

研究样品在河北区域地质调查所实验测试中心经破碎、筛选后,在双目镜下挑选 40~60 目的新鲜、晶形完好黄铁矿颗粒,纯度达 99% 以上。

He-Ar 同位素测试由中国地质科学院矿产资源研究所完成。采用 Helix SFT 稀有气体质谱仪测试,系统由压碎、纯化和质谱系统组成。测试在高真空下完成,压碎和纯化系统真空 $n \times 10^{-7}$ Pa,质谱系统真空在 $n \times 10^{-8}$ Pa。质谱离子源采用 Nier,灵敏度对 He 在 800 μ A 阱电流时好于 2×10^{-4} amps/Torr,对 Ar 在 200 μ A 阱电流时好于 1×10^{-3} amps/Torr。 ^{40}Ar 静态上升率小于 1×10^{-12} cm^3 STP/min, ^{36}Ar 本底小于 5×10^{-14} cm^3 STP。法拉第杯分辨率 >400,离子计数器分辨率 >700,可将 ^3He 与 ^4He 、HD + H^3+ 与 ^3He 峰完全分开。详细的测试流程及说明参见叶先仁等(2001)。

H、O 同位素分析测试由中科院地质与地球物理研究所稳定同位素地球化学实验室测试完成。硅酸盐的氧同位素分析分析方法为:称取 200 且干燥的硅酸盐或氧化物或全岩样品 10~30 mg,在真空条件下,于 550~700 $^{\circ}\text{C}$ 与纯净的 BrF_5 恒温反应释放出氧气。用组合冷阱分离生成的 SiF_4 、 BrF_3 等杂质组分。令纯化后的氧气在 700 $^{\circ}\text{C}$ 铂催化作用下,与碳棒逐级反应生成二氧化碳(CO_2)。将纯净的二氧化碳导入 Finnigan Delta S 型质谱仪中测定其同位素比值。分析测试误差好于 0.2‰。包体中氢同位素分析方法为:在高真空约 10^{-3} Pa 条件下,通过加热(温度为 600 $^{\circ}\text{C}$)将包体充分爆裂,将水之外的杂气去除。在真空中用干冰将包体中水冻住并引入金属铬反应器中。在温度 800 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下,包体水进入铬反应器转变为氢气。将氢气导入 Finnigan MAT 252 型质谱仪中进行氢同位素的测量。分析测试误差好于 3‰。

3 测试结果与讨论

3.1 分析结果

将本次研究测试的 10 件和前人的 31 件金矿床黄铁矿流体包裹体 He、Ar 同位素组成及相关计算参数一并列入表 1。

从表 1 中可以发现 ^4He 含量变化较大,为 $0.12 \times 10^{-7} \sim 10.68 \times 10^{-7}$ cm^3 STP/g, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 0.09~7.14 Ra,平均为 1.54 Ra。三山岛带 ^4He 含量从极

少到 8.06×10^{-7} cm^3 STP/g, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 1.04~7.14 Ra,平均为 1.95 Ra;焦家带 ^4He 含量为 $2.33 \times 10^{-7} \sim 10.68 \times 10^{-7}$ cm^3 STP/g, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 0.76~2.36 Ra,平均为 1.74 Ra;招平带 ^4He 含量为 $1.62 \times 10^{-7} \sim 10.65 \times 10^{-7}$ cm^3 STP/g, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 0.09~1.98 Ra,平均为 1.17 Ra。 ^{40}Ar 的变化范围为 $0.51 \times 10^{-7} \sim 25.34 \times 10^{-7}$ cm^3 STP/g,其中三山岛带变化范围 $0.51 \times 10^{-7} \sim 23.14 \times 10^{-7}$ cm^3 STP/g;焦家带变化范围 $2.94 \times 10^{-7} \sim 25.34 \times 10^{-7}$ cm^3 STP/g;招平带变化范围 $1.35 \times 10^{-7} \sim 16.99 \times 10^{-7}$ cm^3 STP/g。 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值变化范围为 284~4 042.6,平均为 848.6。其中三山岛带变化范围 284~2 295,平均为 614.63;焦家带变化范围 350~2 955.3,平均为 1 117.35;招平带变化范围 321~4 042.6,平均值 840.43。 $^{40}\text{Ar}^E/^4\text{He}$ 值为 0.029 6~1.89,其中三山岛带变化范围 0.36~1.89,平均为 0.88;焦家带变化范围 0.09~1.15,平均为 0.59;招平带变化范围 0.029 6~0.960 2,平均为 0.56。

3.2 影响因素分析

胶西北金成矿区中,黄铁矿为金矿主要载金矿物,黄铁矿相比较其他矿物不易发生漏气,因此,其是流体包裹体 He、Ar 同位素研究最理想的测试对象,并能反映成矿期成矿流体的原始信息(Stuart *et al.*, 1995; 胡瑞忠等, 1997b, 1999; Hu *et al.*, 1998)。一些后期作用可能对流体包裹体初始 He、Ar 同位素组成有影响,包括:① 成矿后热液改造,② 矿物晶格及流体包裹体内 He、Ar 扩散或新生放射性成因 He、Ar 加入,③ 样品分析过程中同位素分馏及大气污染(胡瑞忠, 1997)。

对于第①种情况,本次所测试的黄铁矿晶形完好,未变形,无明显的后期改造,说明黄铁矿流体包裹体中的 He 在流体包裹体被圈闭后无明显的丢失(Baptiste and Fouquet, 1996)。对于第②种情况,胶西北成矿区内黄铁矿为不含钾矿物,U、Th 含量也极低,故放射成因 ^{40}Ar 的含量可以忽略不计(Qiu and Groves, 1999);另外放射成因的 ^{40}Ar 也难以进入流体包裹体中,晶格中由放射性元素衰变产生的 ^4He 很难进入包裹体(胡瑞忠等, 1998; 薛春纪等, 2003);胶西北成矿区岩石中缺乏含锂矿物,由其产生的放射性成因 ^3He 的后生叠加影响可排除(胡瑞忠等, 1998)。黄铁矿晶格及流体包裹体内 He、Ar 的扩散系数均很低(Burnard *et al.*, 1999),以黄铁矿为载体的流体包裹体中 He、Ar 的扩散丢失对 He、Ar

表1 胶西北地区金矿黄铁矿中流体包裹体的He、Ar同位素组成

Table 1 He, Ar isotopic composition of fluid inclusions in pyrite from the gold deposits in northwestern Jiaodong area

矿床	样品号	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$	$^3\text{He}/^4\text{He}$ (10^{-6})	$^{40}\text{Ar}(\times 10^{-7})$ $\text{cm}^3\text{STP/g}$	$^4\text{He}(\times 10^{-7})$ $\text{cm}^3\text{STP/g}$	R/Ra	$^{40}\text{Ar}^*$ (%)	F ^4He	$^{40}\text{Ar}^{\text{E}}/^4\text{He}$	幔源 He(%)	数据来源
三山岛带 北部海域	ZH2	1 296.6±3.1	5.22±0.02	1.833±0.56	6.63	3.28	1.31	77.21	3 876	1.56	16.51	本文
	ZH7	2 295±5.4	5.31±0.03	2.019±0.54	10.33	4.75	1.44	87.12	6 376	1.89	18.21	
三山岛带 三山岛	SS-375-2	397±1	5.58±0.01	2.32±0.63	16.29	3.91	1.66	25.57	575.77	1.06	20.95	毛景文 等, 2005
	SS-375-6	304±2	5.50±0.04	10.0±3.10	4.13	0.12	7.14	2.80	53.37	0.92	90.89	
	SS-435-1	299±3	5.49±0.08	—	0.51	极少	—	1.17	—	—	—	
	SS-70-13	495±3	5.55±0.02	1.71±0.20	7.18	5.34	1.22	40.30	2 224.45	0.54	15.39	
	SSD2	396±2	5.49±0.03	3.08±0.19	9.29	4.67	2.20	25.38	1 202.81	0.50	27.87	
三山岛带 仓上	Csh1	425±2	5.57±0.02	2.29±0.41	5.70	2.11	1.64	30.47	950.60	0.82	20.67	毛景文 等, 2005
	Csh2	382±1	5.63±0.04	1.56±0.09	14.21	5.27	1.11	22.64	856.02	0.61	14.03	
	Csh5	284±2	5.32±0.00	1.91±0.28	23.14	1.31	1.36	0.00	97.15	—	17.21	
	Csh6	445±1	5.58±0.05	1.82±0.14	8.66	8.06	1.30	33.60	2 502.53	0.36	16.39	
	Csh7	357±2	5.69±0.30	1.45±0.13	16.69	4.88	1.04	17.23	630.72	0.58	13.02	
焦家带 纱岭	J2	1 968.1±7.8	5.29±0.03	2.026±0.98	6.08	7.04	1.45	84.99	13 769	0.73	18.27	本文
	J3	2 955.3±11.9	5.28±0.12	3.021±1.10	8.43	7.01	2.16	90.00	14 849	1.08	27.33	
	J5	2 580.5±12.5	5.33±0.05	2.371±0.91	3.09	5.38	1.69	88.55	27 147	0.51	21.41	
焦家带 焦家	MB16	679±23	—	3.3±0.3	—	10.68	2.36	56.48	—	0.09	29.87	张连昌 等, 2002
	JJA-15	500±25	—	3.0±0.2	—	7.52	2.14	40.90	—	0.51	27.14	
	JCH20	1 148±80	—	2.3±0.2	—	3.91	1.64	74.26	—	0.32	20.77	
焦家带 焦家	JJ-190-2	719±19	5.29±0.11	2.51±0.38	2.94	2.33	1.79	58.90	3 443.02	0.74	22.68	毛景文 等, 2005
	JJ-190-10	512±1	5.44±0.01	3.02±0.47	25.34	9.32	2.16	42.29	1 137.84	1.15	27.32	
	JJ-190-13	363±4	5.56±0.02	1.33±0.28	13.61	7.27	0.95	18.60	1 171.62	0.35	11.93	
	JJ-190-14	516±2	5.46±0.01	2.86±0.52	5.50	3.22	2.04	42.73	1 825.35	0.73	25.87	
	Jjia3	350±2	5.46±0.01	1.06±0.21	6.59	4.12	0.76	15.57	1 322.15	0.25	9.47	
招平带 姜家窑	K3	623.6±1.2	5.35±0.04	2.776±1.31	1.35	1.65	1.98	52.61	4 605	0.43	25.10	本文
	K7	740.4±1.8	5.35±0.03	1.834±2.01	2.96	3.11	1.31	60.09	4 700	0.57	16.52	
招平带 曹家洼	K12	732.8±6.0	5.36±0.02	2.702±0.88	5.11	6.41	1.93	82.95	13 134	0.66	24.43	本文
	K14	1 957.8±3.1	5.31±0.02	2.009±0.95	3.91	5.01	1.44	84.91	15 158	0.66	18.11	
	K20	902.4±6.5	5.32±0.02	2.644±1.50	4.99	4.16	1.89	67.25	4 546	0.81	23.90	
招平带 金翅岭	YT-110-4	383.7	—	—	7.73	3.69	0.80	22.99	1 109	0.481 5	10.02	张旭等, 2012
	YT-110-8	448.5	—	—	7.29	2.59	1.51	34.11	960	0.960 2	19.07	
	YT-110-10	456.1	—	—	5.77	2.48	1.47	35.21	1 180	0.819 2	18.56	
	YT-190-21	365.9	—	—	1.64	10.65	0.09	19.24	14 300	0.029 6	0.97	
	YT-190-23	4 042.6	—	—	3.38	9.62	0.22	92.69	72 659	0.325 7	2.62	
	YT-270-3	530.6	—	—	4.17	6.40	0.56	44.31	4 895	0.288 7	6.96	
	YT-380-5	453.5	—	—	9.71	8.57	0.73	34.84	2 420	0.394 7	9.13	
	YT-380-8	502.9	—	—	3.75	6.66	0.37	41.24	5 366	0.232 2	4.54	
招平带 玲珑	LL-190-1	321±0	5.59±0.02	1.51±0.28	10.69	1.66	1.08	7.94	301.19	0.50	13.57	毛景文 等, 2005
	LL-190-47-4	420±5	5.49±0.03	2.55±0.37	3.12	2.73	1.82	29.64	2 220.54	0.34	20.31	
	LL-190-5	442±3	5.40±0.04	1.93±0.48	4.29	1.62	1.38	33.14	1 008.51	0.88	17.40	
	LL-190-6	396±8	5.50±0.14	1.50±0.34	16.53	4.61	1.07	25.38	667.31	0.90	13.48	
	LL-190-7	408±3	5.45±0.03	2.04±0.22	16.99	6.09	1.46	27.57	883.66	0.77	18.40	

注: Ra 为空气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值(取 1.40×10^{-6}); R/Ra 表示样品的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 与空气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ (取 1.40×10^{-6})比值; He(%) 为地幔成因的He同位素, $\text{He}(\%) = [(R - R_c)/(R_m - R_c)] \times 100$, R_m 、 R_c 、 R 分别代表地幔流体、地壳流体以及样品的氦同位素组成; $^{40}\text{Ar}^*$ (%) 表示成矿流体中放射成因 ^{40}Ar 的相对含量, $^{40}\text{Ar}^*(\%) = [1 - 295.5/(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{样品}}] \times 100$; $^{40}\text{Ar}^{\text{E}}$ 表示扣除空气 ^{40}Ar 后的过剩氩, $^{40}\text{Ar}^{\text{E}} = (^{40}\text{Ar})_{\text{样品}} - 295.5 \times ^{36}\text{Ar}_{\text{样品}}$; $\text{F}^4\text{He} = (^4\text{He}/^{36}\text{Ar})_{\text{样品}} / (^4\text{He}/^{36}\text{Ar})_{\text{大气}}$, 大气中的 $^4\text{He}/^{36}\text{Ar}$ 值为0.1655。

同位素组成影响也很小,甚至可忽略不计(胡瑞忠, 1997)。对于第③种情况,由于宇宙成因的 ^3He 只产

生在近地表1.5 m的范围内(胡瑞忠, 1997; 丁德建等, 2014),本文的样品均采自地下坑道和钻孔中,且

暴露时间很短,因此可以排除样品中存在宇宙成因 ^3He 的可能(Stuart *et al.*, 1995)。氦在大气中的含量极低,不足以对地壳流体中氦的含量和同位素组成产生明显的影响。另样品中若含有大气氦组分,则 $F^4\text{He} = 1$ (Kendrick *et al.*, 2001; 毛景文等, 2005)。由表1中可以发现,胶西北金矿床的 $F^4\text{He}$ 范围为53~72 659,远远大于1,所以大气He的混染作用可以排除。本次测得的黄铁矿包裹体的He、Ar同位素数据,可以代表原生流体包裹体的初始值。成矿流体中的氦只有地幔和地壳两个来源。另外由于稀有气体的特殊性,无论在成矿时捕获还是真空压碎法取得流体包裹体样品,均不会产生明显的同位素分馏(胡瑞忠等, 1999)。

3.3 He 和 Ar 同位素分析结果讨论

热液流体中He、Ar同位素有4种来源,它们分别是大气来源、饱和大气水来源、地幔来源和地壳来源(Burnard *et al.*, 1999; 李晓峰等, 2003)。其中,饱和大气水中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 1.39×10^{-6} , $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ Ar值为295.5;幔源流体 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为6~9 Ra, $^{40}\text{Ar}/^4\text{He}$ 值为0.33~0.56, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值大于4 000;地壳流体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为0.01~0.05 Ra, $^{40}\text{Ar}/^4\text{He}$ 值为0.156;大气Ar的同位素 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值为295.5(Dunai and Touret, 1995; Stuart *et al.*, 1995)。由于He在大气中的含量极低,对地壳流体中的He丰度和同位素组成不会产生明显的影响(Marty *et al.*, 1989)。

本次研究测试和收集的41件样品中,除三山岛金矿1件样品由于He含量低于检出限,1件样品出现极高值外,其余39件黄铁矿样品的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值变化范围为0.09~2.36 Ra,平均为1.40 Ra,高于地壳 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值(0.01~0.05 Ra),低于地幔 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值(6~9 Ra)(Stuart *et al.*, 1995),说明成矿流体的He同位素是地幔和地壳两种来源的混合。三山岛成矿带11件样品 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 均值为1.95 Ra,焦家成矿带11件样品 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 均值为1.74 Ra,招平成矿带18件样品 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 均值为1.17 Ra,从西往东逐渐降低,说明地幔流体参与成矿自西往东逐渐降低。在氦同位素组成分布图(图2)上,数据点均落在地幔与地壳之间的过渡区。

与 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值相比,黄铁矿流体包裹体中的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值为284~4 042.6,分布范围较广,平均848.6,除仓上Csh5样品分析结果外都大于大气Ar同位素均值。 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值高于大气值说明流体中存

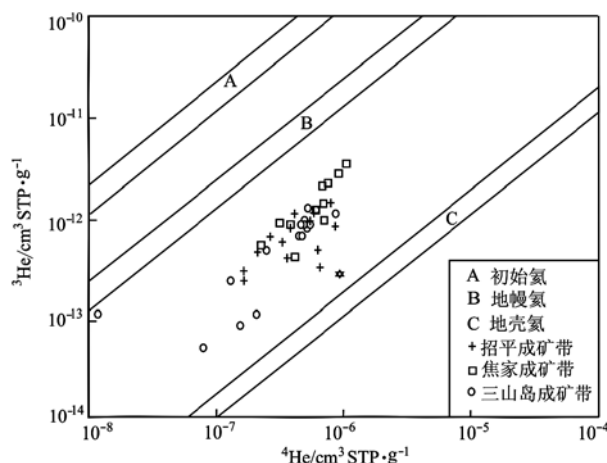


图2 胶西北地区金矿黄铁矿流体的He同位素组成
(据Mamyrin and Tolstikhin, 1984)

Fig. 2 He isotope composition of fluid inclusions in pyrite from gold deposits in northwestern Jiaodong area (after Mamyrin and Tolstikhin, 1984)

在来源于地壳的放射成因Ar($^{40}\text{Ar}^*$),经计算获得放射性成因Ar所占比例范围为1.17%~92.69%。其中三山岛成矿带1.17%~87.12%,平均33.04%,焦家成矿带15.57%~90.00%,平均55.75%,招平成矿带7.94%~92.69%,平均44.23%,各成矿带内及成矿区不同样品放射性成因Ar所占比例变化较大。

胶西北成矿区具有较高的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值,说明胶西北成矿区地幔流体参与了部分成矿。同时 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值变化范围较大,说明了深部来源的幔源流体在成矿作用过程中,少量加入了浅部低温海水或者大气降水。

流体幔源He所占比例范围在0.97%~29.87%,平均17.57%,显示出幔源流体对成矿有贡献。其中三山岛成矿带平均24.65%,焦家成矿带平均22.01%,招平成矿带平均14.62%,说明胶西北金矿床成矿物质来源主要来源于地壳,且有少量幔源物质的加入,自西往东幔源物质加入逐渐减少。

将He和Ar同位素组成投入 $R/\text{Ra} - ^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 图解(图3),投点集中在地壳流体与地幔流体之间,并且靠近大气饱和水,说明成矿流体以地壳流体与地幔流体参与成矿作用外,大量的大气降水也参与其中。另外从图3可以发现,除去个别样品外,基本上所有数据点也沿平行x坐标轴的方向分布,表明成矿流体中Ar同位素的变化基本上不受氦的影响,说明胶西北成矿区内成矿流体中He和Ar同位素的组成变化相互独立,指示了区内金矿床具有

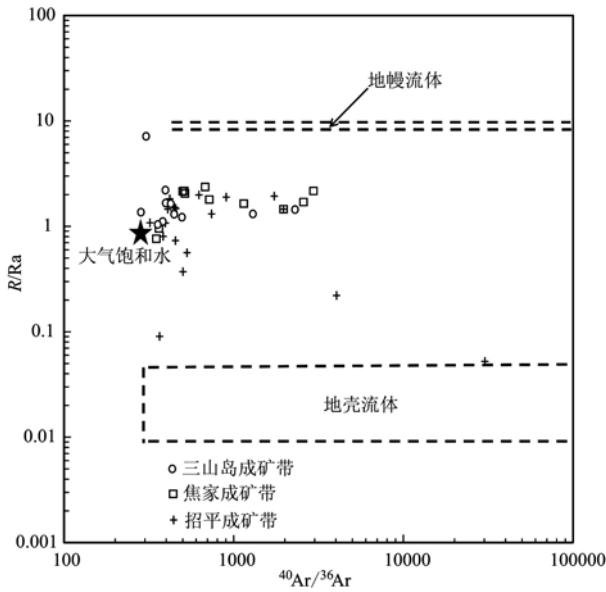


图3 胶西北地区金矿成矿流体 $R/Ra - {}^{40}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar}$ 图解(据宋世明等,2007)

Fig. 3 R/Ra versus ${}^{40}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar}$ diagram of ore-forming fluids in northwestern Jiaodong area (after Song Shiming *et al.*, 2007)

相似的流体来源及混合过程,只是在后期的演化中由于成矿构造环境的差异而导致不同。

${}^{40}\text{Ar}^E/{}^4\text{He}$ 比值除2件较低(0.029 6, 0.09)外,其余样品比值范围0.232 2~1.89,平均0.65,其中三山岛带平均0.88,焦家带平均0.59,招平带平均0.56,普遍大于地壳值(0.156),与地幔值(0.33~0.56)(Stuart *et al.*, 1995; 胡瑞忠等,1997a)相近并略高,成矿流体中 ${}^{40}\text{Ar}^E/{}^4\text{He}$ 值高于正常 ${}^{40}\text{Ar}/{}^4\text{He}$ 值,说明大气降水在流经地壳岩石过程中捕获了放射性成因 ${}^{40}\text{Ar}$ 。由于黄铁矿中氢的封闭温度低(200℃),而氦的封闭温度高(>200℃)(Ballentine *et al.*, 2002),高的 ${}^{40}\text{Ar}^E/{}^4\text{He}$ 值表明成矿流体温度较高(>200℃),这与该区主成矿阶段温度为170~335℃,一般高于200℃的事实一致(范宏瑞等,2005)。同时也反映出胶西北成矿区成矿流体主要来源于地壳,并与深部幔源流体发生不同程度的壳幔混合,大气降水也参与成矿作用。将He和Ar同位素组成投入 $R/Ra - {}^{40}\text{Ar}^E/{}^4\text{He}$ 图解(图4),投影点落在地幔流体和地壳流体之间斑岩铜矿床区域左上方,显示成矿流体中有地幔流体不同比例的混入。

3.4 与成矿流体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 组成的比较

为了进一步对成矿流体来源的合理解释,分析了三山岛北部海域、姜家窑及曹家洼金矿床成矿流

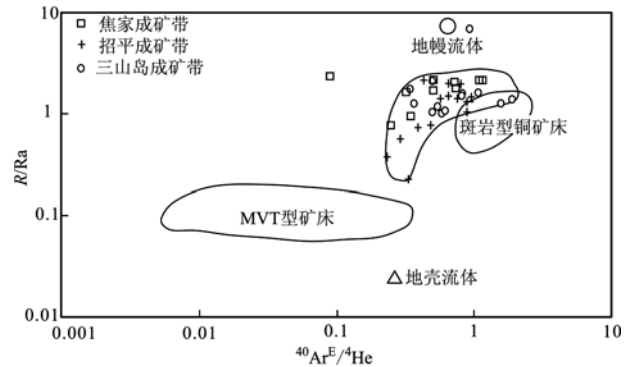


图4 胶西北地区金矿成矿流体 $R/Ra - {}^{40}\text{Ar}^E/{}^4\text{He}$ 图解(底图 Ballentine *et al.*, 2002)

Fig. 4 R/Ra versus ${}^{40}\text{Ar}^E/{}^4\text{He}$ diagram of ore-forming fluids in northwestern Jiaodong area (after Ballentine *et al.*, 2002)

体的H、O同位素组成(表2)。搜集了前人部分资料,综合地质和成矿流体He-Ar同位素系统进行综合分析。

测试获得胶西北金成矿区 $\delta^{18}\text{O}$ 范围为7.9‰~13.0‰,三山岛带均值12.08‰,焦家带均值10.37‰,招平带均值9.68‰。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 范围1.57‰~8.55‰,三山岛带均值7.26‰,焦家带均值5.43‰,招平带均值3.63‰,自三山岛带往东至招平带逐渐降低,说明幔源物质参与逐渐降低。氢同位素组成 δD 值变化于48‰~-86‰,三山岛带均值-60.10‰,焦家带均值-76.67‰,招平带均值-66.84‰。将上述数据投影到氢氧同位素关系图中(图5),可以看出,投点主要落于变质水下方,岩浆水附近,自西部三山岛成矿带向东部招平成矿带逐渐靠近大气降水。 δD 分布范围相对较窄,表明成矿流体源于初始岩浆水,晚期有少量大气降水的参与,这与前人的认识一致(毛景文等,2005)。由此可见,胶西北成矿区金矿床成矿流体H-O和He-Ar同位素系统所示踪的流体来源具有一致性。

3.5 成矿作用过程

依据前人研究成果和本文得出的结论,推断胶西北成矿区成矿流体的形成、演化经历了如下过程:在侏罗纪,古太平洋板块自SE向NW向欧亚大陆下方俯冲,胶东地壳增厚并发生地壳重熔,在160~150 Ma,玲珑型花岗岩侵位,古老陆壳中的金初步富集。在白垩纪早期,中国东部构造体制发生转折,岩石圈强烈减薄,地幔物质上涌,构造、岩浆活动活跃,壳-幔发生相互作用。130~126 Ma,壳幔混源的郭家岭

表 2 胶西北金矿石英流体包裹体氢氧同位素组成

Table 2 H and O isotope composition of fluid inclusions in quartz from gold deposits, northwestern Jiaodong

序号	样品编号	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$	$t/^\circ\text{C}$	$\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	数据来源
三山岛带 北部海域	Y3	13.0	6.63	315	-61.556	本文
	Y4	13.6	7.20	314	-64.248	
	Y7	12.3	5.55	304	-69.817	
三山岛带 三山岛	SSD1	10.9	7.75	250	-50	毛景文等, 2005
	SSD3	11.0	7.85	250	-67	
	SS-70-13	11.7	8.55	250	-48	
焦家带 焦家	JJ-190-13	10.2	4.37	300	-86	本文
	JJ-190-14	10.0	4.17	300	-85	
	Jjia1	10.9	7.75	250	-59	
招平带 姜家窑	K3	8.5	1.57	299	-66.514	本文
K7	7.9	2.10	333	-61.780		
招平带 曹家洼	K12	10.8	5.24	341	-70.176	
	K14	10.8	5.33	344	-74.165	
	K20	10.4	3.89	311	-61.551	

注： $t/^\circ\text{C}$ 依据石英流体包裹体测温结果；通过石英-水之间的氧同位素分馏方程： $1000 \ln \alpha_{\text{Q-W}} = 3.38 \times 10^6 / t^2 - 2.90$ (Clayton *et al.*, 1972)，估算成矿热液中水的氧同位素组成 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ ，即 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = \delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}} - 1000 \ln \alpha_{\text{Q-W}}$ ，其中 $\alpha_{\text{Q-W}}$ 为石英与水之间的分馏系数。

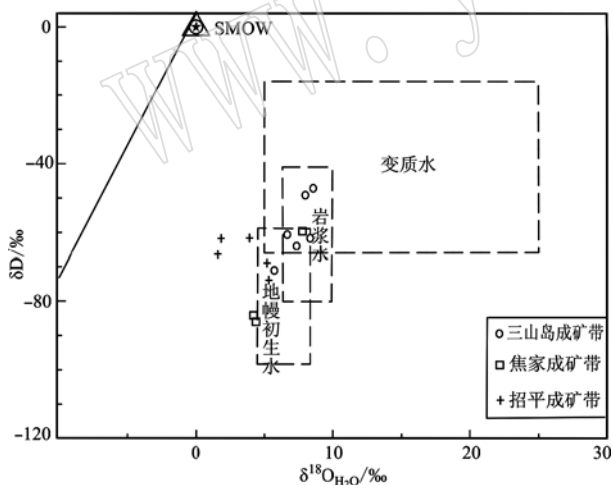


图 5 胶西北地区金矿床成矿流体 $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 分布图
(底图据 Hugh and Taylor, 1974)

Fig. 5 $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ of ore-forming fluid in northwestern Jiaodong area (after Hugh and Taylor, 1974)

型花岗岩侵位。同时，受早白垩世壳幔混合型岩浆作用影响，玲珑花岗岩岩基隆升，其上前寒武纪变质岩发生拆离滑脱，形成发育在玲珑岩基顶部的三山岛断裂、焦家断裂和招平断裂等拆离断层。在 120

Ma 左右，岩石圈已经大幅度减薄，大量煌斑岩、辉绿玢岩、闪长玢岩等中基性脉岩沿 NNE 断裂侵位，地幔物质(包括流体)不断向地壳涌入，地幔流体在向上运移的过程中，与地壳流体发生混合，并有大气降水的加入。碳、氧、氢、硫同位素和流体包裹体研究反映它们由来自同一的流体库，通过水岩反应和流体混合作用，金最终卸载成矿。

4 结论

(1) 胶西北成矿区 3 条金成矿带具有相似的流体来源及混合过程，成矿流体主要来源于地壳，并与深部幔源流体发生不同程度的壳幔混合，大气降水也参与成矿作用。后期受不同构造环境的影响和制约，从而在不同的构造部位形成不同的金矿床。

(2) 黄铁矿流体包裹体揭示三山岛成矿带 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 均值为 1.95 Ra，焦家成矿带 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 均值为 1.74 Ra，招平成矿带 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 均值为 1.54 Ra，从西往东逐渐降低，说明地幔流体参与成矿自西往东逐渐降低，与 H、O 稳定同位素研究得出的结论一致。

(3) 黄铁矿流体包裹体中放射性成因 Ar 所占

比例范围三山岛成矿带为 1.17% ~ 87.12%, 平均 33.04%, 焦家成矿带为 15.57% ~ 90.00%, 平均 55.75%, 招平成矿带为 7.94% ~ 92.69%, 平均 44.23%, 说明在成矿过程中, 地壳成矿流体参与成矿作用焦家成矿带最高, 招平成矿带次之, 三山岛成矿带最低。

致谢 本文在成文过程中得到了审稿专家的学术指导和中肯建议, 在此表示诚挚的谢意。

References

- Ballentine C J, Burgess R and Marty B. 2002. Tracing fluid origin, transport and interaction in the crust[J]. *Reviews of Mineral and Geochemistry*, 47(1): 539 ~ 614.
- Baptiste P J and Fouquet Y. 1996. Abundance and isotopic composition of helium in hydrothermal sulfides from East Pacific Rise at 13°N[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(1): 87 ~ 93.
- Burnard P G, Hu R Z, Turner G, *et al.* 1999. Mantle, crustal and atmosphere noble gases in Ailaoshan Gold deposits, Yunnan Province, China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(10): 1 595 ~ 1 604.
- Clayton R N, O'Neil J R and Mayeda T K. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. *Journal of Geophysical Research*, 77(17): 3 057 ~ 3 067.
- Deng Jun, Wang Qingfei, Yang Liqiang, *et al.* 2004. The geological settings to the gold metallogeny in northwestern Jiaodong Peninsula, Shandong Province[J]. *Earth Science Frontiers(China University of Geosciences, Beijing)*, 11(4): 527 ~ 533(in Chinese).
- Ding Dejian, Liang Jinlong, Sun Weidong, *et al.* 2014. He-Ar isotopes tracing for ore genesis of the Yangshan gold deposit[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(6): 813 ~ 819(in Chinese).
- Dunai T and Touret L J R. 1995. Helium, neon, and argon systematics of the European subcontinental mantle: Implications for its geochemical evolution[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(13): 2 767 ~ 2 783.
- Fan Hongrui, Hu Fangfang, Yang Jinhui, *et al.* 2005. Fluid evolution and Large-scale gold metallogeny during Mesozoic tectonic transition in the eastern Shandong Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5): 1 317 ~ 1 328(in Chinese).
- He Yangyang, Wen Chunqi, Liu Xianfan, *et al.* 2017. Discussion on the source of ore-forming fluids in Duobuza deposit, Tibet, China: from helium-argon and carbon-hydrogen-oxygen isotope evidence[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 37(1/2): 114 ~ 120(in Chinese).
- Hu Ruizhong. 1997. Helium and Argon geochemistry of ore-forming fluid [J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 16(2): 120 ~ 124(in Chinese).
- Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Turner G, *et al.* 1997b. He-Ar isotopic system of fluid inclusions from pyrites in Machangqing copper deposit[J]. *Science in China(Series D)*, 27(6): 503 ~ 508(in Chinese).
- Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Shao Shuxun, *et al.* 1997a. Study on helium isotopic component of Machangqing copper deposit of Yunnan Province [J]. *Chinese Science Bulletin*, 42(14): 1 542 ~ 1 545(in Chinese).
- Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Turner G, *et al.* 1999. Isotope geochemistry of He and Ar in ore-forming fluid of Ailaoshan gold mineralization belt [J]. *Science in China(Series D)*, 29(4): 321 ~ 330(in Chinese).
- Hu Ruizhong, Burnard P G, Turner G, *et al.* 1998. Helium and Argon isotope systematics in fluid inclusions of Machangqing copper deposit in west Yunnan province, China[J]. *Chemical Geology*, 146(1 ~ 2): 55 ~ 63.
- Hu Ruizhong, Zhong Hong, Ye Zaojun, *et al.* 1998. Helium and argon isotope geochemistry of the Jingding super-large Pb-Zn deposit[J]. *Science in China(Series D)*, 28(3): 208 ~ 213(in Chinese).
- Hugh P and Taylor J R. 1974. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition [J]. *Economic Geology*, 69(1): 843 ~ 883.
- Jiao Xueyao, Fan Xiaolong, Yu Pinghui, *et al.* 2016. He-Ar isotopic system of fluid inclusions in pyrite from the Changba lead-zinc deposit in Gansu Province[J]. *Gold Science and Technology*, 24(4): 47 ~ 53(in Chinese).
- Kendrick M A, Burgess R, Patrick R A D, *et al.* 2001. Fluid inclusion noble gas and halogen evidence on the origin of Cu-Porphyry mineralizing fluids[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(16): 2 651 ~ 2 668.
- Li Houmin, Mao Jingwen, Shen Yuanchao, *et al.* 2003. Ar-Ar ages of K-feldspar and quartz from Dongji gold deposit, Northwest Jiaodong, and their significance[J]. *Mineral Deposits*, 22(1): 72 ~ 77(in Chinese).
- Li Shixian, Liu Changchun, An Yuhong, *et al.* 2007. *Geology of Gold Deposits in Jiaodong*[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Li Xiaofeng, Mao Jingwen, Wang Yitian, *et al.* 2003. Evidence of noble gas isotopes and halogen for the Origin of ore-forming fluids[J]. *Geological Review*, 49(5): 513 ~ 521(in Chinese).

- Lin Wenwei and Yin Xiulan. 1998. Isotope geological characteristics of mineralizing fluids of gold deposits in Jiaodong area and a discussion on the application conditions of H. P. Taylor's equation[J]. *Acta Petrologica et Minerologica*, 17(3): 249 ~ 259 (in Chinese).
- Liu Shumin, Zhang Jianwei, Wang Shuai, *et al.* 2016. Gold exploration model and prospecting direction for the Southern section of the Zhaoping fault zone in Northwestern Shandong Province[J]. *Geology and Exploration*, 52(3): 399 ~ 406 (in Chinese).
- Lu Huanzhang, Yuan Wanchun, Zhang Guoping, *et al.* 1999. Stable isotopes studies and age dating of gold deposits and Linglong granites in Linglong-Jiaojia area, Shandong, China[J]. *Journal of Guilin Institute of Technology*, 19(1): 1 ~ 8 (in Chinese).
- Mamyrin B A and Tolstikhin I N. 1984. *Helium Isotopes in Natures*[M]. Amsterdam: Elsevier, 1 ~ 273.
- Mao Jingwen, Li Xiaofeng, Zhang Ronghua, *et al.* 2005. *Mantle-derived Fluid-related Ore-forming System*[M]. Beijing: China Land Publishing House (in Chinese).
- Mao Jingwen and Wei Jiaxiu. 2000. Helium and argon isotopic compositions of fluid inclusions and tracing to the source of metallogenic fluids in the Dashuigou tellurium deposit of Sichuan Province[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 21(1): 58 ~ 61 (in Chinese).
- Marty B, Jambon A and Sano Y. 1989. Helium isotope and CO₂ in volcanic gases in Japan[J]. *Chemical Geology*, 76(1 ~ 2): 25 ~ 40.
- Qiu Y and Groves D I. 1999. Late archean collision and delamination in the southwest Yilgarn craton: the driving force for Archean orogenic lode gold mineralization[J]. *Economic Geology*, 94(1): 11 ~ 122.
- Shen Baofeng and Luo Hui. 1994. The metallogenetic characteristics of gold deposits of the archean greenstone belts in North China platform [J]. *Jour. Geol. & Min. Res. North China*, 9(1): 87 ~ 96 (in Chinese).
- Song Mingchun. 2015. The main achievements and key theory and methods of deep-seated prospecting in the Jiaodong gold concentration area, Shandong Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(9): 1 758 ~ 1 771 (in Chinese).
- Song Mingchun, Cui Shuxue and Jiang Hongli. 2011. Metallogenetic structural system for Jiaojia gold field and Jiaoxibei gold deposits concentrated areas in Shandong Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(4): 573 ~ 578 (in Chinese).
- Stuart F M, Burnard P G, Taylor R P, *et al.* 1995. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluids: He-Ar isotopes in fluid inclusions from Dae Hwa W-Mo mineralization, South Korea[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 59(22): 4 663 ~ 4 673.
- Xue Chunji, Chen Yuchuan, Wang Denghong, *et al.* 2003. Geology and isotopic composition of helium, neon, xenon and metallogenic age of the Jinding and Baiyangping ore deposits, northwest Yunnan, China [J]. *Science in China(Series D)*, 33(4): 315 ~ 322 (in Chinese).
- Xue Jianling, Li Shengrong, Sun Wenyan, *et al.* 2013. Helium and argon isotopic composition in fluid inclusions and the source of ore-forming materials of Denggezhuang gold deposit in Jiaodong Peninsula[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 43(2): 400 ~ 414 (in Chinese).
- Yang Jinhui, Zhou Xinhua and Chen Lihui. 2000. Dating of gold mineralization for super-large altered tectonite-type gold deposits in Northwestern Jiaodong Peninsula and its implications for gold metallogeny[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3): 454 ~ 458 (in Chinese).
- Yang Meng, Wang Juli, Wang Jianqi, *et al.* 2012. Helium and argon isotopic tracing of ore-forming fluid from the Wangfeng gold deposit in Xinjiang[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(3): 794 ~ 800 (in Chinese).
- Ye Xianren, Wu Maobing and Sun Mingliang. 2001. Determination of the noble gas isotopic composition in rocks and minerals by Mass Spectrometry[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 20(3): 174 ~ 178 (in Chinese).
- Yu Xuefeng, Song Mingchun, Li Dapeng, *et al.* 2016. Prospecting breakthroughs and prospect of gold deposits in Shandong province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(10): 2 847 ~ 2 862 (in Chinese).
- Zhai Mingguo, Fan Hongrui, Yang Jinhui, *et al.* 2004. Large-scale cluster of gold deposits in East Shandong: anorogenic metallogenesis[J]. *Earth Science Frontiers(China University of Geosciences, Beijing)*, 11(1): 85 ~ 98 (in Chinese).
- Zhang Lianchang, Shen Yuanchao, Li Houmin, *et al.* 2002. Helium and argon isotopic compositions of fluid inclusions and tracing to the source of ore-forming fluids for Jiaodong gold deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 559 ~ 565 (in Chinese).
- Zhang Xu, Li Shengrong, Lu Jing, *et al.* 2012. H-O, He-Ar isotopic composition of fluid inclusions for tracing the source of ore-forming fluids of Jinchiling gold deposit, Northwest Jiaodong area[J]. *J. Mineral. Petrol.*, 32(1): 40 ~ 47 (in Chinese).
- Zhang Yunqiang, Li Shengrong, Chen Haiyan, *et al.* 2012. Trace element and He-Ar isotopic evidence of pyrite for the source of oreforming fluids in the Jinqingding gold deposit, eastern Shandong Province[J]. *Geology in China*, 39(1): 195 ~ 204 (in Chinese).

附中文参考文献

- 邓 军, 王庆飞, 杨立强, 等. 2004. 胶西北金矿集区成矿作用发生的地质背景[J]. *地学前缘*, 11(4): 527 ~ 533.
- 丁德建, 梁金龙, 孙卫东, 等. 2014. 阳山金矿成矿流体的 He-Ar 同

- 位素示踪[J]. 矿物岩石地球化学通报, 33(6): 813~819.
- 范宏瑞, 胡芳芳, 杨进辉, 等. 2005. 胶东中生代构造体制转折过程中流体演化和金的大规模成矿[J]. 岩石学报, 21(5): 1 317~1 328.
- 何阳阳, 温春齐, 刘显凡, 等. 2017. 西藏多不杂铜矿床成矿流体来源探讨: 来自氦氩碳氢氧同位素的证据[J]. 矿物学报, 37(1/2): 114~120.
- 胡瑞忠. 1997. 成矿流体氦、氩同位素地球化学[J]. 矿物岩石地球化学通报, 16(2): 120~124.
- 胡瑞忠, 毕献武, Turner G, 等. 1997b. 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), 27(6): 503~508.
- 胡瑞忠, 毕献武, 邵树勋, 等. 1997a. 云南马厂箐铜矿床氦同位素组成研究[J]. 科学通报, 42(14): 1 542~1 545.
- 胡瑞忠, 毕献武, Turner G, 等. 1999. 哀牢山金矿带成矿流体 He 和 Ar 同位素地球化学[J]. 中国科学(D辑), 29(4): 321~330.
- 胡瑞忠, 钟宏, 叶造军, 等. 1998. 金顶超大型铅-锌矿床氦、氩同位素地球化学[J]. 中国科学(D辑), 28(3): 208~213.
- 焦学尧, 樊小龙, 余平辉, 等. 2016. 甘肃厂坝铅锌矿床黄铁矿流体包裹体 He-Ar 同位素体系[J]. 黄金科学技术, 24(4): 47~53.
- 李厚民, 毛景文, 沈远超, 等. 2003. 胶西北东季金矿床钾长石和石英的 Ar-Ar 年龄及其意义[J]. 矿床地质, 22(1): 72~77.
- 李士先, 刘长春, 安郁宏, 等. 2007. 胶东金矿地质[M]. 北京: 地质出版社.
- 李晓峰, 毛景文, 王义天, 等. 2003. 惰性气体同位素和卤素示踪成矿流体来源[J]. 地质论评, 49(5): 513~521.
- 林文蔚, 殷秀兰. 1998. 胶东金矿成矿流体同位素的地质特征[J]. 岩石矿物学杂志, 17(3): 249~259.
- 刘述敏, 张建伟, 王帅, 等. 2016. 胶西北招平断裂带南段金矿勘查模型及找矿方向[J]. 地质与勘探, 52(3): 399~406.
- 卢焕章, 袁万春, 张国平, 等. 1999. 玲珑-焦家地区主要金矿床稳定同位素及同位素年代学[J]. 桂林工学院学报, 19(1): 1~8.
- 毛景文, 李晓峰, 张荣华, 等. 2005. 深部流体成矿系统[M]. 北京: 地质出版社, 1~423.
- 毛景文, 魏家秀. 2000. 大水沟碲矿床流体包裹体的 He、Ar 同位素组成及其示踪成矿流体的来源[J]. 地球学报, 21(1): 58~61.
- 沈保丰, 骆辉. 1994. 华北陆台太古宙绿帘带金矿的成矿特征[J]. 华北地质矿产杂志, 9(1): 87~96.
- 宋明春. 2015. 胶东金矿深部找矿主要成果和关键理论技术进展[J]. 地质通报, 34(9): 1 758~1 771.
- 宋明春, 崔书学, 姜洪利. 2011. 山东胶西北矿集区和焦家金矿田成矿构造系统[J]. 地质通报, 30(4): 573~578.
- 宋世明, 胡凯, 蒋少涌, 等. 2007. 粤北大宝山多金属矿床成矿流体的 He-Ar-Pb-S 同位素示踪[J]. 地质找矿论丛, 22(2): 87~99.
- 薛春纪, 陈毓川, 王登红, 等. 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[J]. 中国科学(D辑), 33(4): 315~322.
- 薛建玲, 李胜荣, 孙文燕, 等. 2013. 胶东邓格庄金矿床流体包裹体氦、氩同位素组成及其成矿物质来源示踪[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 43(2): 400~414.
- 杨进辉, 周新华, 陈立辉. 2000. 胶东地区破碎带蚀变岩型金矿时代的测定及其地质意义[J]. 岩石学报, 16(3): 454~458.
- 杨猛, 王居里, 王建其, 等. 2012. 新疆望峰金矿成矿流体的 He、Ar 同位素示踪[J]. 地球学报, 33(3): 794~800.
- 于学峰, 宋明春, 李大鹏, 等. 2016. 山东金矿找矿突破进展与前景[J]. 地质学报, 90(10): 2 847~2 862.
- 叶先仁, 吴茂炳, 孙明良. 2001. 岩矿样品中稀有气体同位素组成的质谱分析[J]. 岩矿测试, 20(3): 174~178.
- 翟明国, 范宏瑞, 杨进辉, 等. 2004. 非造山带型金矿-胶东型金矿的陆内成矿作用[J]. 地学前缘, 11(1): 85~98.
- 张连昌, 沈远超, 李厚民, 等. 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[J]. 岩石学报, 18(4): 559~565.
- 张旭, 李胜荣, 卢晶, 等. 2012. 山东招远金翅岭金矿床 H, O, He, Ar 同位素组成及其对成矿流体示踪的研究[J]. 矿物岩石, 32(1): 40~47.
- 张运强, 李胜荣, 陈海燕, 等. 2012. 胶东金青顶金矿床成矿流体来源的黄铁矿微量元素及 He-Ar 同位素证据[J]. 中国地质, 39(1): 195~204.