

胶东山后金矿床 S-Pb 同位素特征及物质来源分析

王建田^{1,2}, 毛光周¹, 段留安², 郭云成², 韦 星², 张昌帅², 徐 攀³

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 中国地质调查局 烟台海岸带地质调查中心, 山东 烟台 264004;

3. 平顶山市瑞平煤电有限公司 庇山煤矿, 河南 平顶山 467500)

摘 要: 山后金矿床位于胶东招平断裂带南段, 探明金资源量达中型规模, 但成矿物质来源尚不明确。山后金矿床矿石为黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩, 载金矿物主要为黄铁矿。本研究对山后金矿床载金黄铁矿开展 S-Pb 同位素分析, 并与区域其他典型矿床对比, 探讨成矿物质来源。载金黄铁矿较富集 $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{34}\text{S}$ 值为 7.6‰~8.4‰, 极差 0.8‰, 平均值 7.82‰。不同深度的主矿体中载金黄铁矿 S 同位素差异不明显, 表明成矿物质 S 同位素组成具有高度均一性。载金黄铁矿 S 同位素与矿体围岩的 S 同位素特征一致, 表明山后金矿床硫源具有混合特征, 成矿流体上升过程中混染了围岩中的硫。山后金矿床载金黄铁矿 Pb 同位素 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为 17.097~17.271、15.44~15.529、37.862~38.028, 平均值分别为 17.172、15.484、37.947。山后金矿床与招平断裂带南段其他典型金矿床具有相似的 S-Pb 同位素特征, 结合相似的 He-Ar 同位素特征, 说明成矿物质来源具有相似性, 均为壳幔混合来源。研究表明, 招平断裂带南段金矿的形成与古元古代荆山群、晚侏罗世玲珑花岗岩关系密切。

关键词: 招平断裂带; 山后金矿; S 同位素; Pb 同位素; 物质来源

中图分类号: P618.5

文献标志码: A

S-Pb isotopic characteristics and material source analysis of Shanhou gold deposit in Jiaodong Peninsula

WANG Jiantian^{1,2}, MAO Guangzhou¹, DUAN Luan²,

GUO Yuncheng², WEI Xing², ZHANG Changshuai², XU Pan³

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Yantai Center of Coastal Zone Geological Survey, China Geological Survey, Yantai 264004, China

3. Bishan Coal Mine, Pingdingshan Ruiping Coal and Electricity Co., Ltd., Pingdingshan 467500, China)

Abstract: Shanhou gold deposit is located in the southern segment of Zhaoping fault zone at Jiaodong Peninsula. Its proven gold resources have reached a medium scale, but the source of the ore-forming materials remains unclear. The ores are pyrite-sericitized granitic cataclastic rocks, with pyrite as the primary gold-bearing mineral. This study investigates the sources of ore-forming materials in the main ore body of Shanhou gold deposit by carrying out S-Pb isotope analyses of gold-bearing pyrites and comparing with other typical gold deposits. The gold-bearing pyrite is relatively enriched in $\delta^{34}\text{S}$ with values varying from 7.6‰ to 8.4‰, a range of 0.8‰ and an average value of 7.82‰. The gold-bearing pyrite from different depths of the main ore body display no significant difference in sulfur isotopes, suggesting a high degree of homogeneity in sulfur isotopes of ore-forming materials.

收稿日期: 2025-12-24

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20240206320); 国家重点研发计划项目(2022YFC2903605); 国家自然科学基金项目(42572087)

作者简介: 王建田(1987—), 男, 河北衡水人, 高级工程师, 从事矿产勘查工作. E-mail: 6101484362@qq.com

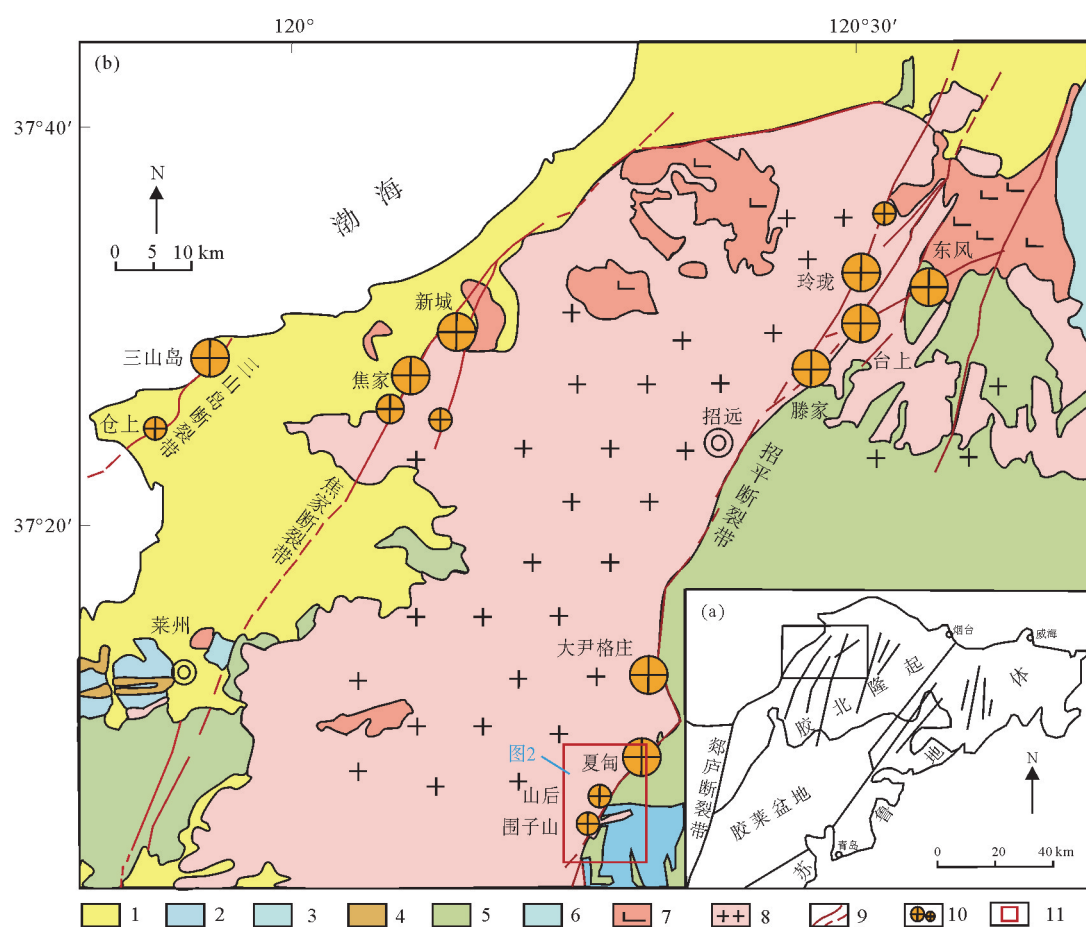
毛光周(1978—), 男, 甘肃甘谷人, 教授, 博士, 从事岩矿地球化学方面的研究, 本文通信作者.

E-mail: gzmaonjunwu@163.com

The sulfur isotopes of gold-bearing pyrite are consistent with those of wall rocks of the main ore body, indicating that the sulfur source of Shanhou gold deposit is of mixed origin, with the ore-forming fluid being contaminated by sulfur from the wall rocks during its ascent. For Pb isotopes of gold-bearing pyrite in the Shanhou gold deposit, the ratios of $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ range from 17.097 to 17.271, 15.44 to 15.529, and 37.862 to 38.028, with average values of 17.172, 15.484, and 37.947, respectively. The similar compositions of S-Pb and He-Ar isotopes in Shanhou gold deposit and other typical gold deposits in the central and southern segments of Zhaoping fault zone indicate a similar source of ore-forming materials of mixed crust-mantle origin. The results of this study also indicate that the formation of gold deposits in the southern segment of Zhaoping faultzone is closely related to the Paleoproterozoic Jingshan Group and the Late Jurassic Linglong Granite.

Key words: Zhaoping fault zone; Shanhou gold deposit; sulfur isotopes; lead isotopes; material sources

胶东地区是中国最重要的黄金产地,目前已累计探明金资源储量 5 800 余吨^[1-2]。关于胶东金矿的深部勘查和成因类型研究,一直是国内外研究的热点。招平断裂带是胶西北地区 3 条最重要的金矿控矿构造之一(图 1),控制的金资源量超过 1 500 t^[3],招平断裂带分为北段、中段和南段,其中招平断裂带中段和北段的勘查和研究程度较高,南段研究程度较低,山后金矿床位于招平断裂带南段。前人对招平断裂带的大型、超大型金矿床的矿床地质特征、成矿物质来源、成矿年龄、构造环境、矿床成因分类等进行了深入探讨并取得了大量重要成果。徐述平等^[4]构建了招平断裂带金矿勘查模型,提出招平断裂带成矿演化模式及成矿预测;郭云成等^[5]测得前垂柳矿区花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 $1\,844.1 \pm 4.4$ Ma、 154.6 ± 4.4 Ma,成岩物质来源于加厚下地壳部分熔融;韩小梦等^[6]对前垂柳金矿床 S、Pb 同位素研究结果表明,成矿物质具有



(a) 胶东地区地质简图; (b) 胶西北地区地质简图; 1—第四系; 2—新元古界蓬莱群; 3—古元古界粉子山群; 4—古元古界荆山群; 5—太古宇胶东群; 6—早白垩世艾山岩体; 7—早白垩世郭家岭岩体; 8—晚侏罗世玲珑岩体; 9—断层及推测断层; 10—金矿床; 11—研究区

图 1 胶西北地区地质简图^[2]

Fig. 1 Geological map of Northwest Jiaodong Peninsula

壳幔混源特征,王巧云等^[7]通过对山后金矿床 H-O 和 He-Ar 同位素特征研究,认为成矿流体来自富集地幔流体。关于招平断裂带金矿床成矿物质来源仍存在不同解释,包括胶东前寒武纪变质岩^[8]、中生代花岗岩^[9]、中生代中基性脉岩同源的幔源岩浆^[10]等多种观点;矿床成因类型也尚未形成统一认识,限制了对招平断裂带金矿床成因类型的整体认识。

近年来,随着招平断裂带南段深部勘查工作的投入逐渐加大,多个矿区实现深部找矿突破,如南墅金矿床^[11]、山后金矿床^[12]等,但招平断裂带南段勘查和研究程度相对较低,发现的金矿规模亦较小,以中小型为主。为丰富区域成矿认识,有必要对招平断裂带南段新发现的山后金矿床开展进一步研究。前人对山后金矿床开展了流体包裹体 O-H-S 同位素和 He-Ar 同位素^[6]等成矿流体性质和来源研究,认为成矿流体属含 CO₂ 的变质流体,为中浅成中低温热液金矿床,但载金黄铁矿的成因和金成矿物质来源仍不明确。因此,本研究选取山后金矿床作为研究对象,对金矿石中的载金黄铁矿开展 S-Pb 同位素分析,进而开展成矿物质来源研究,并结合区域典型矿床进行综合对比分析,探讨矿床成矿过程和成因类型,为山后金矿床及区域金矿勘查工作提供理论支撑。

1 矿区地质背景

山后金矿床位于胶西北金矿集区,主要受 NE-NNE 向招平断裂带控制,金矿赋存于中生代花岗岩和前寒武纪变质岩破碎带中。山后金矿床北侧与夏甸金矿相邻,南侧与围子山金矿接壤(图 2),是近年来新发现的中型金矿,有着较好的找矿前景。

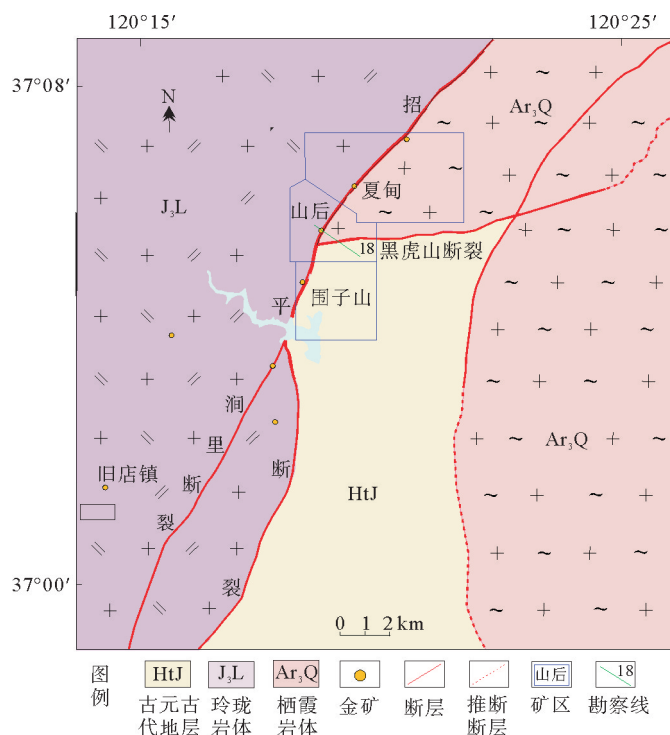


图 2 山东省莱西市山后金矿床区域地质图^[13]

Fig. 2 Regional geological map of Shanhou gold deposit, Laixi City, Shandong Province

2 矿床地质特征

山后金矿床已发现金矿体 16 个,探明金资源储量超 12 t,平均品位 2.94 g/t,其中主矿体 I-2 与招平断裂主断面断层泥直接接触或位于断层下盘 40 m 范围内,赋存标高 150~500 m(图 3)。矿体走向 NE,倾向 SE,倾角 38°~46°,矿石岩性为黄铁绢英岩化碎裂岩(图 4(a)~4(b))。招平断裂上盘主要为古元古代荆山群变质岩,下盘主要为晚侏罗世玲珑花岗岩,也是矿体的主要围岩,矿体与围岩呈渐变过渡。

矿床围岩蚀变主要有黄铁绢英岩化、硅化等,且黄铁绢英岩化、硅化与矿石品位呈正相关关系,可以作为直接的找矿标志。

矿石以晶粒状结构、压碎结构和填隙结构为主,少数为乳浊结构和交代残余结构(图 4(c)~4(d)),矿物破碎强烈可见网状裂隙,并伴随强烈蚀变,蚀变矿物主要为绢云母、石英。矿石矿物以自然金、黄铁矿为主,脉石矿物以石英、长石为主。金属硫化物主要为黄铁矿(图 4(e)~4(g)),为主要的载金矿物之一(图 4(h));脉石矿物主要为石英,也是金的主要载体矿物之一,金矿物在石英中或粒间不均匀分布,局部成群出现,主矿化阶段石英为烟灰色(图 4(i))。该矿床成矿热液期共经历四个阶段,其中第 II (金-石英-黄铁矿)、III (金-石英-多金属硫化物)阶段为主要成矿阶段。

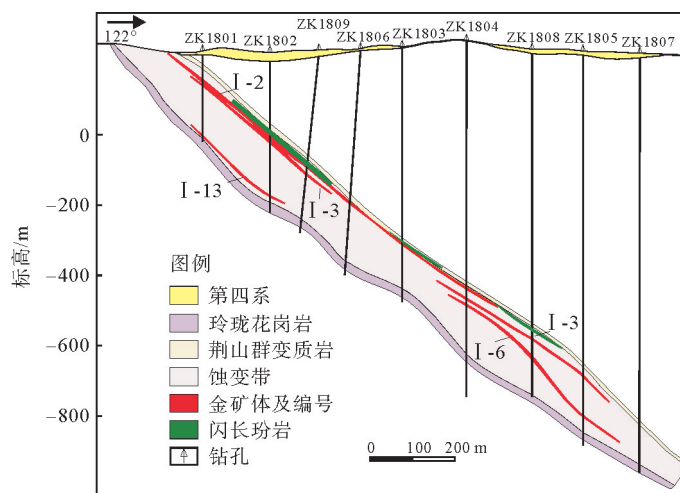
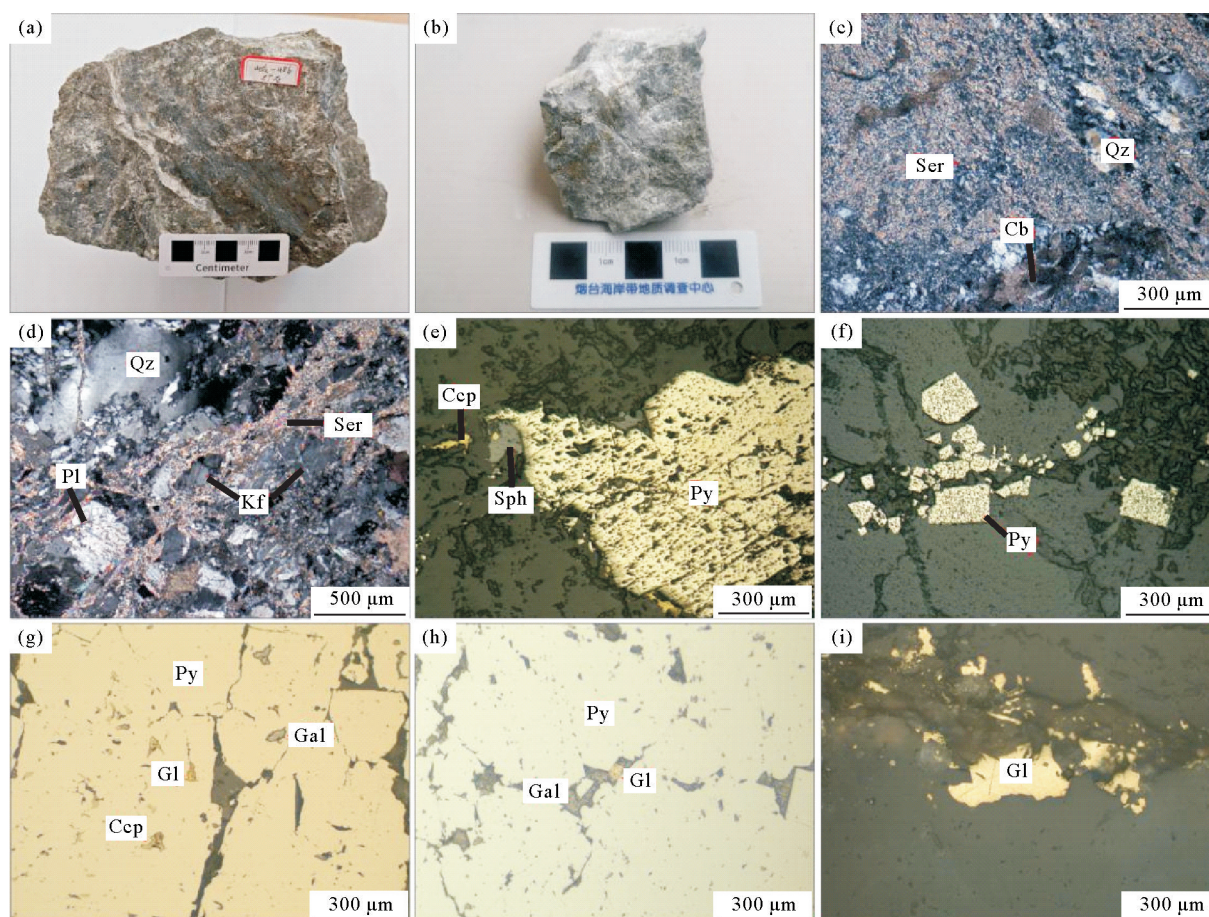


图 3 山后金矿床 18 勘查线地质剖面图^[12]

Fig. 3 Geological section map of exploration line 18 in Shanhou gold deposit



(a) 486 m 中段金矿石样品 SH-7; (b) 150 m 中段金矿石样品 SH-6; (c) 金矿石样品 SH-7 强烈绢云母化和碳酸盐化; (d) 金矿石 SH-6 长石边缘蚀变为绢云母; (e) 黄铜矿、闪锌矿交代黄铁矿边缘; (f) 自形-半自形黄铁矿沿矿石破碎面生长; (g) 黄铁矿中央角粒状包裹金; (h) 黄铁矿中角粒状包裹金; (i) 石英脉中的长角粒状包裹金; (c)~(d) 为正交偏光, (e)~(f) 为反射光; Py—黄铁矿; Gl—自然金; Ccp—黄铜矿; Sph—闪锌矿; Qz—石英; Pl—斜长石; Gal—方铅矿; Kf—钾长石; Cb—碳酸盐矿物; Ser—绢云母

图 4 山后金矿床金矿石宏观-微观特征

Fig. 4 Macro and micro-features of gold ores in Shanhou gold deposit

3 样品采集及测试方法

本次样品采集于山后金矿床中的 I-2 主矿体,分别于标高-150、-486 m 中段各采集 5 件样品,共计 10 件样品,岩性均为黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩,样品编号见表 1。测试矿物为主矿体矿石第 II 成矿阶段的含金黄铁矿,从研磨后的矿石粉末中挑选。S-Pb 同位素测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。

表 1 山后金矿床 S 同位素测试结果

Table 1 Test results of sulfur isotopes in Shanhou gold deposit

样号	取样位置	岩性	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$	样号	取样位置	岩性	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$
SH-6-1			7.9	SH-7-1			7.9
SH-6-2			7.8	SH-7-2			8.0
SH-6-3	-150 m 中段	花岗质碎裂岩	7.6	SH-7-3	-486 m 中段	花岗质碎裂岩	7.7
SH-6-4			7.7	SH-7-4			8.4
SH-6-5			7.6	SH-7-5			7.6

S 同位素测试方法:硫化物单矿物和氧化亚铜按一定比例研磨混合,在真空状态下加热,生成二氧化硫气体,采用 Flash2000 型元素分析仪和 Delta v plus 型稳定同位素气体质谱仪对样品进行 S 同位素组成分析。测量结果以维也纳代阿布洛峡谷陨硫铁(viennacanyon diablo troilite, V-CDT)为标准,记为 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ (简称为 $\delta^{34}\text{S}$)。硫化物参考标准为 IAEA-SO-5、IAEA-SO-6 和 IAEA-S-2,其 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 分别是 $0.48 \pm 0.21\text{‰}$ 、 $-34.08 \pm 0.19\text{‰}$ 和 $22.59 \pm 0.21\text{‰}$,分析精度优于 $\pm 0.2\text{‰}$ (表 1)^[14]。

Pb 同位素测试方法:采用 Phoenix 热电离子质谱计,单带、 M^+ (mono-positiveion,单电荷正离子),可调多法拉第接收器接收。分析室真空应小于 2.0×10^{-8} mbar 时进行测量,升温到合适温度后扫峰调节聚焦参数,控制最高丰度的同位素离子流强度达到 1×10^{-11} 以上时进行测量。NBS981 标样数据为: $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=36.690 \pm 0.004$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.489 \pm 0.001$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=16.936 \pm 0.002$,全流程本底 $\text{Pb} < 100 \text{ pg}$ 。

4 分析结果

4.1 S 同位素

山后金矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $7.6\text{‰} \sim 8.4\text{‰}$,平均值 7.8‰ ,极差 0.8‰ ,变化范围较小,分布较为集中(表 1)。-150 m 中段平均值 7.7‰ , -486 m 中段平均值 7.9‰ ,深部较浅部矿体含 S 量略高,但在不同深度 S 同位素组成差异不明显,S 同位素在矿体内分布较均匀。

4.2 Pb 同位素

山后金矿床 Pb 同位素 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值分别为 $17.097 \sim 17.271$ 、 $15.44 \sim 15.529$ 、 $37.862 \sim 38.028$,平均值分别为 17.172 、 15.484 、 37.947 (表 2)。其中,-150 m 中段(取样位置参考表 1) $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 平均值分别为 17.238 、 15.450 、 37.980 ; -486 m 中段(取样位置参考表 1) $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 平均值分别为 17.110 、 15.519 、 37.917 ,说明在不同深度 Pb 同位素组成差异不明显。

表 2 山后金矿床 Pb 同位素组成

Table 2 Composition of lead isotopes in Shanhou gold deposit

样号	α	2σ	β	2σ	γ	2σ	μ	ω	k	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
SH-6-1	17.215	0.006	15.453	0.002	37.941	0.001	9.34	40.19	4.16	59.29	12.70	50.64
SH-6-2	17.215	0.004	15.453	0.002	37.941	0.002	9.34	40.19	4.16	59.29	12.70	50.64
SH-6-3	17.249	0.005	15.448	0.002	37.981	0.003	9.32	40.09	4.16	58.68	12.12	50.33

续表 2

样号	α	2σ	β	2σ	γ	2σ	μ	ω	k	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
SH-6-4	17.271	0.005	15.455	0.002	38.011	0.002	9.33	40.16	4.17	59.32	12.51	50.78
SH-6-5	17.239	0.004	15.440	0.002	38.028	0.002	9.31	40.30	4.19	57.98	11.59	51.58
SH-7-1	17.119	0.012	15.529	0.004	37.950	0.004	9.52	41.74	4.24	66.86	19.04	57.92
SH-7-2	17.119	0.009	15.529	0.003	37.950	0.002	9.52	41.74	4.24	66.86	19.04	57.92
SH-7-3	17.106	0.013	15.519	0.004	37.912	0.004	9.50	41.54	4.23	65.86	18.37	56.76
SH-7-4	17.109	0.007	15.518	0.003	37.913	0.002	9.50	41.51	4.23	65.77	18.27	56.64
SH-7-5	17.097	0.012	15.502	0.004	37.862	0.004	9.47	41.18	4.21	64.27	17.14	54.84

注:Pb 同位素特征参数 μ 为 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 、 ω 为 $^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$ 、 k 为 Th/U ; $\Delta\alpha=[\alpha/\alpha_m(t)-1]\times 1\ 000$, $\Delta\beta=[\beta/\beta_m(t)-1]\times 1\ 000$, $\Delta\gamma=[\gamma/\gamma_m(t)-1]\times 1\ 000$, α 、 β 、 γ 分别为本次测试 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值, m 为样品号, t 为模式年龄, Ma; $\alpha_m(t)$ 、 $\beta_m(t)$ 、 $\gamma_m(t)$ 为 t 时的地幔值; t 、 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$ 通过文献[14]计算得到。

5 讨论

5.1 山后金矿床 S、Pb 来源分析

5.1.1 S 来源分析

通过对比不同地质体 S 同位素组成差异,可以进一步分析 S 的来源^[15]。由表 3 可以看出,荆山群 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $8.2\text{‰}\sim 12.0\text{‰}$,平均值 9.9‰ ;粉子山群 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $10.6\text{‰}\sim 13.6\text{‰}$,平均值 12.1‰ ;胶东岩群 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $0\sim 15.4\text{‰}$,平均值 5.0‰ ;TTG 岩系 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $1.0\text{‰}\sim 3.0\text{‰}$,平均值 2.2‰ ;玲珑花岗岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $3.9\text{‰}\sim 10.2\text{‰}$,平均值 8.1‰ ;郭家岭花岗岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $6.0\text{‰}\sim 16.0\text{‰}$,平均值 8.6‰ ;中基性脉岩 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $5.3\text{‰}\sim 10.8\text{‰}$,平均值 6.9‰ ^[16]。

表 3 胶东金矿主要赋矿围岩和招平断裂带中南段典型金矿床 S 同位素组成

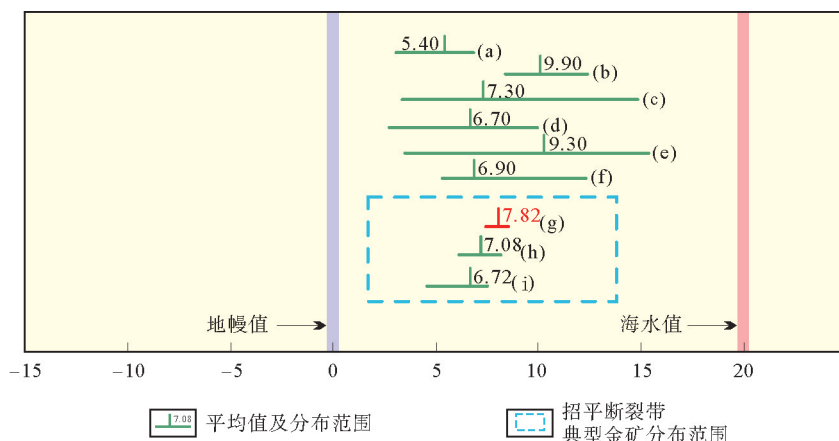
Table 3 Compositions of sulfur isotopes in main ore-hosting wall rocks of Jiaodong gold deposits and typical gold deposits in middle-southern segment of Zhaoping fault zone

地层/岩石/矿床	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	$\Delta\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	样品数量/个	采样位置	备注
荆山群	8.2~12.0	9.9	9	蓬家疃金矿、孔辛头金矿	古元古代
粉子山群	10.6~13.6	12.1	7	37°30'37"N,121°13'27"E	古元古代
胶东岩群	0~15.4	5.0	36	37°17'47"N,120°51'53"E	太古代
TTG 岩系	1.0~3.0	2.2	6	37°23'21"N,120°42'41"E	太古代
玲珑花岗岩	3.9~10.2	8.1	6	玲珑金矿	中生代
郭家岭花岗岩	6.0~16.0	8.6	7	新城金矿	中生代
中基性脉岩	5.3~10.8	6.9	6	玲珑金矿、台上金矿	中生代
山后金矿	7.6~8.4	7.8	10	山后金矿—150 m 中段、—486 m 中段	围岩为玲珑花岗岩
夏甸金矿	6.0~8.1	7.1	10	夏甸金矿—740~—820 m 中段Ⅷ号矿体	围岩为玲珑花岗岩
大尹格庄金矿	4.6~7.9	6.7	19	大尹格庄地下巷道	围岩为玲珑花岗岩

由表 3 可以看出,S 同位素组成差异明显,古元古代变质岩地层(荆山群和粉子山群) $\delta^{34}\text{S}$ 平均值为 $9.9\text{‰}\sim 12.1\text{‰}$,中生代岩浆岩 $\delta^{34}\text{S}$ 的平均值为 $8.1\text{‰}\sim 9.3\text{‰}$,太古代岩系平均值为 $2.2\text{‰}\sim 5.0\text{‰}$ 。中基性脉岩呈脉状侵入多类地质体,其 $\delta^{34}\text{S}$ 的平均值为 6.9‰ ,介于太古代岩系和中生代花岗岩之间,反映中基性脉岩上升侵位过程中混合了多类地质体硫源。

山后金矿床主要地质体为古元古代荆山群变质岩、中生代玲珑花岗岩和中基性脉岩,山后金矿床金矿石中的黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值集中在 $7.6\text{‰}\sim 8.4\text{‰}$,平均值 7.82‰ 。由图 5 看出,高于胶东地区中基性脉岩 $\delta^{34}\text{S}$

平均值,略低于矿体围岩玲珑花岗岩 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值,明显低于荆山群 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值。山后金矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值位于荆山群变化范围低值区,中基性脉岩、玲珑花岗岩变化范围高值区,与区域内夏甸金矿、大尹格庄金矿类似,反映了相似的 S 源特征。



(a)胶东岩群;(b)荆山群;(c)玲珑花岗岩;(d)郭家岭花岗岩;(e)昆崙山花岗岩;
(f)中基性脉岩;(g)山后金矿床;(h)夏甸金矿;(i)大尹格庄金矿

图 5 招平断裂带中南段典型金矿床及主要地质体硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值对比

Fig. 5 Distribution map of $\delta^{34}\text{S}$ values of sulfides in typical gold deposits and main geological bodies in the middle-southern segment of Zhaoping fault zone

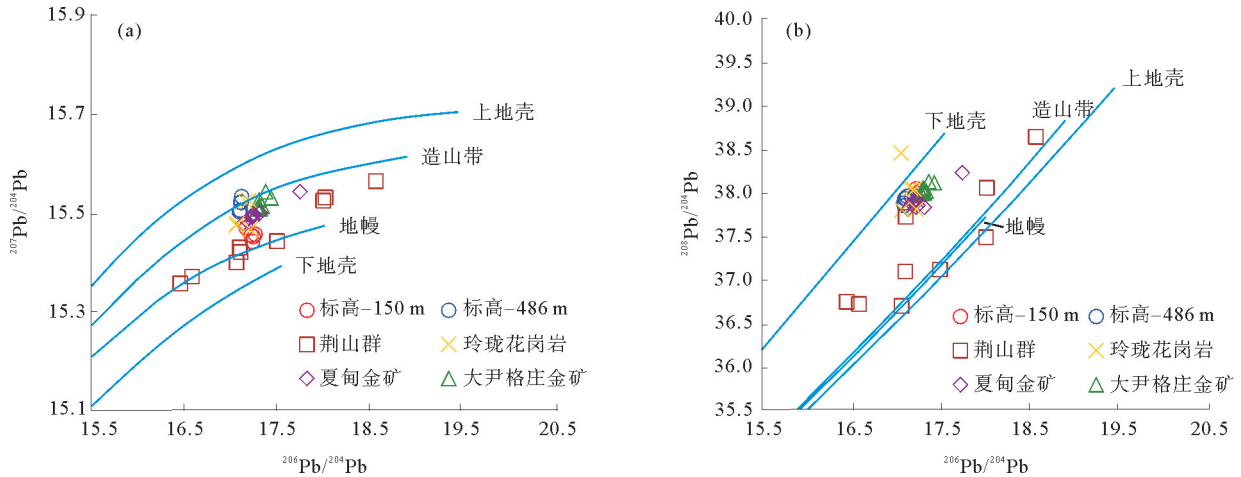
前人^[15]研究表明,胶东金矿 S 来自地幔的原始岩浆流体在上侵过程中混染了大量地壳 S 的混合 S。夏甸金矿成矿流体和成矿物质均来自富集岩石圈地幔^[17]。结合山后金矿床地质特征,矿体主要围岩为荆山群、玲珑花岗岩,对比相邻矿床 S 同位素特征,指示山后金矿床成矿流体具有壳幔混合 S 特征,在上升过程中与围岩发生水岩作用,荆山群、玲珑花岗岩等围岩中的 S 被萃取到成矿流体中,随着外部环境的不断变化,金在适当位置大量析出富集形成矿石。

5.1.2 Pb 来源分析

矿区金矿石 Pb 同位素组成整体变化范围较小, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值均偏低, $\mu(^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb})$ 值集中在 9.31~9.52,具有低 μ 深部 Pb 特征,平均值 9.42,介于地壳 μ 值 9.58 和地幔 μ 值 7.3~8.0,接近地壳 μ 值,指示山后金矿床 Pb 主要来自地壳; $\omega(^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb})$ 值为 40.09~41.74,平均值 40.86,略高于地壳 ω 值 36.50,但整体数值偏低,源区 Th 含量不高,再次佐证了无大量上地壳富 Th 地质体混入; $k(\text{Th}/\text{U})$ 值为 4.16~4.24,平均值 4.20,高于地幔 k 值 3.45 和地壳 k 值 4,但更接近地壳 k 值,比值稳定且偏低,指示源区物质属性均一,成矿流体 Pb 来源稳定。通过山后金矿床不同深部矿体 Pb 同位素测试结果来看,-150、-486 m 的 μ 值平均值分别为 9.328、9.502, ω 值的平均值分别为 40.186、41.542, k 值的平均值分别为 4.168、4.23,显示成矿热液在向上运移过程中 Pb 源有丢失或混染,但整体变化不大。

通过 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 增长曲线(图 6(a))分析,山后金矿床数据点均落在地幔和造山带曲线之间,呈不同标高数据点分散集中的特征,标高-486 m 数据点靠近造山带曲线,标高-150 m 数据点靠近地幔曲线;通过 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 增长曲线图(图 6(b))分析,山后金矿床不同标高数据点落点较为集中,均落在下地壳和造山带曲线之间,并靠近下地壳曲线,两条增长曲线均显示明显壳幔混合 Pb 特征。在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造环境判别图(图 7(a))中,数据点主要落在下地壳中,标高-486 m 数据点靠近下地壳边界,标高-150 m 数据点靠近下地壳集中区;在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造环境判别图(图 7(b))中,不同标高数据点集中落在下地壳范围内,因此,由图 6~7 看出,山后金矿床具有下地壳特征。Pb 同位素 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 成因判别图中(图 8),数据点主要落在造山带 Pb 区间,显示壳幔混合特征,但不同标高略有差异,标高-486 m 数据点落在造山带内,更靠近造山带与上地壳接触带,标高-150 m 数据点

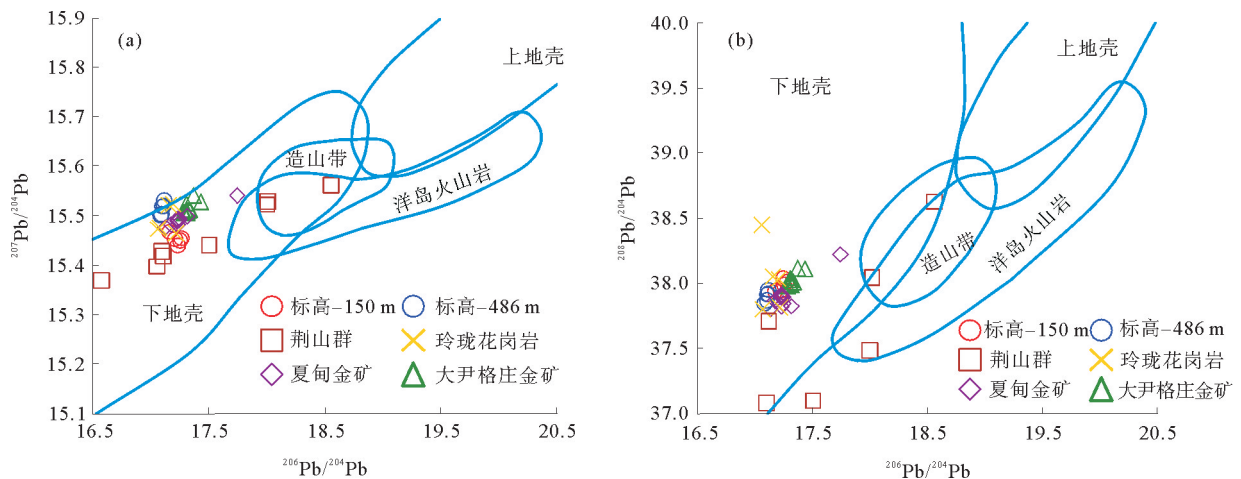
位于造山带内,两组标高数据均反映了山后金矿床 Pb 的壳幔混合来源。



(a) $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 增长曲线; (b) $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 增长曲线; 夏甸金矿数据来自文献[17]; 大尹格庄金矿数据来自文献[18]; 玲珑花岗岩数据来自文献[19]; 荆山群数据来自文献[20]

图 6 山后金矿床矿石 Pb 同位素增长曲线图

Fig. 6 Growth curves of lead isotopes in the ores of Shanhou gold deposit



(a) $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造环境判别图; (b) $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造环境判别图; 夏甸金矿数据来自文献[17]; 大尹格庄金矿数据来自文献[18]; 玲珑花岗岩数据来自文献[19]; 荆山群数据来自文献[20]

图 7 山后金矿床矿石 Pb 同位素构造环境判别图

Fig. 7 Tectonic environment discrimination diagram of lead isotopes in the ores of Shanhou gold deposit

采用 Zartman & Doe 经典壳幔端元^[21]计算壳幔来源贡献比值:

$$X_{\text{地幔}} = \frac{\text{Pb}_{\text{样品}} - \text{Pb}_{\text{LC}}}{\text{Pb}_{\text{M}} - \text{Pb}_{\text{LC}}} \quad (1)$$

式中:地幔端元 $\text{Pb}_{\text{M}} = ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.00$; 下地壳端元 $\text{Pb}_{\text{LC}} = ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.40$, $\text{Pb}_{\text{样品}}$ 为本次计算 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 平均值。由式(1)计算结果可知,地幔贡献 87.58%,下地壳贡献 12.42%。因此,山后金矿床 Pb 元素为壳幔混合来源,但主要来源于岩石圈地幔。

5.1.3 与围岩的关系

研究区出露的地质体按从早到晚的顺序可分为中太古代唐家庄岩群(零星出露)、新太古代栖霞序列片麻岩(出露较少)、古元古代荆山群变质岩、晚侏罗世玲珑花岗岩(矿体主要围岩)和多期次的脉岩。山后金矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值(7.6‰~8.4‰)与荆山群 $\delta^{34}\text{S}$ 值(8.2‰~12.0‰)分布区间有交集,包含在玲珑花岗岩

$\delta^{34}\text{S}$ 值(3.9‰~10.2‰)区间内,结合几类地质体赋存关系分析,说明矿体与荆山群、玲珑花岗岩关系较密切。通过 Pb 同位素图解(图 6~8)可以看出,荆山群 Pb 元素落点较分散,壳幔区域均有分布,说明为壳幔混合来源。而后期形成的玲珑花岗岩落点则较为集中,与区域内金矿 Pb 同位素落点基本重合,主要分布于造山带范围内,进一步说明了山后金矿床成矿物质部分来源于玲珑花岗岩。

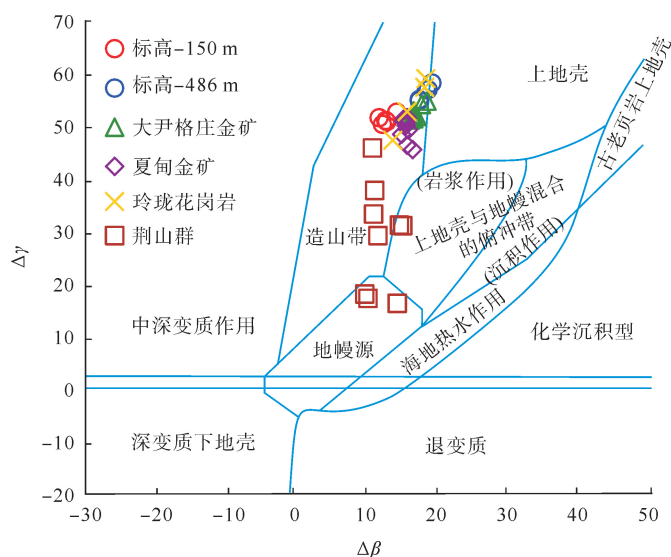


图 8 山后金矿床矿石 Pb 同位素 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 成因判别图解

Fig. 8 Genesis discrimination diagram of $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ for lead isotopes in the ores of Shanhou gold deposit

本次收集前人^[13]在研究区的矿石、围岩(玲珑花岗岩)和脉岩微量元素分析结果,如表 4 显示,断层泥的 Mn、Ti、Li、Co、Ga、Nb、Cd、In、Cs、Tl、Y、Th、U 含量较高,其余元素含量中等;闪长玢岩的 Cr、Ti、Co、Ni、Ga 含量较高,Ba、Li、Rb、Nb、Cs、Th 含量中等,其余元素含量较低;玲珑花岗岩的 Ba、Rb 含量较高,Ga、Nb、Th 含量中等,其余元素含量较低。除 Mn、Ni 元素外,金矿石的微量元素含量与玲珑花岗岩相近。微量元素含量特征进一步证实了花岗岩与金成矿之间存在紧密联系,说明玲珑花岗岩可能为其成矿母岩,同前述分析结果一致。

表 4 山后金矿床深部矿体及围岩微量元素结果^[13]

Table 4 Trace element results of deep ore body and surrounding rock in Shanhou gold deposit

岩性	Ba	Cr	Mn	Ti	Li	Co	Ni	Ga	Rb	Nb	Cd	In	Cs	Tl	Y	Th	U
断层泥	515	86.59	583	3 449	35.04	24.99	55.63	18.73	131.91	61.56	2.02	0.51	74.71	5.83	22.32	66.74	20.72
玲珑花岗岩	1 684	27.40	295	1 264	9.44	7.27	23.26	20.30	131.73	9.72	0.10	0.03	1.14	0.47	13.22	6.75	1.60
闪长玢岩	988	161.00	718	3 771	24.63	26.91	115.76	17.02	90.43	7.36	0.12	0.05	3.18	0.47	14.47	4.77	1.09
绢英岩化花岗岩 质碎裂岩	1 166	19.03	762	1 582	10.76	9.37	13.16	19.21	119.97	10.15	0.14	0.04	1.55	0.49	18.26	6.96	2.06
(黄铁)绢英岩 化碎裂岩	865	29.59	303	1 107	10.76	9.37	13.16	19.21	119.97	10.15	0.14	0.04	1.55	0.49	20.39	6.96	2.06

5.2 招平断裂带南段金成矿物质来源及金成矿过程

山后金矿床与夏甸、大尹格庄金矿床均为招平断裂控制的蚀变岩型金矿,三个矿床均由南向北分布,主矿体均位于主断裂面下盘靠近主裂面位置,具备相似的成矿背景。研究表明,金矿床的 S 同位素组成与赋围岩有关,不同矿床 S 同位素组成存在差异,山后金矿床黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值集中在 7.6‰~8.4‰,平均值

7.82‰,变化范围较窄,夏甸金矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 6.0‰~8.1‰,平均值 7.08‰;大尹格庄金矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 4.6‰~7.9‰,平均值 6.72‰;金矿 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值由南向北呈递减趋势,低于围岩荆山群变质岩和玲珑花岗岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值(图 5)。

山后、夏甸、大尹格庄金矿床 Pb 同位素特征相似:由图 6 可以看出,三者的 Pb 源均以壳幔混合为主,且具有下地壳 Pb 的特征;由图 7 可以看出,三者都位于造山带区间,也指示壳幔混合来源;图 8 显示,三者多位于造山带区间,少数落在造山带与上地壳交界处。以上分析说明,三者 Pb 源具备高度相似性,均显示壳幔混合来源,且接近下地壳 Pb 的特征,说明三个矿区具有相似的成矿物质来源。

综上所述,山后金矿床主成矿阶段载金黄铁矿的 S、Pb 同位素均具有明显的壳幔混合来源特征,在成矿热液上升阶段混染了部分围岩 S、Pb 同位素特征,与邻区夏甸、大尹格庄金矿床 S、Pb 同位素特征相似。此外,山后和夏甸金矿具有相似的 He-Ar 同位素特征,山后金矿床 He-Ar 同位素特征指示成矿流体为地幔和地壳的混合流体^[6],夏甸金矿床 He-Ar 同位素特征指示成矿流体来自岩石圈地幔,在上升途中萃取了基底变质岩中的部分成矿物质^[13]。结合本研究 S-Pb 同位素特征,说明三矿区成矿物质来源相似,具备相同的成矿背景。据前人研究,夏甸金矿床热液独居石激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometer, LA-ICP-MS)年龄为 $120.0 \pm 1.4 \text{ Ma}$ ^[17],大尹格庄金矿床 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄为 $119.1 \pm 1.2 \text{ Ma}$ ^[18],山后金矿床热液独居石 LA-ICP-MS 年龄为 $115.4 \pm 2.7 \text{ Ma}$ ^[19],山后金矿床成矿年代与区域成矿时间相近。三个矿床均为招平断裂带控制的蚀变岩型金矿,且主矿体均位于招平断裂带下盘、靠近主裂面位置。结合区域地质背景,对招平断裂带南段金成矿过程提出以下观点:

中一新太古代经历了频繁的岩浆作用,金伴随岩浆作用从幔源带入地壳,形成胶东金矿的“初始矿源层”——胶东岩群和唐家庄岩群,太古代岩浆活动引发原始地壳重熔,形成栖霞序列 TTG 片麻岩^[22]。古元古代由于强烈造山作用导致地幔上隆,强烈改造“初始矿源层”^[23],形成荆山群变质岩,金元素初步富集,且荆山群混合了较多幔源物质,荆山群中的 Pb 同位素呈分散分布(图 6~8)。晚侏罗世,扬子板块与华北板块碰撞造山,胶北隆起发生地壳重熔,使得英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩(tonalite-trondhjemite-granodiorite, TTG)片麻岩和荆山群变质岩部分熔融,形成了晚侏罗世玲珑花岗岩^[24],且 Pb 同位素呈集中分布(图 6~8)。早白垩世,受太平洋板块活动影响,招平断裂带南段岩浆活动频繁,进一步活化了玲珑花岗岩中的金元素,进而富集成矿,为区域上的成矿高峰期^[20]。

6 结论

1) 山后金矿床载金黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 7.6‰~8.4‰,极差为 0.8‰,平均值为 7.82‰,S 同位素呈富集特征,说明 S 同位素的均一程度高,对比矿体与围岩 S 同位素特征,发现山后金矿床与赋矿围岩的 S 同位素组成相似,成矿流体具壳幔混合 S 特征。

2) 山后金矿床载金黄铁矿 Pb 同位素 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 17.097~17.271; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 15.440~15.529; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 37.862~38.028,经样品投点分析认为金成矿物质为壳幔混合来源,主要来源为岩石圈地幔,贡献达 87.58%,仅 12.42%成矿物质来自下地壳。

3) 山后金矿床与区域典型金矿床的成矿物质来源具有相似性,均为壳幔混合来源,显示了相似的 S、Pb 同位素特征;成矿物质来源于研究区内古元古代荆山群变质岩、晚侏罗世玲珑花岗岩。

参考文献:

- [1] 邓军,王庆飞,张良,等.胶东型金矿成因模型[J].中国科学:地球科学,2023,53(10):2323-2347.
- [2] 刘国栋,宋国政,鲍中义,等.胶东招平断裂北段深部找矿新突破及对断裂空间展布的新认识[J].大地构造与成矿学,2019,43(2):226-234.
- LIU Guodong, SONG Guozheng, BAO Zhongyi, et al. New breakthrough of deep prospecting in the northern section of

- the Zhaoping fault zone and the new understanding of fault distribution in the Jiaodong district[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2019, 43(2): 226-234.
- [3] DENG J, YANG L Q, LI H R, et al. Regional structural control on the distribution of world-class gold deposits: An overview from the Giant Jiaodong Gold Province, China[J]. *Geological Journal*, 2018, 54: 378-391.
- [4] 徐述平, 杨立强. 山东招平断裂系统构造-蚀变-矿化水平-分带特征[J]. *矿床地质*, 2010, 29: 1009-1010.
- XU Shuping, YANG Liqiang. Characteristics of structure-alteration-mineralization-zoning of the Zhaoping fault system in Shandong Province[J]. *Mineral Deposits*, 2010, 29: 1009-1010.
- [5] 郭云成, 段留安, 韩小梦, 等. 胶东前垂柳金矿区花岗岩锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征及其地质意义[J]. *现代地质*, 2022, 36(3): 876-897.
- GUO Yuncheng, DUAN Liuan, HAN Xiaomeng, et al. Zircon U-Pb age and geochemical characteristics of granites from the Qianchuilu Gold Mine in the Jiaodong Peninsula and its geological significance[J]. *Geoscience*, 2022, 36(3): 876-897.
- [6] 韩小梦, 郭云成, 段留安, 等. 胶莱盆地东北缘前垂柳金矿床 S、Pb 同位素组成: 对成矿物质来源的指示[J]. *地质科技通报*, 2023, 42(3): 210-221.
- HAN Xiaomeng, GUO Yuncheng, DUAN Liuan, et al. S and Pb isotopic compositions of the Qianchuilu Gold Deposit on the northeastern margin of the Jiaolai Basin: Implication on the source of ore-forming material[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(3): 210-221.
- [7] 王巧云, 张文, 郭晶, 等. 胶东山后金矿成矿流体氦氩同位素地球化学特征[J]. *地质论评*, 2024, 70(增 1): 177-179.
- WANG Qiaoyun, ZHANG Wen, GUO Jing, et al. Geochemical characteristics of helium and argon isotopes of ore-forming fluid in Shanhou gold deposit, Jiaodong Peninsula[J]. *Geological Review*, 2024, 70(S1): 177-179.
- [8] 张良, 刘跃, 李瑞红, 等. 胶东大尹格庄金矿床铅同位素地球化学[J]. *岩石学报*, 2014, 30(9): 2468-2480.
- ZHANG Liang, LIU Yue, LI Ruihong, et al. Lead isotope geochemistry of Dayingezhuang gold deposit, Jiaodong Peninsula, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(9): 2468-2480.
- [9] 王来明, 王金辉, 任天龙, 等. 胶东金矿与中生代区域性花岗岩关系及成矿预测和找矿方向[J]. *山东国土资源*, 2024, 40(3): 6-22.
- WANG Laiming, WANG Jinhui, REN Tianlong, et al. Relationship between Jiaodong gold deposit and mesozoic regional granite metallogenic predication and prospecting direction[J]. *Shandong Land and Resources*, 2024, 40(3): 6-22.
- [10] 汪在聪, 王焰, 汪翔, 等. 交代岩石圈地幔与金成矿作用[J]. *地球科学*, 2021, 46(12): 4197-4229.
- WANG Zaicong, WANG Yan, WANG Xiang, et al. Metasomatized lithospheric mantle and gold mineralization[J]. *Earth-Science*, 2021, 46(12): 4197-4229.
- [11] 王青, 程东江, 曹瑞, 等. 招平断裂带南段南墅金矿地质特征及成矿远景[J]. *山东国土资源* 2018, 34(7): 14-19.
- WANG Qing, CHENG Dongjiang, CAO Rui, et al. Geological characteristics and metallogenic prospects of Nanshu gold deposit in the south of Zhaoping fault zone[J]. *Shandong Land and Resources*, 2018, 34(7): 14-19.
- [12] 王铎融. 山东莱西山后金矿床地质特征及矿化富集规律[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- WANG Duorong. The study of the geological characteristics and enrichment regularities of mineralization of Shanhou deposit in Laixi City, Shandong Province[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [13] 韦星, 计文化, 王建田, 等. 胶东地区招平断裂带中-南段断裂与金矿成矿关系研究[J]. *西北地质*, 2025, 58(2): 225-239.
- WEI Xing, JI Wenhua, WANG Jiantian, et al. Research on the relationship between fault and gold mineralization in the middle-south section of Zhaoping fault zone in Jiaodong Peninsula[J]. *Northwestern Geology*, 2025, 58(2): 225-239.
- [14] 路远发. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. *地球化学*, 2004, 33(5): 459-464.
- LU Yuanfa. GeoKi: A geochemical toolkit for microsoft excel[J]. *Geochimica*, 2004, 33(5): 459-464.
- [15] 毛光周, 王向军, 邓冰红, 等. 金属矿床成矿物质来源的几种常用同位素地球化学研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 35(1): 19-29.
- MAO Guangzhou, WANG Xiangjun, DENG Binghong, et al. Geochemical analysis of several common isotopes in ore-forming material sources of metal deposits[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology Natural Science*, 2016, 35(1): 19-29.
- [16] 李杰, 安梦莹, 宋明春, 等. 胶东金矿硫同位素组成特征及其来源[J]. *地质通报*, 2022, 41(6): 994-1008.

- LI Jie, AN Mengying, SONG Mingchun, et al. Sulfur isotopic composition and its source of Jiaodong gold deposit[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(6): 994-1008.
- [17] 李逸凡, 李洪奎, 韩学林, 等. 胶东夏甸金矿床成因: 流体包裹体及同位素证据[J]. 黄金科学技术, 2021, 29(2): 184-199.
- LI Yifan, LI Hongkui, HAN Xuelin, et al. Genesis of Xiadian gold deposit in Jiaodong: Evidence from fluid inclusions and isotopes[J]. Gold Science and Technology, 2021, 29(2): 184-199.
- [18] 严子清, 石文杰, 张鹏涛, 等. 胶东大尹格庄金矿成矿流体时空演化及矿床成因来自流体包裹体、成矿元素和 H-O-S-Pb 同位素证据[J]. 地质科技通报, 2024, 43(2): 156-174.
- YAN Ziqing, SHI Wenjie, ZHANG Pengtao, et al. Ore genesis and vertical variations of ore-forming fluids in the Dayingezhuang gold deposit, Jiaodong Peninsula: Constraints from fluid inclusions, ore forming elements, and H-O-S-Pb isotopes[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(2): 156-174.
- [19] 王来明, 王金辉, 任天龙, 等. 胶东金矿成矿物质来源与成矿过程[M]. 北京: 地质出版社, 2024.
- [20] 宋明春, 丁正江, 刘向东, 等. 胶东型金矿床断裂控矿构造及成矿模式[J]. 地质学报, 2022, 96(5): 1774-1802.
- SONG Mingchun, DING Zhengjiang, LIU Xiangdong, et al. Structural controls on the Jiaodong type gold deposits and metallogenic model[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(5): 1774-1802.
- [21] ZARTMAN R E, DOE B R. Plumbotectonics; The model[J]. Tectonophysics, 1981, 75(1/4): 135-162.
- [22] WANG Q F, ZHAO H S, YANG L, et al. Formation of the giant Cretaceous Jiaodong-type orogenic gold province of the North China Craton: A consequence of lithospheric multi-layer reworking[J]. Geoscience Frontiers, 2025, 16(3): 43-58.
- [23] ZHANG L, ROBERTO F W, YANG L Q, et al. Mesozoic orogenic gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China: A focused event at 120 ± 2 Ma during cooling of pregold granite intrusions[J]. Economic Geology, 2020, 115(2): 415-441.
- [24] 迟乃杰, 韩作振, 单伟, 等. 胶东郭家岭序列北截杂岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学、岩石学、地球化学特征及构造意义[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2021, 40(5): 30-42.
- CHI Naijie, HAN Zuozhen, SHAN Wei, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology, petrology, geochemical characteristics and tectonic significance of Beijie complex of Guojialing sequence in Jiaodong Peninsula[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2021, 40(5): 30-42.

(责任编辑:高丽华)