

文章编号:1004-4116(2022)01-0029-07

试论早子沟金矿成矿作用过程中地幔流体的参与

代文军,陈耀宇

(甘肃省地矿局第三地勘院,甘肃 兰州 730050)

摘要:早子沟金矿地处夏河—合作—岷县区域性深大断裂带南侧,在时空上受断裂和壳幔混合岩浆双重控制。通过对矿床主要控矿因素、矿石稀土地球化学、流体包裹体及S、H、O、Pb同位素的系统研究,在探讨成矿流体来源的基础上,对地幔流体参与金矿成矿作用的可能性进行了探讨。研究表明:矿石稀土元素配分模式表现出轻稀土富集的特征;矿床流体包裹体气相成分主要为H₂O和CO₂,含少量CH₄、N₂等,液相成分阳离子以Na⁺、K⁺为主,含少量Ca²⁺、Mg²⁺,阴离子以SO₄²⁻、Cl⁻为主;黄铁矿、辉锑矿矿物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 介于-10.30‰~-4.9‰之间,平均-8.33‰,反映成矿作用过程有地层硫的加入;氢、氧同位素显示成矿流体既有岩浆水和地幔初生水的参与,亦有大气降水的加入;矿石铅同位素组成显示铅来源于壳幔的混合。以上说明成矿流体具多源性,暗示地幔流体参与了矿床成矿作用。

关键词:地幔流体;流体包裹体;稀土元素地球化学;成矿作用;早子沟金矿;甘肃

中图分类号:P 588.1;P 597

文献标志码:A

早子沟金矿(又称枣子沟金矿)是西秦岭地区十余年来勘查评价的特大型金矿之一。矿床发现至今,众多地质工作者从矿床地质及矿床成因^[1-3]、矿床地球化学^[4-6]、成矿流体包裹体^[7-9]、围岩蚀变与金矿化关系^[10]、中性岩脉与成矿关系^[11]、成矿年代学^[12]等诸多方面进行了研究,取得了丰硕的研究成果。但对矿床成矿流体的来源还存在着不同的看法和认识:吕新彪等^[1]、曹晓峰等^[4]认为成矿流体主要来源于大气降水,第鹏飞^[6]、刘东晓等^[9]认为可能来源于岩浆水/变质水与大气降水混合,陈瑞莉等^[8]认为来源于大气降水和岩浆水的混合,刘勇等^[12]认为来源于岩浆水和建造水的混合,笔者^[5]通过矿石稀土元素地球化学特征的研究,推断地幔流体可能参与了成矿作用。本文在前人研究成果的基础上,通过矿床主要控矿因素、矿石稀土地球化学、流体包裹体及S、H、O、Pb同位素等方面的系统研究,在探讨矿床成矿流体来源的基础上,着重对地幔流体参与成矿作用的可能性进行了探讨,以期对矿床成矿机制研究提供一些依据。

1 矿区地质及矿化特征概况

早子沟金矿处于西秦岭褶皱带北部断褶带与中部裂隙槽过渡部位^[10-11],地处夏河—合作—岷县区域性深大断裂带南侧(图1)。

矿区出露地层为三叠系古浪堤组下段(T₂g¹)和第四系冲洪积物(图1)。古浪堤组下段岩性以硅质板岩、岩屑长石细砂岩夹粉砂质板岩为主,矿区中部发育的条带状硅质板岩、粉砂质板岩及泥质板岩为主要赋矿岩石。

矿区断裂构造十分发育,主要有早期形成的NE向张扭性断裂、NW向压性断裂、近SN向压扭性断裂和晚期形成的NWW向压性断裂,它们也是区内主要的控矿构造。

矿区岩浆岩多为呈岩脉、岩枝状产出的浅成侵入体,主要有黑云闪长玢岩、石英闪长玢岩、闪长玢岩、花岗闪长斑岩和斜长花岗斑岩等,其中闪长玢岩、黑云闪长玢岩和石英闪长玢岩与金矿化有密切成因联系^[11]。地球化学研究表明,岩石属壳幔混合型

收稿日期:2021-09-07

作者简介:代文军(1974~),男,高级工程师,主要从事地质矿产调查、区域成矿规律及成矿预测工作。E-Mail:daiwj1974@126.com

岩浆^[3]。

矿带分布于合作市早子沟的一号沟至四号沟和夏河县格娄昂。矿化主要赋存于中性岩脉与围岩接触部位、中性岩脉内及断裂破碎带中。矿化受断裂和中性岩脉双重控制,呈脉状、不规则脉状、长条状产出。围岩蚀变强烈,具多期和多种蚀变共存的特点。其中硅化、黄铁矿化、毒砂化、辉锑矿化、褐铁矿化等与金矿化密切相关^[2]。矿石矿物成分复杂,金属矿物较多,黄铁矿、毒砂、褐铁矿及辉锑矿为主要的载金矿物。见少量的磁铁矿、磁黄铁矿、赤铁矿、白铁矿、黄铜矿、铜蓝、辉铜矿、黝铜矿、方铅矿、闪锌矿、自然锑、锑华、锑铁矿等。脉石矿物主要为石英,其次为白云母、白云石、黑云母、方解石、高岭石等。矿石结构主要为自形一半自形晶、它形晶粒状、碎裂、交代残余、包含、假象结构等,矿石构造主要为星散浸染状、脉状、细脉浸染状及块状构造等。

截止2016年,矿区共圈定金矿体433个。其中主矿体18个,以Au1、Au9、M4、M6、Au30为代表。从矿体的空间展布特点,可将其分为NE向、NW向和近SN向3个矿带,前二者产于早子沟,后者主体位于格娄昂。以NE向矿带为主矿带,分布有258个矿体,其中主矿体10个,以Au1矿体和Au9矿体为主,金平均品位 3.61×10^{-6} 。NW向矿带有59个矿体,其中主矿体1个,为Au14矿体,金平均品位 2.54×10^{-6} 。近SN向矿带有108个矿体,其中主矿体5个,以Au30矿体为代表,金平均品位 $2.16 \times 10^{-6} \sim 2.91 \times 10^{-6}$ 。叠加于NE向矿带的缓倾斜矿体8个,其中主矿体2个,为M4矿体和M6矿体,金平均品位 $3.10 \times 10^{-6} \sim 4.00 \times 10^{-6}$ 。矿石类型主要为闪长玢岩型和板岩型,在缓倾斜矿体中见硫化物石英脉型。

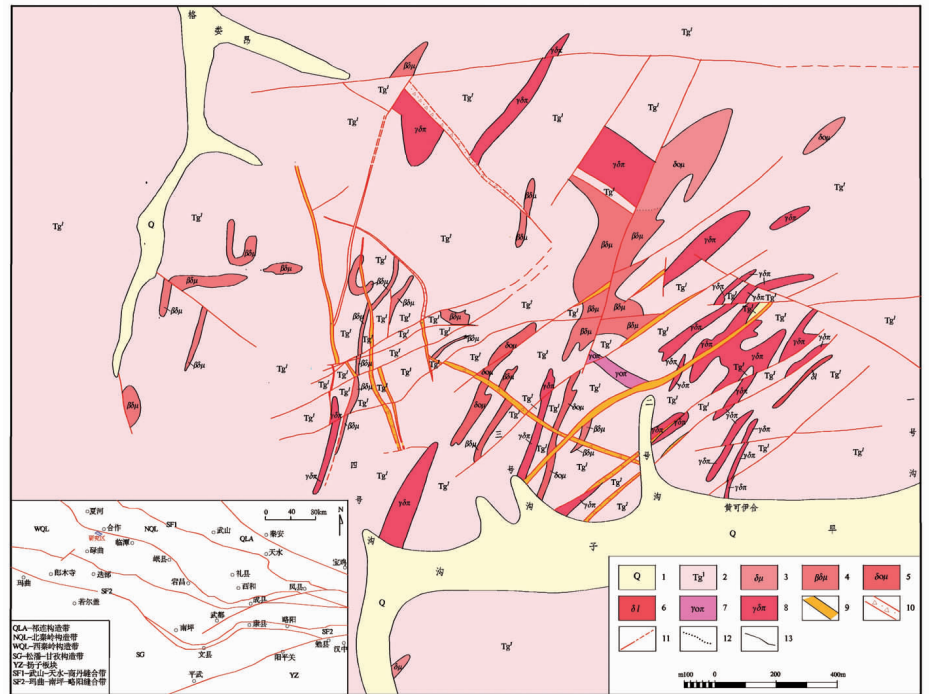


图1 早子沟金矿矿区地质略图(据参考文献[11],略有修改)

Fig. 1 Geological sketch of Zaozigou gold deposit

- 1—第四系;2—三叠系古浪堤组下段;3—闪长玢岩;4—黑云母闪长玢岩;5—石英闪长玢岩;
6—细晶闪长岩;7—斜长花岗斑岩;8—花岗闪长斑岩;9—金矿体;10—断层破碎带;
11—断层;12—岩相界线;13—地质界线

2 矿石稀土元素特征

矿区矿石的稀土元素分析结果表明(表1),矿石的稀土总量变化不大, $\sum \text{REE} = 124.66 \times 10^{-6} \sim 169.73 \times 10^{-6}$; $\delta \text{Eu} = 0.53 \sim 0.66$, 钕具明显负异常。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图上表现出相对富集LREE的右倾型特征(图2),这与地幔流体富集LREE特征相类似^[14-15]。

3 流体包裹体特征

矿床流体包裹体研究发现^[7],矿区不同岩脉石英中的流体包裹体有 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 、 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 3种类型,其中 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 呈单相或两相包裹体(LH_2O 、 $\text{LH}_2\text{O} + \text{VH}_2\text{O}$),大小在 $2 \sim 12 \mu\text{m}$ 之间,形态有粒状、椭圆状、多边形及不规则状等; $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 呈三相包裹体($\text{LH}_2\text{O} + \text{LCO}_2 + \text{VH}_2\text{O}$),大小在 $5 \sim 13 \mu\text{m}$ 之间,形态有椭圆状、多边形状及不规则状等; $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 呈分散状分布于其它包裹体中。气相成分主要为 H_2O 和 CO_2 ,含少量 CH_4 、 N_2 和 H_2 。陈

表 1 早子沟金矿矿石稀土元素分析结果表(10⁻⁶)

Table 1 REE analysis of gold ore samples from Zaozigou gold deposit

样品编号	类型	岩石名称	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er
2003Ⅲxt-3	矿石	金矿石(闪长玢岩)	32.5	56.3	6.06	24.0	4.79	0.95	4.20	0.58	3.92	0.79	2.22
2004ⅡX-1		金矿石(闪长玢岩)	39.4	66.1	6.83	30.0	5.86	1.12	4.16	0.63	3.13	0.52	1.24
2004ⅡX-2		金矿石(闪长玢岩)	24.4	44	4.78	20.3	3.67	0.59	2.99	0.57	3.43	0.72	1.84
样品编号	类型	岩石名称	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE/HREE	δEu	δCe			
2003Ⅲxt-3	矿石	金矿石(闪长玢岩)	0.34	2.13	0.29	9.0	148.07	8.61	0.63	0.90			
2004ⅡX-1		金矿石(闪长玢岩)	0.18	1.03	0.13	9.4	169.73	13.55	0.66	0.89			
2004ⅡX-2		金矿石(闪长玢岩)	0.30	1.82	0.25	15.0	124.66	8.2	0.53	0.92			

资料来源:据参考文献[5]

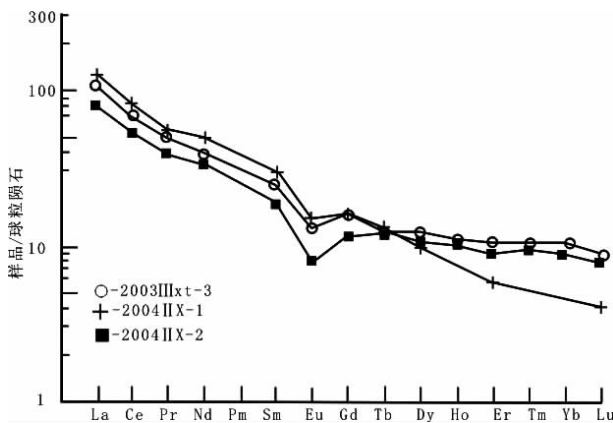


图 2 早子沟金矿矿石稀土元素配分模式
(底图及球粒陨石值据参考文献[13])

Fig. 2 REE assemblage parttern of gold ore sample from Zaozigou gold deposit

瑞丽等(2018)^[8]认为,矿床主成矿期脉体石英中流体包裹体主要为气液两相包裹体(LH₂O + VH₂O)和含CO₂三相包裹体(LH₂O + LCO₂ + VCO₂),气相成分以H₂O和CO₂为主,含少量CH₄、N₂、C₂H₄和H₂S,液相成分阳离子以Na⁺、K⁺为主,含少量Ca²⁺、Mg²⁺,阴离子以SO₄²⁻、Cl⁻为主。

综上所述,矿床不同岩脉和主成矿期流体包裹体的气相成分以H₂O和CO₂为主,与地幔流体富含CO₂、H₂O、H₂的特征相类似^[16-17],推断地幔流体可能参与了成矿作用。

4 同位素地球化学特征

4.1 硫同位素

矿床不同矿石和不同矿体的硫同位素分析结果(表 2)表明,不同矿石和不同矿体的硫同位素(δ³⁴S_{v-CDT})值基本相近,且较稳定。δ³⁴S_{v-CDT}介于-10.30‰~-4.9‰之间,平均-8.33‰,其负值

说明与细菌还原硫蒸气有关,成矿作用过程有地层硫的加入。Deines(1995)^[18]认为,地幔来源的硫具陨硫铁的同位素组成特征,变化于0‰附近,较大的δ³⁴S值(-6‰~+6‰)与地壳再循环有关;郑永飞等(2000)^[19]认为,岩浆SO₂去气作用可使岩石中的硫化物显著亏损³⁴S,δ³⁴S值变化范围为0‰~-8‰;Rye R O等(1974)^[20]认为,来自同一源区的硫,因氧化还原、交代作用和动力学过程产生的分馏,其δ³⁴S偏差不会超过±10‰。从表 2 可知,矿床不同矿石和不同矿体及不同实验室测试的硫同位素值变化范围较小,反映硫来自同一源区,是均一的。

结合区域地质背景及矿区地质特征,推测与区域碰撞过程中地壳再循环组分加入和深源流体沿深大断裂上升过程中与地层岩石发生硫同位素交换有关。

4.2 氢、氧同位素

矿床氢、氧同位素分析结果(表 2)表明,样品的δD_{SMOW}介于-91‰~-67.4‰之间,δ¹⁸O_水介于-7.96‰~+12.5‰之间,与地幔初生水的δD_{SMOW}值(-50‰~-80‰)^[17]和δ¹⁸O_水值(+5‰~+7‰)^[19]相近。反映矿床具有地幔初生水来源的特征。在δD_{SMOW}-δ¹⁸O_{H₂O}图解中(图 3),4件样品的投点位于岩浆水右下侧。王志军等研究认为^[21],岩浆与地幔在地质作用过程中常常是混合在一起的。由此推断,成矿作用过程中有岩浆流体和地幔初生水的参与;2件样品的投点位于雨水线附近,显示成矿流体有大气降水的加入。

4.3 铅同位素

由不同类型矿石的铅同位素组成及参数可见(表 3),矿石的²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb介于18.166~18.9884之间,²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb介于15.608~15.741之间,²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb

表 2 早子沟金矿硫、氢、氧同位素分析结果表(‰)

Table 2 Sulphur, hydrogen and oxygen isotope of ore sample in Zaozigou gold deposit

序号	样号	矿石类型/矿体	测定对象	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$	$\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$	资料来源
1	04 II TWS-1	闪长岩型金矿石	黄铁矿	-7.47				参考文献[3]
2	04 II TWS-5	板岩型金矿石	黄铁矿	-9.26				
3	04 II TWS-6	板岩型金矿石	黄铁矿	-8.32				
4	04 II TWS-6	板岩型金矿石	黄铁矿	-8.22				
5	Z-46-3	29号矿体	黄铁矿	-8.59				参考文献[4]
6	F-22-1	9号矿体	黄铁矿	-8.62				
7	Z-32-3	1号矿体	辉锑矿	-8.93				
8	F-21-2	9号矿体	辉锑矿	-9.03				
9	9号矿体	9号矿体	辉锑矿	-8.99				
10	DZ7-1C	石英辉锑矿脉型金矿石	辉锑矿	-8.10				参考文献[8]
11	M6-1A	石英辉锑矿脉型金矿石	辉锑矿	-9.20				
12	M6-1B	石英辉锑矿脉型金矿石	辉锑矿	-9.10				
13	M6-1C	石英辉锑矿脉型金矿石	辉锑矿	-8.90				
14	M6-3B	石英辉锑矿脉型金矿石	辉锑矿	-9.80				
15	M6-3C	石英辉锑矿脉型金矿石	辉锑矿	-10.30				
16	CS-3A	石英辉锑矿脉型金矿石	辉锑矿	-9.40				
17	CS-2	石英辉锑矿脉型金矿石	辉锑矿	-9.80				
18	Z034	闪长岩型金矿石	黄铁矿	-6.6				参考文献[12]
19	Z035	闪长岩型金矿石	黄铁矿	-4.9				
20	Z038	闪长岩型金矿石	黄铁矿	-5.0				
21	Z061	板岩型金矿石	黄铁矿	-6.5				
22	F-21-2	9号矿体	石英			-67.4	-7.96	参考文献[4]
23	Z-32-3	1号矿体	石英			-68.8	-7.29	
24	Z005	闪长岩型金矿石	石英		21.6	-86	12.5	参考文献[12]
25	Z020	闪长岩型金矿石	石英		19.7	-91	12.1	
26	Z033	闪长岩型金矿石	石英		22.1	-90	12.4	
27	Z055	闪长岩型金矿石	石英		19.0	-91	12.1	

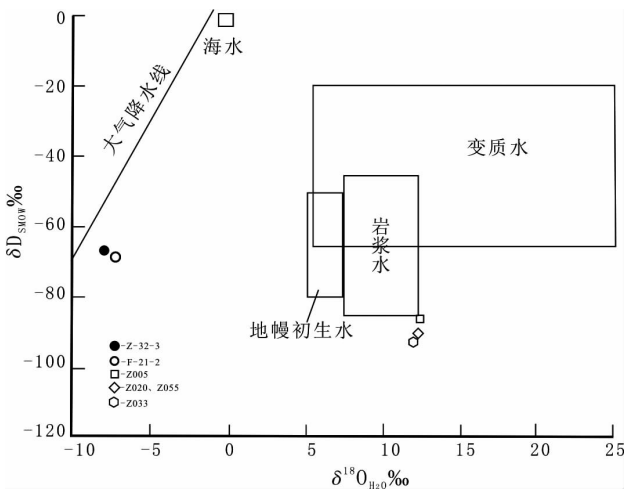


图 3 早子沟金矿 $\delta\text{D}_{\text{SMOW}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 图解
(底图据参考文献[19])

Fig. 3 Diagram of $\delta\text{D}_{\text{SMOW}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$

介于 38.067 8 ~ 39.275 之间。反映铅同位素组成变化范围较窄,且较相近。 μ 值(9.52 ~ 9.68)高于地幔(8.92)^[23]和正常铅(8.686 ~ 9.238)^[24],低于造山带(10.87)^[23]。 Th/U 值(3.66 ~ 3.81)高于地幔(3.45)^[25]和中国大陆上地壳平均值(3.47)^[24],与全球上地壳平均值(3.88)^[24]基本相当。说明矿石中的铅主要来自上地壳。

在 Zartman 和 Doe(1981)^[26]的铅同位素构造模式图中(图 4 a、4 b),样品投影点主要集中于造山带演化线附近,少数位于上地壳演化线附近,反映铅来源于造山带或上地壳。吴开兴等(2002)^[24]认为,在铅同位素构造模式图中,位于造山带演化线下方的投点来自于下地壳或地幔,位于造山带演化线上方的投点包含了上地壳组分,位于造山带演化线附近的投点为各铅储库的混合。由此认为,矿床的铅非单一

表 3 早子沟金矿矿石铅同位素组成及有关参数

Table 3 Lead isotope composition of gold ore sample and some parameters

序号	样品编号	矿石名称	测定对象	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Pb}$	μ	ω	Th/U	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$	资料来源
1	DZ7-1C	石英辉锑矿脉型金矿石	辉锑矿	18.489	15.635	38.446	9.51	37.16	3.78	55.91	13.29	21.68	参考文献[8]
2	M6-1A	石英辉锑矿脉型金矿石	辉锑矿	18.544	15.634	38.495	9.54	37.55	3.81	59.05	13.22	22.99	
3	M6-1B	石英辉锑矿脉型金矿石	辉锑矿	18.324	15.637	38.369	9.53	37.03	3.76	46.49	13.42	19.64	
4	M6-1C	石英辉锑矿脉型金矿石	辉锑矿	19.027	15.741	39.275	9.52	36.45	3.71	86.64	20.16	43.72	
5	M6-3B	石英辉锑矿脉型金矿石	辉锑矿	18.460	15.639	38.532	9.52	35.96	3.66	54.25	13.55	23.97	
6	M6-3C	石英辉锑矿脉型金矿石	辉锑矿	18.534	15.649	38.531	9.53	36.60	3.72	58.48	14.19	23.94	
7	CS-3A	石英辉锑矿脉型金矿石	辉锑矿	18.166	15.608	38.249	9.55	36.63	3.71	37.46	11.54	16.45	
8	CS-3B	石英辉锑矿脉型金矿石	辉锑矿	18.526	15.634	38.551	9.68	37.86	3.79	58.02	13.22	24.48	
9	Z034	闪长岩型金矿石	黄铁矿	18.690 4	15.673 2	38.829 2	9.58	37.27	3.77	81.11	22.35	38.64	参考文献[12]
10	Z035	闪长岩型金矿石	黄铁矿	18.726 6	15.675 8	38.646 4	9.58	36.37	3.67	81.44	22.43	32.75	
11	Z038	闪长岩型金矿石	黄铁矿	18.988 4	15.708 4	39.067 8	9.62	36.96	3.72	94.12	24.44	42.62	
12	Z061	板岩型金矿石	黄铁矿	18.442 4	15.640 5	38.642 9	9.54	37.56	3.81	77.45	20.80	39.72	

注:参数用长江大学路远发教授开发的 Geokit 软件计算^[2]

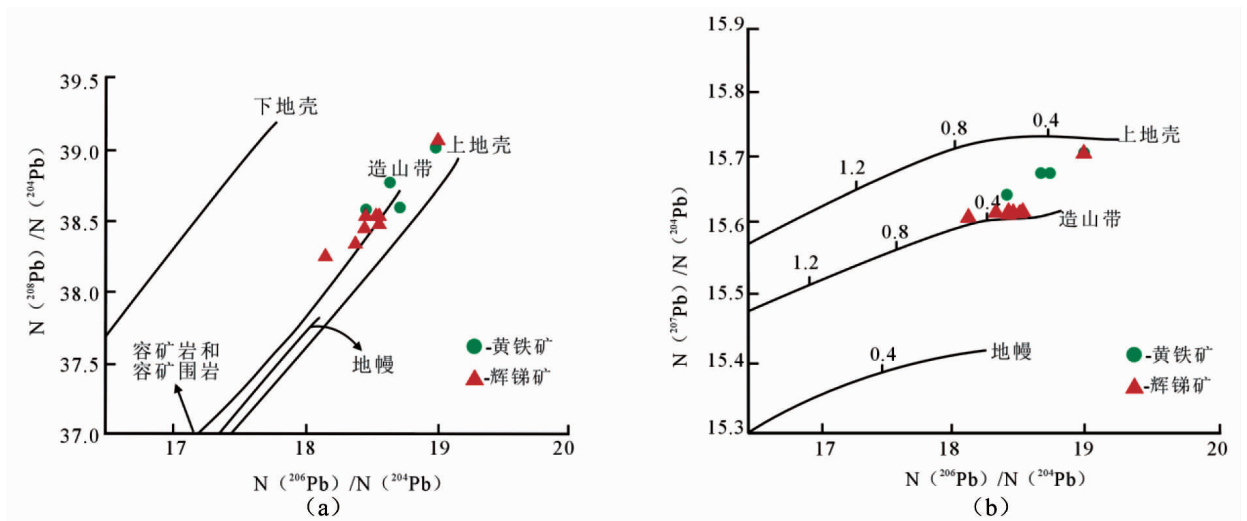


图 4 铅同位素构造模式(底图据参考文献[26])

Fig. 4 Tectonic pattern of lead isotope

来源,而是壳幔混合来源。

在 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 成因分类图中^[27] (图 5),有 8 件样品投影点位于上地壳与地幔混合的俯冲带铅区(岩浆作用),1 件样品位于地幔源铅区,1 件样品位于地幔和上地壳与地幔混合的俯冲带铅区过渡部位,2 件样品位于上地壳和上地壳与地幔混合的俯冲带铅区(岩浆作用区)过渡部位。以上说明成矿物质具多来源性,且主要源于与岩浆作用有关的壳幔混合。

5 讨论与结论

刘丛强等(2001、2004)^[16-17]认为,地幔

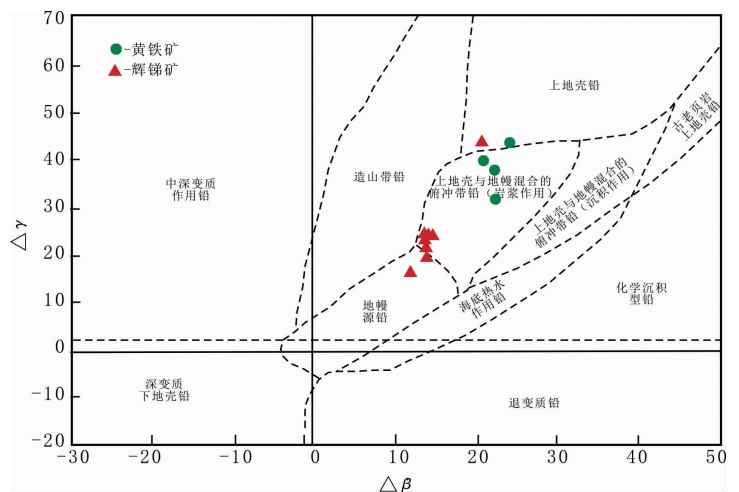


图 5 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 成因分类图(底图据参考文献[27])

Fig. 5 Genetic classification of $\Delta\beta-\Delta\gamma$

流体参与成矿作用过程主要有以下特征：具有深大断裂构造环境，形成大型、超大型矿床或矿集区，有幔源岩浆的伴生，多种围岩蚀变并存；成矿流体和成矿物质具幔源特征，多以中—高温热液矿床为主，流体包裹体气相成分以 H_2O 和 CO_2 为主。对照这些特征，笔者认为地幔流体参与了早子沟金矿成矿作用，主要依据如下：

(1)早子沟金矿位于西秦岭西段夏河—合作—岷县区域性深大断裂带南侧，组成夏河—合作矿集区的骨干矿床，矿床规模为特大型。

(2)与金矿化有密切成因联系的中性岩脉属壳幔混合成因^[3]。

(3)矿床围岩蚀变强烈，发育多期、多类型围岩蚀变组合。

(4)矿石的稀土元素表现为相对富集轻稀土的特征，这与地幔流体富集 LREE 特征相似。

(5)矿床不同岩脉和主成矿期流体包裹体气相成分以 H_2O 、 CO_2 为主，含少量 CH_4 、 N_2 等，与地幔流体富含 CO_2 、 H_2O 、 H_2 的特征相似。

(6)硫、氢、氧同位素反映成矿流体既有地层、岩浆水和地幔初生水的参与，亦有大气降水的加入；矿石铅同位素组成反映成矿物质来源于壳幔混合。以上说明成矿流体具多源性。

参 考 文 献

- [1] 吕新彪,曹晓峰,Mohamed Lam ine Salifou Sanogo,等. 早子沟金矿地质特征、控矿构造及物质来源探讨[J]. 矿物学报, 2009,(z1):447-448
- [2] 姜琪,王荣超. 甘肃早子沟金矿床形成环境及矿床成因[J]. 黄金科学技术,2010,18(4):37-40
- [3] 龚全胜,代文军,武雪梅. 西秦岭早子沟金矿含矿岩体地球化学特征及成因机制探讨[J]. 矿产勘查,2019,10(4):854-862.
- [4] 曹晓峰,Mohamed Lamine Salifou Sanogo,吕新彪,等. 甘肃早子沟金矿床成矿过程分析——来自矿床地质特征、金的赋存状态及稳定同位素证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012,42(4):1039-1054
- [5] 代文军, 陈耀宇. 甘肃早子沟金矿床稀土元素地球化学特征[J]. 黄金,2013,34(9):23-29
- [6] 第鹏飞. 西秦岭夏河—合作早子沟金矿床地球化学特征及成矿机制研究(博士论文)[D]. 兰州:兰州大学,2018
- [7] 陈国忠,张愿宁,梁志录,等. 利用包裹体测温资料估算早子沟金矿成岩成矿压力及pH、Eh值[J]. 甘肃地质,2014,23(4):23-32

- [8] 陈瑞莉,陈正乐,伍俊杰,等. 甘肃合作早子沟金矿床流体包裹体及硫铅同位素特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018,48(2):87-102
- [9] 刘东晓,第鹏飞,张鑫,等. 甘肃早子沟金矿床成因——来自流体包裹体及 H-O-S 同位素的证据[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2019,55(2):168-175
- [10] 代文军,陈耀宇,刘春先,等. 甘肃早子沟金矿床围岩蚀变特征及其与金矿化的关系[J]. 甘肃地质,2011,20(3):31-36
- [11] 代文军, 陈耀宇. 甘肃早子沟金矿区中性岩脉与成矿关系[J]. 黄金,2012,33(1):19-23
- [12] 刘勇,刘云华,董福辰,等. 甘肃早子沟金矿床成矿时代精确测定及其地质意义[J]. 黄金,2012,33(11):10-17
- [13] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1992
- [14] 王登红,李华芹,陈毓川,等. 桂西南丹地区大厂超大型锡多金属矿床中发现高稀土元素方解石[J]. 地质通报,2005,24(2):176-180
- [15] 双燕,毕献武,胡瑞忠,等. 芙蓉锡矿方解石稀土元素地球化学特征及其对成矿流体来源的指示[J]. 矿物岩石,2006,26(2):57-65
- [16] 刘丛强,黄智龙,李和平,等. 地幔流体及其成矿作用[J]. 地学前缘,2001,8(4):231-243
- [17] 刘丛强,黄智龙,许成,等. 地幔流体及其成矿作用——以四川冕宁稀土矿床为例[M]. 地质出版社,2004
- [18] 袁士松,葛良胜,路彦明,等. 地幔流体与哀牢山成矿带金成矿作用的碳氢氧硫铅同位素证据[A]. 全国成矿理论与深部找矿新方法及勘查开发关键技术交流研讨会论文集[C]. 2010:27-36
- [19] 郑永飞,陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 科学出版社,2000
- [20] Rye R O,Oh moto H. Sulfur and carbon isotopes and ore genesis:a review[J]. Economic Geology,1974,69:826-842
- [21] 王志良,毛景文,吴淦国,等. 东天山康古尔金矿成矿晚阶段地幔流体参与成矿作用的碳氢氧同位素证据[J]. 地质学报,2004,78(2):105-202
- [22] 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
- [23] 费光春,多吉,温春齐,等. 西藏洞中拉铅锌矿床 S,Pb,Sr 同位素组成对成矿物质来源的示踪[J]. 矿物岩石,2011,31(4):52-57
- [24] 宜昌地质矿产研究所. 铅同位素地质研究的基本问题[M]. 北京:地质出版社,1979
- [25] 吴开兴,胡瑞忠,毕献武,等. 矿石铅同位素示踪成矿物质来源综述[J]. 地质地球化学,2002,30(3):73-81
- [26] Zartman R E,Deo B R. Plumbotectonics -The model [J]. Tectonophys,1981,(75):135-162
- [27] 朱炳泉,李献华,戴樟谟,等. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化[M]. 北京:科学出版社,1998

PARTICIPATION OF MANTLE FLUID WITH GOLD METALLOGENETIC PROCESS IN ZAOZIGOU GOLD DEPOSIT

DAI Wen-jun, CHEN Yao-yu

*(The Third Institute of Geology and Mineral Exploration, Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral
Exploration and Development, Lanzhou 730050, China)*

Abstract: Located in the south of Xiahe-Hezuo-Minxian Fault, Zaozigou gold deposit is controlled by fault and crust-mantle mixed magma on spatiotemporal evolution. It is summarized such the deposit characteristic as main ore-controlling factors, rare earth geochemistry of ore samples, fluid inclusion, and isotopic data of S, H, O, Pb, meanwhile discussed the participation possibility of earth mantle fluid in the gold mineralization by the study of metallogenic fluid source. REE partitioning model of ore samples illustrate light REE concentration. The composition of fluid inclusion show that gas phase material are mainly H₂O and CO₂ with a little amount of CH₄ and N₂, fluid phase matter are Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻, Cl⁻. The value of S³⁴S_{v-CDT} is -10.30‰ ~ -4.9‰ in pyrite and stibnite sample, which support mineralization was related with participation of crust sulphur material. The study of hydrogen and oxygen isotope revealed that mineralization fluid include both magmatic water and original water from the mantle and meteoric water. Lead isotope composition of ore sample reflect they were mixture of crust and mantle material.

Key words: mantle fluid; isotope; fluid inclusion; geochemistry of rare earth element; Zaozigou gold deposit