

东昆仑哈西亚图铁多金属矿床氧、硫、铅同位素组成及对成矿物质来源的示踪*

南卡俄吾^{1,2}, 贾群子³, 李金超³, 栗亚芝³, 孔会磊³, 王曙光², 林兆丰²

(1. 长安大学土地工程学院, 陕西 西安 710064;

2. 陕西省土地工程建设集团, 陕西 西安 710075;

3. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 哈西亚图铁多金属矿位于东昆仑构造带, 是区内三叠纪矽卡岩矿床的典型代表。为了解其成矿物质来源, 利用氧、硫、铅同位素对磁铁矿、黄铁矿、闪锌矿进行了示踪研究。磁铁矿的 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 $2.7\text{‰} \sim 4.1\text{‰}$, 表明成矿流体中除了岩浆水外, 还可能有大气降水。黄铁矿与闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $4.63\text{‰} \sim 6.30\text{‰}$, 总硫值为 3.77‰ , 说明矿区硫可能来源于壳幔混合岩浆。黄铁矿铅同位素变化较小($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为 $38.471 \sim 38.629$ 、 $15.627 \sim 15.671$ 和 $18.435 \sim 18.473$), 同样显示出壳幔混合成因特点。结合成矿岩体及区域大地构造背景研究, 认为成矿物质主要来源于地壳与地幔混合岩浆, 并在成矿过程中有地层铁质的混入。成矿过程可能如下: 俯冲板片交代富集岩石圈地幔并发生部分熔融, 上侵过程中引起下地壳长英质岩石(TTG)发生部分熔融, 后经混合, 形成混合岩浆。在岩浆侵位间隙大气降水或地层同生水沿断裂带下渗, 并与石英闪长岩再次发生混合, 后使含矿热液顺层交代碳酸盐岩, 形成矽卡岩并成矿。

关键词: 哈西亚图矿床; 氧-硫-铅同位素; 物质来源; 东昆仑

中图分类号: P597.2; P618.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2018)04-0037-11

Sulfur and lead isotope compositions and tracing for the sources of ore-forming materials in the Haxiyatu sharn iron-polymetallic deposit, East Kunlun

NAMKHA Norbu^{1,2}, JIA Qunzi³, LI Jinchao³, LI Yazhi³, KONG Huilei³, WANG Shuguang², LIN Zhaofeng²

(1. School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group, Xi'an 710075, China;

3. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, China)

Abstract: Haxiyatu iron-polymetallic deposit, a typical Triassic skarn deposit, is located in the tectonic belt of East Kunlun. To make clear of the metallogenic materials, this paper used oxygen, sulfur, lead isotope to trace magnetite, pyrite and sphalerite. The $\delta^{18}\text{O}$ value of magnetite was $2.7\text{‰} \sim 4.1\text{‰}$, which indicated that the atmospheric precipitation was included in the metallogenic fluid except the magma water. The $\delta^{34}\text{S}$ value of pyrite and sphalerite was $4.63\text{‰} \sim 6.30\text{‰}$ and the total sulfur value was 3.77‰ , which meanted that the sulfur in the mine may originate from the mixed magma of the crust-mantle. The lead isotope change of pyrite was smaller, for example, the values of $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ were $38.471 \sim 38.629$, $15.627 \sim 15.671$ and $18.435 \sim 18.473$ respectively, which showed the crust-mantle mixing origin yet. Based on the ore-forming pluton and the regional tectonic background, it's

* 收稿日期: 2017-05-05

基金项目: 中国地质调查局二级项目(DD20160013); 陕西省土地工程建设集团项目(DJNY2018-7)

作者简介: 南卡俄吾(1989年生), 男; 研究方向: 矿床学; E-mail: nkew1989@163.com

通信作者: 贾群子(1962年生), 男; 研究方向: 矿床学和区域成矿规律; E-mail: xajqunzi@126.com

maintained that the metallogenic material may come from the mixing magma of the crust and mantle and mix in some iron materials in the ore-forming process. The mineralization process may be as follows: the subduction slab metasomatized the mantle and a partial melting occurred. During the process of invasion, the felsic rocks (TTG) of lower crust were partially fused, and then formed the mixing magma. In the space of magmatic emplacement, the precipitate water or the stratigraphic syngenetic water infiltrated through the cracks, mixed with the quartz diorite again, making the ore-bearing hydrothermal solution metasomatized the carbonate, and finally to form the skarn deposit.

Key words: Haxiyatu deposit; O-S-Pb isotopes; ore-forming material; East Kunlun

近年来,随着青藏高原地质矿产调查与评价专项实施,青海省东昆仑祁漫塔格地区找矿成果显著,特别是一个与三叠纪中酸性侵入岩有关的矽卡岩成矿系列备受关注^[1-4],并以矿床分布广、资源量大为优势,使该地区成为我国西部最有找矿潜力的矽卡岩铁多金属成矿带。以往研究认为,该地区矽卡岩矿床赋矿地层为中元古界狼牙山组与奥陶-志留纪滩间山群,成矿时代集中于中、晚三叠世,成矿元素则以铁为主伴生锌、铅、铜等^[5-6]。2011年,青海省核工业地质局在1:50万航磁异常查证时发现了赋矿层位为金水口岩群的哈西亚图铁多金属矿床,成矿时代为早三叠世,成矿元素以铁为主伴生金,成矿地质特征与区域以往矽卡岩矿床研究认识差别较大。目前矿床规模已达中型,深刻认识该矿床成矿特征有助于指导区域找矿。

哈西亚图矿床地处东昆中构造带西段,距格尔木市西约120 km。至今,该矿床仅开展了岩石学、年代学、矿床地质特征等研究^[7-8],但对于成矿物质来源及岩浆岩深部富集过程等关键问题未有深入研究。本文拟通过氧、硫、铅同位素特征,结合地

质学、岩石学、地球化学分析等,探讨哈西亚图矿床成矿物质来源及岩浆岩深部过程,在此基础上对比研究区域矽卡岩成矿特征,重点探讨金富集矿化机理,为进一步丰富区域成矿作用研究提供新资料。

1 地质背景

东昆仑造山带位于青藏高原东北部,属特提斯构造域。从元古代至今,地质演化经历多个造山旋回,主要有原特提斯、古特提斯、新特提斯3个演化阶段,同时形成了前寒武纪(元古宙);早元古代;晚古生代-早中生代;晚中生代-新生代4个岩浆热事件活动峰值时段^[9-10]。其中,古特提斯洋演化阶段介于晚古生代到早中生代期间,该时期受残余洋盆-阿尼玛卿洋盆俯冲作用影响,整个东昆仑处于陆缘弧环境,弧岩浆岩活动强烈,特别是中酸性岩浆岩十分发育,最终在早古生代末奠定的构造格架基础上形成了巨大的岩浆岩带。区域发育昆北、昆中、昆南3条近NW向的断裂(图1),可将东昆仑从北到南划分为东昆北、中和南3个构

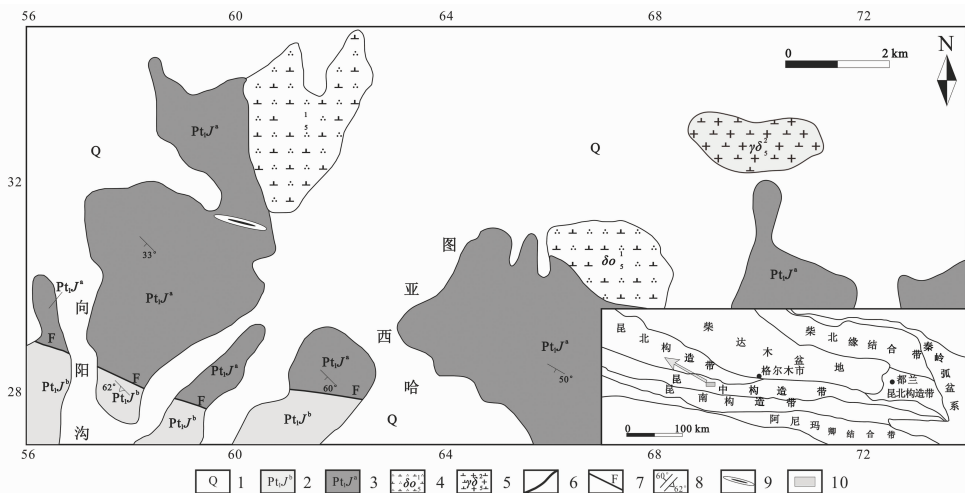


图1 哈西亚图铁多金属矿区地质简图(据文献[11])

Fig. 1 Geological sketch map of the Haxiyatu iron-polymetallic deposit

1. 第四系; 2. 金水口岩群上岩组; 3. 金水口岩群下岩组; 4. 石英闪长岩; 5. 花岗闪长岩; 6. 地质界线; 7. 断层;
8. 产状; 9. 矿体地表露头; 10. 研究区位置

造带^[12], 区内各时期地层均有出露, 主要包括古元古界金水口岩群、中元古界狼牙山组、寒武-奥陶纪(时代未定, 待解决)滩间山群、上泥盆统牦牛山组、石炭系大干沟组和四羊角组、上三叠统鄂拉山组等。其中, 金水口岩群和滩间山群是本区矽卡岩矿床主要赋矿层位。

2 矿床地质

2.1 测试技术方法

本次样品均采自矿区探槽及钻孔中, 样品表面新鲜, 无蚀变风化。样品主量元素、稀土元素、微量元素分析、物相分析在西安地质矿产研究所实验测试中心完成。主量元素采用 X 荧光光谱(XRF)进行分析, 分析精度优于 1%, 稀土和微量元素利用 SX50 型电感耦合等离子质谱仪进行测定, 分析精度优于 5%~10%, 物相分析仪器型号为 D/max-2500, 编号为 SX-65; 氧同位素分析在核工业北京地质研究院同位素实验完成。仪器为 MAT253-EM, 分析方法为 BrF₃ 平衡法, 分析精密度: $\delta_{18}O$ 为 $\pm 0.2\text{‰}$; 硫、铅同位素分析在武汉地质矿产研究所测试中心完成。硫同位素组成在稳定同位素质谱仪 MAT251 上测定。分析过程采用标准 LTB-2 和 NBS127 进行质量监控, 分析误差范围为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。铅同位素分析在热电离同位素质谱仪 MAT261 仪器上进行, 采用 NBS981 对质谱分析进行质量监控。

2.2 矿床地质特征

矿区出露地层主要为金水口岩群下岩组, 为一套中深变质的杂岩岩系, 可划分为 3 个岩性段: 黑云斜长片麻岩段、大理岩段、矽卡岩段, 其中大理岩段并不是厚层稳定的单一岩性, 而是夹杂着很多薄层片麻岩类, 地层总体产状南倾, 倾角 $30^\circ \sim 65^\circ$ 。由于第四系覆盖以及工程揭露不足, 断裂控制程度较低, 矿床控矿构造以北东向或近东西向为主, 矿区外围发育有北西向断裂。岩浆岩主要为矿区北部的石英闪长岩与东部的花岗闪长岩, 根据矿区外围地质接触关系, 花岗闪长岩和石英闪长岩与金水口岩群下岩组属侵入接触关系。

矽卡岩产于距石英闪长岩体 800 m 左右的外接触带, 矿体与围岩的界线清晰, 围岩蚀变类型主要有矽卡岩化、硅化、绿泥石化、绿帘石化、碳酸盐化等。其中, 矽卡岩化作用是矿区最重要的蚀变作用, 主要出现在矿体周围的大理岩层位中, 是岩浆热液与围岩交代后的产物, 规模取决于大理岩层位厚度及层间裂隙发育程度, 主要产物有透辉石矽卡

岩、石榴子石矽卡岩、绿帘石矽卡岩等无水岛状或链状硅酸盐矿物。矿区共圈定矿体 54 条, 矿体呈层状、似层状、透镜状平行分布, 主要成矿元素平均品位分别为: 铁 34.75%, 锌 1.99%, 金 3.92 g/t。矿石矿物主要有磁铁矿、闪锌矿和方铅矿、自然金等, 多为块状构造、稠密浸染状构造、浸染状构造和条带状构造, 磁铁矿中的脉石矿物主要为镁铁闪石-阳起石、白云母、透辉石和方解石, 铅锌矿石中的脉石矿物主要有透辉石、透闪石、方解石、绿泥石等。矿带长 1.4 km, 厚 200~350 m, 倾向 180° , 倾角 $45^\circ \sim 75^\circ$, 矿体总体沿金水口岩群下岩组顺层产出。

2.3 岩相学与标型矿物特征

矿体围岩黑云斜长片麻岩主要由斜长石(45%)、石英(35%), 暗色矿物为黑云母(20%)组成, 部分岩石发生混合岩化作用, 呈眼球状构造, 眼球主要为钾长石, 部分为斜长石(图 2a); 并受热液作用影响, 石英含量升高, 呈弥漫型分布于矿物颗粒之间, 表现出硅化特征(图 2b); 大理岩为白云质, 部分白云石发生橄榄石化, 橄榄石内部裂理发育, 少数橄榄石发生蛇纹石化或绿泥石化(图 2c)。矽卡岩矿物类型多样, 从低温闪石族到高温石榴子石族均有发育。矽卡岩阶段早期经历了岩浆热液与大理岩初步交代作用过程, 形成了早期的石榴子石、透辉石、镁橄榄石等干矽卡岩矿物(图 2f); 矽卡岩阶段晚期, 由于热液温度下降出现了闪石族矿物, 以镁铁闪石为主, 并沉淀磁铁矿(图 2d、h); 退化蚀变阶段以大量形成闪石族矿物为标志, 并有绿帘石以及少量磁黄铁矿形成(图 2e、g、i); 金属硫化物阶段以出现含硫金属矿物为特征, 出现了大量的黄铁矿、闪锌矿、方铅矿等矿物。自然金形成于后期热液作用过程中, 形成温度较低。

磁铁矿与黄铁矿 X 射线衍射分析结果列于表 1。磁铁矿晶胞常数变化介于 $0.839\ 8 \sim 0.840\ 1\ \text{nm}$ 。丁俊等^[13]在研究印度尼西亚塔里亚布铁矿时, 总结出该类矿床矿浆型、接触交代型、热液脉型磁铁矿晶胞常数分别为 $0.839\ 2 \sim 0.839\ 9\ \text{nm}$ 、 $0.839\ 8 \sim 0.840\ 2\ \text{nm}$ 、 $0.840\ 1 \sim 0.840\ 7\ \text{nm}$, 哈西亚图与塔里亚布接触交代型磁铁矿晶胞常数变化范围基本符合。黄铁矿晶胞常数变化介于 $0.541\ 9 \sim 0.542\ 1\ \text{nm}$, 与理想值 $0.541\ 8\ \text{nm}$ 略有偏差, 可能是因为 Co、Ni 等进入黄铁矿晶格, 使 a_0 值偏大。

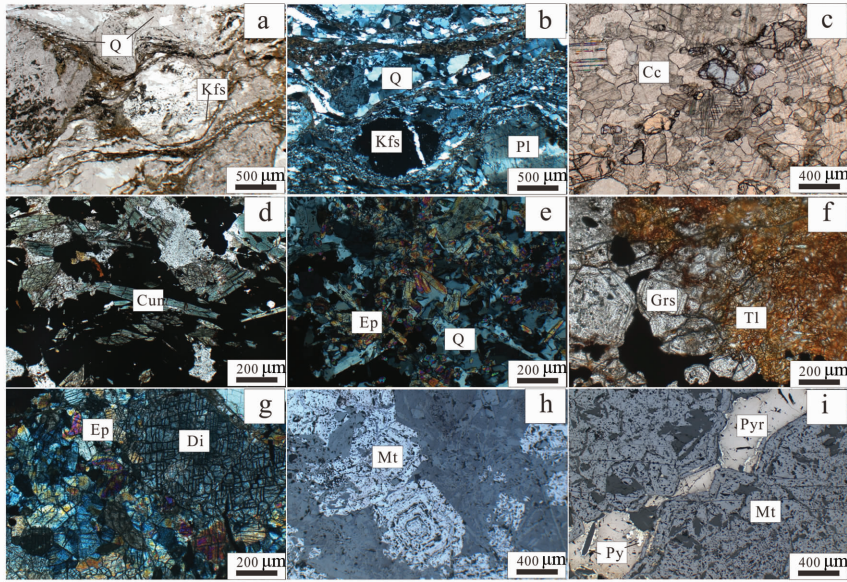


图 2 哈西亚图铁多金属矿床矿石结构构造

Fig. 2 The texture and structure of ores in Haxiyatu iron-polymetallic deposit

Q - 石英; Kfs - 钾长石; Pl - 斜长石; Cc - 方解石; Cur - 镁铁闪石; Ep - 绿帘石; Grs - 钙铝榴石; Tl - 透闪石; Di - 透辉石; Mt - 磁铁矿; Py - 黄铁矿; Pyr - 磁黄铁矿

表 1 哈西亚图铁多金属矿床磁铁矿与黄铁矿的物理标型特征

Table 1 Physical properties of magnetite and pyrite in Haxiyatu iron-polymetallic deposit

矿物	样号	采样位置	深度/m	a_0 /nm
磁铁矿	12HXYT-1	TC301		0.839 823 (8)
	12HXYT-2	TC301		0.840 659 (6)
	12HXYT-3	TC301		0.840 020 (2)
	12HXYT-4	TC301		0.840 109 (1)
	12HXYT-5	TC301		0.839 930 (1)
黄铁矿	12HXYT-16	ZK801	350	0.541 970 (3)
	12HXYT-18	ZK801	354	0.542 089 (2)
	12HXYT-19	ZK801	349	0.541 972 (1)
	12HXYT-20	ZK801	346	0.541 900 (1)
	12HXYT-21	ZK801	327	0.542 048 (2)
	12HXYT-27	ZK801	92	0.542 040 (1)

2.4 岩石地球化学特征

矿床围岩与矽卡岩化学分析结果见表 2, 可以看出随着矽卡岩交代程度提高, 样品 CaO 、 MgO 等含量逐渐下降, SiO_2 含量逐渐升高, 表现出交代作用中化学组分变化的特征, 而大理岩 MgO 含量较高, 是镁矽卡岩形成的物质基础。黑云斜长片麻岩具有高 SiO_2 、低 MgO 、中等 Al_2O_3 含量特征, 结合镜下鉴定, 推测原岩为泥质(砂)岩。

在稀土元配分图上, 围岩与矽卡岩具有较一致的分布特征(图 3), 都具有微弱 δEu 负异常, 轻稀土富集, 重稀土亏损, 轻重稀土分异明显, 微量元素蛛网图中黑云斜长片麻岩亏损 Ba、Nb、Sr、

Ti 等元素, 富集 Rb、Th、La、Nd、Zr 等元素, 矽卡岩与黑云斜长片麻岩基本上有着类似的趋势, 所不同的是, 交代作用可能使矽卡岩在形成过程中部分大离子亲石元素亏损, 但整体表现出一定的内在成因联系。空间上, 距离矿体较远的黑云斜长片麻岩(12HXYT6-12HXYT10) Fe_2O_3 、 FeO 含量值明显高于矿体围岩中的黑云斜长片麻岩(13HXH06-13HXH10), 可能是因为成矿热液在活动过程中遇到这些黑云斜长片麻岩, 从中摄取出了铁质, 并被动的提高了 SiO_2 含量, 而未被改造的黑云斜长片麻岩保持了自身固有的化学性质, 成分未发生改变。

表2 哈西亚图铁多金属矿区矽卡岩、黑云斜长片麻岩主量元素和微量元素含量
Table 2 Contents of major elements and trace elements of sharn and biotite plagioclase gneiss
in the Haxiyatu Iron-polymetallic ore district

样品编号	岩性	$w_B/\%$												$w_B/10^{-6}$					
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	灼失量	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu
13HXB05-1	矽卡岩	46.2	10.8	5.33	4.43	21.2	5.08	0.05	0.28	0.54	0.1	0.42	5.56	31.3	68.9	7.81	29.6	6.23	1.34
13Hb11	矽卡岩	61.1	8.18	7.48	3.47	12.4	2.77	0.19	0.31	0.44	0.08	0.26	3.42	39.1	82.5	9.12	33.6	6.8	1.19
13Hb23	矽卡岩	44.1	4.96	<0.01	9.5	19.5	11.6	0.12	0.53	0.38	0.1	0.36	9.48	8.51	14.3	2.09	8.68	2.27	0.62
13Hb24	矽卡岩	44.4	10.6	5.46	2.34	20.6	2.27	0.6	0.32	0.52	0.08	0.29	12.6	16.5	31.2	4.3	17.3	3.92	0.51
13Hb30	矽卡岩	57.3	9.95	3.06	5.64	8.35	4.03	1.38	0.32	1.17	0.6	0.14	8.12	34.5	72.7	9.56	38.4	9.13	1.36
12HXYT6	黑云斜长片麻岩	65.1	14.7	1.7	4.83	4.11	1.77	1.99	3.02	1.2	0.27	0.08	1.25	46.2	95.2	11.3	44.3	8.72	1.8
12HXYT7	黑云斜长片麻岩	64.6	14.8	1.72	4.75	3.98	1.83	2.11	3.01	1.23	0.27	0.07	1.49	39.3	80.1	10.2	40.4	8.76	1.77
12HXYT8	黑云斜长片麻岩	65.1	14.3	1.95	4.59	3.22	0.99	4.55	2.64	1.12	0.26	0.08	1.17	51.8	105	13.2	52	10.5	1.89
12HXYT9	黑云斜长片麻岩	62.1	15.7	1.96	5.36	4.74	2.03	1.55	3.14	1.38	0.31	0.1	1.64	42.6	90	11.2	45.3	9.38	1.94
12HXYT10	黑云斜长片麻岩	67.7	14.6	1.15	2.94	2.72	1.42	4.61	2.6	0.68	0.28	0.05	1.13	48.4	95.5	11.3	44.5	9.05	1.74
13HXH06	黑云斜长片麻岩	70.5	14.1	0.33	3.07	2.66	1.08	3.51	2.84	0.44	0.09	0.06	1.36	25.1	36.5	5.85	22.9	4.52	1.1
13HXH07	黑云斜长片麻岩	70.1	14.5	<0.01	3.74	3.11	1.27	2.15	3.16	0.51	0.08	0.06	1.44	35.9	69.5	7.69	26.9	5.38	1.12
13HXH08	黑云斜长片麻岩	71.4	14.2	<0.01	3.75	2.55	0.97	3.36	2.69	0.47	0.12	0.07	1.29	39.1	78.2	9.12	31.8	6.62	0.95
13HXH09	黑云斜长片麻岩	68.4	14.9	<0.01	4.67	2.98	1.47	3.25	2.59	0.67	0.14	0.07	1.22	22.6	35.2	5.28	20.5	4.55	1.05
13HXH10	黑云斜长片麻岩	66.1	15.6	<0.01	6.46	1.34	1.91	3.03	1.67	0.93	0.04	0.08	3.16	52.2	109	13.1	45.2	8.3	1.47
样品编号	岩性	$w_B/10^{-6}$																	
		Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Rb	Ba	Th	U	Ta	Nb	Sr	Zr	Hf
13HXB05-1	矽卡岩	5.69	0.8	4.68	0.92	2.66	0.41	2.79	0.44	26.3	1.76	31.2	11.1	2.4	0.82	10.5	461	165	3.64
13Hb11	矽卡岩	6.11	0.84	4.53	0.86	2.52	0.39	2.54	0.41	25	5.93	77.7	12.9	2.59	0.6	8.72	213	213	4.66
13Hb23	矽卡岩	2.18	0.33	2.05	0.44	1.26	0.21	1.47	0.26	14.2	7.67	24.1	7.77	1.87	0.84	10.6	25.2	240	5.03
13Hb24	矽卡岩	3.8	0.56	3.31	0.68	2.01	0.33	2.31	0.4	19.2	23.1	120	9.46	1.67	0.68	8.9	324	179	4.05
13Hb30	矽卡岩	9.68	1.49	9.07	1.98	5.78	0.92	6.07	1	54.4	55.5	407	3.46	6.09	0.99	22.2	219	510	11.2
12HXYT6	黑云斜长片麻岩	7.76	1.17	6.7	1.36	3.66	0.56	3.65	0.63	38.4	149	522	13.3	2.65	2.09	16.8	11.3	344	9.3
12HXYT7	黑云斜长片麻岩	7.66	1.19	6.7	1.33	3.47	0.5	3.19	0.55	38	123	543	10.3	2.28	2.6	20.8	10.2	393	10.2
12HXYT8	黑云斜长片麻岩	8.97	1.42	7.88	1.68	4.68	0.74	4.82	0.84	48	181	1030	25	4.87	2.87	22.9	13.2	447	14.3
12HXYT9	黑云斜长片麻岩	8.27	1.28	7.34	1.44	4	0.6	3.92	0.68	41.6	104	410	8.02	2.18	2.26	18.2	11.2	420	10.8
12HXYT10	黑云斜长片麻岩	7.92	1.2	6.75	1.33	3.56	0.51	3.2	0.53	38.6	189	874	14.4	2.53	1.6	12.8	11.3	265	7.48
13HXH06	黑云斜长片麻岩	4.63	0.74	4.65	0.96	2.72	0.42	2.81	0.44	27.6	145	786	10.3	1.71	0.43	7.53	214	242	5.24
13HXH07	黑云斜长片麻岩	4.63	0.75	4.47	0.88	2.46	0.38	2.51	0.39	23.6	138	371	12.4	2.12	0.79	9.31	183	232	5.17
13HXH08	黑云斜长片麻岩	6.69	1.03	6.12	1.27	3.68	0.59	3.85	0.64	34.9	175	714	21.4	1.88	1.01	14.1	102	313	8.06
13HXH09	黑云斜长片麻岩	0.6	0.074	0.52	0.1	0.36	0.044	0.3	0.058	2.8	3.6	43.5	0.72	1.46	0.31	3.02	0.7	10.5	0.36
13HXH10	黑云斜长片麻岩	0.32	0.045	0.25	0.051	0.13	0.021	0.13	0.021	0.92	1.27	10.8	0.31	0.65	0.39	3.95	0.39	4.66	0.16

3 同位素地球化学特征

3.1 氧同位素特征

磁铁矿氧同位素分析结果见表3, 磁铁矿 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 均为正值, 变化范围介于 2.7‰ ~ 4.1‰, 暗示矿石铁质的来源受相同成矿环境与地质条件控制。矽卡岩矿床中磁铁矿具有两种成因: ① 岩浆流体中直接结晶, 多为中性基岩浆岩在岩浆熔离、分异结晶过程中产生^[13]。② 岩浆期后成矿流体中结晶, 主要形成于矽卡岩交代作用过程中。因而, 不同成因的磁铁矿其氧同位素组成差别较大, 如前文所述, 哈西亚图矿床磁铁矿与镁铁闪石共生, 且 $\delta^{18}O$ 平均为 3.4‰, 与典型岩浆成因的拉科铁矿的磁铁矿 ($\delta^{18}O = 3.7‰$) 相比略低^[14], 说明磁铁矿形成于岩浆期后矽卡岩阶段, 并非是从岩浆流体中直接结晶而来。

3.2 硫同位素特征

黄铁矿及闪锌矿硫同位素分析结果见表4。数

据显示矿区硫同位素均为正值, 分布区间较为集中 (3.99‰ ~ 6.30‰), 极差为 2.25‰, 说明硫的均一化程度很高, 并且在后期结晶过程中, 成矿流体没有明显的分馏作用。黄铁矿 $\delta^{34}S$ 值为 4.63‰ ~ 6.30‰, 平均 5.18‰, 闪锌矿 $\delta^{34}S$ 值为 3.99‰ ~ 4.23‰, 平均 4.06‰。通常认为在硫同位素示踪应用前提是硫同位素分馏必须达到平衡, 并且金属硫化物之间的 $\delta^{34}S$ 关系是 $\delta^{34}S_{\text{辉钼矿}} > \delta^{34}S_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}S_{\text{闪锌矿}} > \delta^{34}S_{\text{方铅矿}}$ ^[14], 从表4可以看出黄铁矿 $\delta^{34}S$ 值略高于闪锌矿 $\delta^{34}S$ 值, 说明哈西亚图铁多金属矿硫化物中的黄铁矿、闪锌矿达到了平衡, 并且在直方图中显示出单峰塔式分布特征 (图4a), 峰值介于 4‰ ~ 5‰ 之间。应用公式^[15]:

$$1000 \ln \alpha_{\text{Py-Sph}} = 3.0 \times 10^5 t^{-2}$$

其中 α 为分馏系数, t 为温度。计算得哈西亚图矿区黄铁矿与闪锌矿硫同位素对平衡温度范围介于 307 ~ 351 °C, 与一般矽卡岩矿床中黄铁矿与闪锌矿形成温度一致。

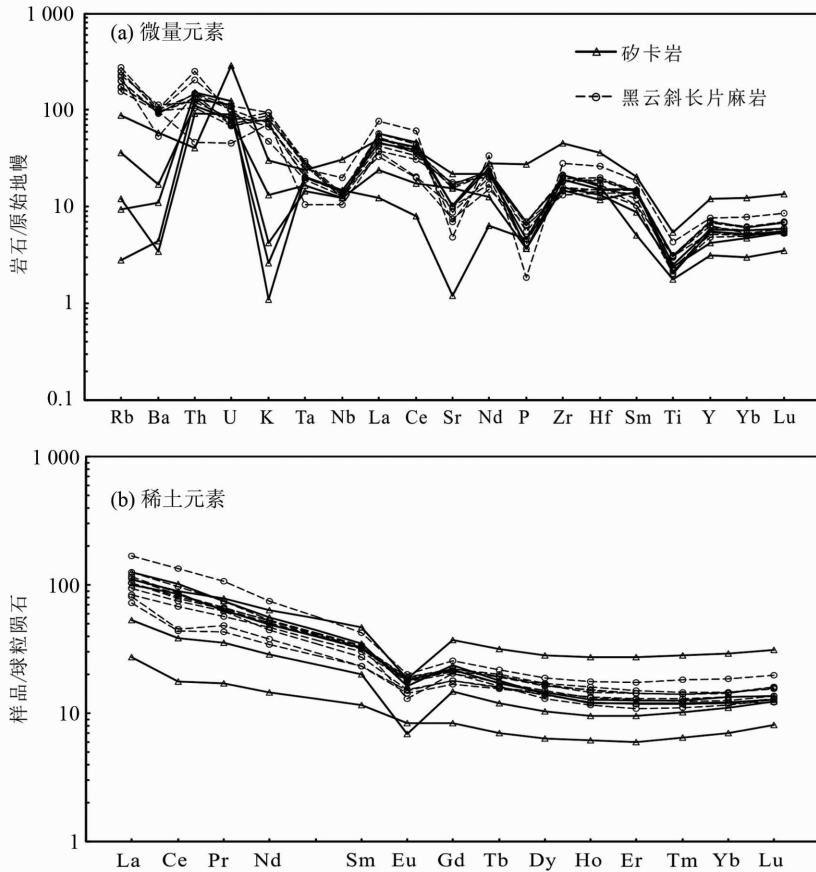


图 3 哈西亚图铁矿床矽卡岩与黑云斜长片麻岩微量元素蛛网图和稀土元素分布模式图

Fig. 3 Primitive mantle-normalized trace element spider diagrams and chondrite-normalized REE distribution patterns for skarn and biotite plagioclase gneiss in Haxiyatu iron-polymetallic deposit

表 3 哈西亚图铁多金属矿床氧同位素分析结果¹⁾

Table 3 Oxygen isotopic composition of the Haxiyatu Iron-polymetallic deposit

样品编号	测试对象	采样位置	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$
12HXYT-1	磁铁矿	TC 301	-27.1	3.0
12HXYT-2	磁铁矿	TC 301	-26.7	3.4
12HXYT-3	磁铁矿	TC 301	-26.0	4.1
12HXYT-4	磁铁矿	TC 301	-26.4	3.7
12HXYT-5	磁铁矿	TC 301	-27.4	2.7

1) PDB 表示 Pee Dee Belemnite, 即美国南卡罗来纳州白垩纪皮狄组拟箭石化石; SMOW 表示 Standard Mean Ocean Water, 即标准平均大洋水

表 4 哈西亚图矿床硫同位素分析结果

Table 4 Sulfur isotopic composition of the Haxiyatu iron-polymetallic deposit

样品编号	测试矿物	采样钻孔	深度/m	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	样品编号	测试矿物	采样钻孔	深度/m	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$
12HXYT-16	黄铁矿	ZK801	350	4.85	12HXYT-24	黄铁矿	ZK411	175	6.24
12HXYT-17	黄铁矿	ZK801	344	4.78	12HXYT-26	黄铁矿	ZK803	242	5.12
12HXYT-18	黄铁矿	ZK801	354	4.76	12HXYT-16-2	闪锌矿	ZK801	350	4.05
12HXYT-19	黄铁矿	ZK801	349	4.91	12HXYT-17-2	闪锌矿	ZK801	344	4.00
12HXYT-20	黄铁矿	ZK801	346	5.05	12HXYT-18-2	闪锌矿	ZK801	354	3.99
12HXYT-22	黄铁矿	ZK411	513	6.30	12HXYT-19-2	闪锌矿	ZK801	349	4.02
12HXYT-23	黄铁矿	ZK411	92	4.63	12HXYT-20-2	闪锌矿	ZK801	346	4.23

为避免简单统计造成分析结果的片面性，此处利用同位素对图解法确定总硫值并佐证前述。表 3 中 12HXYT-16（黄铁矿）与 12HXYT-16-2（闪锌矿）是来自同一样品的一组矿物对，且黄铁矿与闪锌矿彼此共生，又无明显交代、穿插现象，本次共测得 5 组矿物对数据，利用矿物对 $\delta^{34}\text{S}$ 值线性关系计算得出哈西亚图总硫同位素组成为 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 值为 3.77‰（图 4b），计算方法及过程详见 [16]。

3.4 铅同位素特征

黄铁矿铅同位素组成 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为 38.471 ~ 38.629、15.627 ~ 15.671 和 18.435 ~ 18.473（表 5），变化率 < 1%。地幔中 μ 为 8.92， ω 为 31.844；造山带中 μ 为 10.87， ω 为 39.567；上地壳 μ 为 12.24， ω 为 41.861；下地壳 μ 为 5.89， ω 为 35.222^[16]。哈西亚图黄铁矿铅同位素 μ ($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$) 值为 9.51 ~

9.60， ω ($^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$) 值为 36.74 ~ 37.67，变化范围介于地幔与造山带之间。

4 成矿物质来源

一般认为，地幔 $\delta^{34}\text{S}$ 值 (0 ± 2)‰ 的范围内^[18]，大洋岛弧玄武岩硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值通常为 (1.0 ± 1.9)‰ 的范围内^[19]，两端元硫混合后形成的混合岩浆硫 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围为 (1 ± 3.9)‰^[20]，而下地壳物质的参与使该范围值总体略有升高，东昆仑造山带三叠纪岩浆岩 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围为 (2.6 ± 2.3)‰^[21]，岩浆源区更可能接近于安山质成分。哈西亚图矿区总硫值为 3.77‰，说明矿区硫来源于壳幔混合岩浆，并有下地壳物质硫的参与。Zartman and Doe^[22] 根据不同构造环境的显生宙岩石和矿床铅同位素特征建立了不同地质环境下铅同位素构造模式图。将哈西亚图黄铁矿铅同位素数据投影

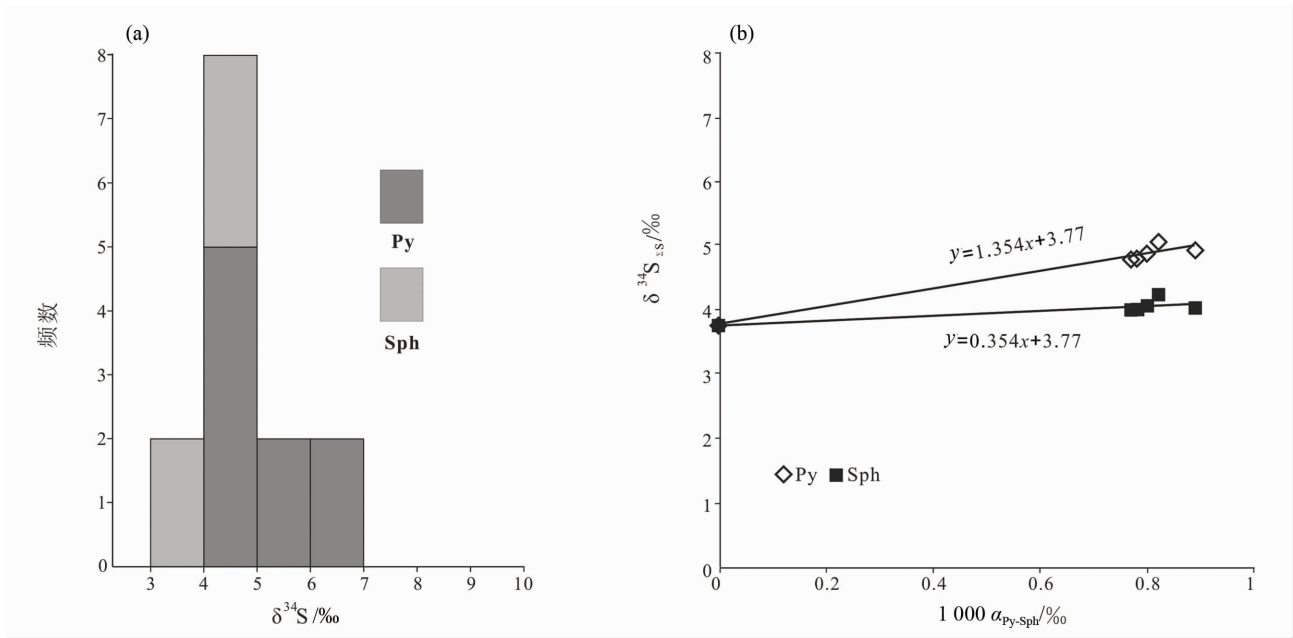


图 4 哈西亚图铁多金属矿床硫同位素组成

Fig. 4 Sulfur isotopic composition of the Haxiyatu Iron-polymetallic ore district

表 5 哈西亚图铁多金属矿床铅同位素分析结果

Table 5 Pb isotopic composition of the Haxiyatu Iron-polymetallic deposit

样品编号	测试矿物	采样钻孔	深度/m	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	年龄/Ma	μ	ω	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
12HXYT-16	黄铁矿	ZK801	350	18.440	15.627	38.471	179	9.51	36.7	19.9	34.4
12HXYT-17	黄铁矿	ZK801	344	18.473	15.662	38.615	198	9.58	37.5	22.2	39.1
12HXYT-18	黄铁矿	ZK801	354	18.435	15.634	38.524	191	9.53	37.1	20.4	36.4
12HXYT-19	黄铁矿	ZK801	349	18.465	15.671	38.629	215	9.60	37.7	22.9	40.3
12HXYT-20	黄铁矿	ZK801	346	18.460	15.648	38.533	191	9.55	37.1	21.3	36.6

到图 5 中, 结果显示出明显的线性分布, 图 5a 中落入上地壳与造山带模式线之间, 图 5b 中落入下地壳与造山带模式线之间。再结合朱炳泉 [22] 提出的铅同位素 $\Delta\beta - \Delta\gamma$ 图解, 可以看出铅同位素点都落入地壳与地幔混合的俯冲铅范围内 (图 5c), 结果很好地印证东昆仑地区三叠纪板块俯冲与壳幔岩浆混合的事实, 显示出矿区铅来源的壳幔混合特征。

不同成因磁铁矿氧同位素特征同样具有明显的差异, 沉积变质型铁矿多形成于前寒武纪, 矿床普遍遭受了强烈的变质、变形作用, 故而磁铁矿 $\delta^{18}\text{O}$ 值往往具有较大负值 (-10‰) 和较大的正值 ($>10\text{‰}$); 沉积型铁矿磁铁矿 $\delta^{18}\text{O}$ 同样具有较大正值, 但很少出现负值; 火山岩型铁矿 (包括岩浆型) 磁铁矿 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围较小, 介于 $2\text{‰} \sim 6\text{‰}$ 之间, 平均 4‰ 左右。相比与火山岩型铁矿, 矽卡岩型矿床磁铁矿的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围较宽, 介于 $-1\text{‰} \sim 9\text{‰}$ [14, 23], 其中接近与零值附近的可能与“轻”的流体参入、围岩蚀变等相关。哈西亚图磁铁矿 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 平均值为 3.4‰ , 高于海水和大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 但低于正常岩浆水 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 说明成矿流体中除了岩浆水外, 还有地层同生水。

5 成矿作用分析

硫、铅同位素表明哈西亚图矿区成矿物质来源

于地壳与地幔混合岩浆, 可能接近于安山质岩浆的成分, 氧同位素则暗示成矿流体中有大气降水的混入。从区域大范围看, 东昆仑地区矽卡岩矿床成矿相关岩浆岩、成矿时代、赋矿围岩、矿体形态等方面有诸多相似 (表 6), 但成矿元素特征类型差距明显, 哈西亚图矿床具有规模较大的金成矿作用。

就地层建造而言, 滩间山群是一套碎屑岩-火山岩-碳酸盐岩建造, 金水口岩群是原岩为碎屑岩的中深变质岩与碳酸盐岩建造, 这两种建造类型都具有良好的矽卡岩发育条件, 特别是金水口岩群中的片麻岩段具有较高的铁质含量, 此外, 区内矽卡岩类型与成矿元素关系紧密, 镁质矽卡岩、钙质矽卡岩常伴随铁、锌等元素成矿, 而铅元素的富集成矿往往与锰质矽卡岩形成关系密切 [5]。

从岩浆岩、成矿时代、产出背景来看, 哈西亚图矿床产出背景为阿尼玛卿洋盆俯冲阶段, 形成于早三叠世, 而其他矽卡岩矿床更多的与板块碰撞关系紧密, 产于晚三叠世期间。已有研究认为尕林格、野马泉等形成于晚三叠世的矿床产出背景为后碰撞构造阶段, 并在“相对松弛”的应力环境下, 加厚下地壳发生拆沉作用, 后与幔源岩浆混合, 再经侵位并成矿 [4, 24]。然而, 哈西亚图矿床形成于早三叠世洋壳俯冲阶段, 该时期并无加厚地壳的存在, 因此, 上述壳幔岩浆作用机制与成矿作用并不适用于解释哈西亚图矿床。

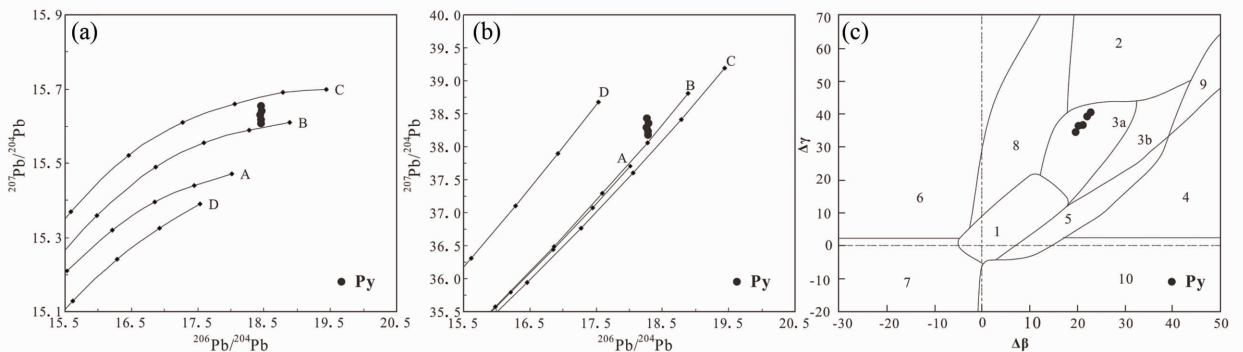


图 5 哈西亚图铁多金属矿床矿石铅构造模式图(a,b) (底图据文献[17]);

$\Delta\gamma - \Delta\beta$ 成因分类图解(c) (底图据文献[22])

Fig. 5 Tectonic model for rocks and ores in Haxiyatu iron-polymetallic deposit(a,b);

$\Delta\alpha - \Delta\beta$ diagram showing genetic classification(c)

A - 上地幔, B - 造山带, C - 上地壳, D - 下地壳

1-地幔源铅, 2-上地壳铅, 3-上地壳与地幔混合的俯冲铅(3a-岩浆作用, 3b-沉积作用), 4-化学沉积型铅, 5-海底热水作用铅, 7-深质下地壳铅, 8-造山带铅, 9-古老页岩上地壳铅, 10-退变质铅

表6 祁漫塔格地区主要铁多金属矽卡岩矿床地质特征

Table 6 The geological characteristics of skarn polymetallic iron deposits in Qimantage region

矿床名称	哈西亚图	尕林格	野马泉	它温查汉
与成矿相关岩体	石英闪长岩	花岗闪长岩	花岗闪长岩	花岗闪长岩
成岩时代/Ma	246.8	229.4	233.2	230.7
赋矿围岩	金水口岩群	滩间山群	滩间山群	滩间山群
矿体产出位置及形态	层状、似层状,产于外接触带大理岩与片麻岩互层层间破碎带中	层状、似层状产于外接触带矽卡岩和蛇纹石交代岩中	平缓似层状、透镜状产于外接触带大理岩中	层状、似层状产于外接触带大理岩中
成矿元素	Fe、Au、Zn、Pb、Cu	Fe、Pb、Zn	Fe、Pb、Zn、Cu	Fe、Cu、Zn
矽卡岩类型	钙质-, 镁质矽卡岩	钙质-, 镁质-, 锰质矽卡岩	钙质-, 镁质-, 锰质矽卡岩	钙质-, 镁质矽卡岩
参考文献	[24]	[5,25]	[5,26]	[5,27]

事实上, 三叠纪东昆仑矽卡岩矿床与蚀变岩型金矿致矿岩浆岩都属安第斯型陆缘弧中酸性岩浆岩, 以往研究已证实哈西亚图成矿岩体形成于早三叠世, 岩浆来源于壳幔混合, 对应的地球动力学背景是洋壳俯冲过程, 强烈的俯冲作用致使东昆仑地区发展为弧后拉张环境, 为后期岩浆岩上侵形成了良好的通道^[28], 实验岩石学已证明, 成熟 (>50 Ma) 或冷的俯冲板片是把水带到深部地幔的最好载体^[29], 随着俯冲作用的持续, 上升的软流圈物质加热俯冲板片, 导致俯冲板片中的含水矿物 (特别是镁硅酸盐相) 变质脱水释放出大量水流体并迁移上升, 这种迁移模式往往是较长距离的, 在压力及温度的影响下, 板片水流体交代过渡地壳的玄武岩底垫, 并显著降低地幔岩石的固相线温度, 从而使基性岩石发生部分熔融。造成来源较深的幔源岩浆与壳源岩浆混合, 这种混合岩浆由于来源很深, 往往能携带大量的金元素, 利于后期金的成矿作用^[30-31]。区域以五龙沟、沟里为代表的蚀变岩型金矿也多形成于早三叠世, 成矿岩体普遍发育暗色微粒包体, 同样暗示着早三叠世弧岩浆岩可能来源于壳幔混合岩浆。

从哈西亚图成矿元素中可以看出, 矿床中金元素成矿作用明显, 对应的地球动力学背景是早三叠世阿尼玛卿洋盆俯冲阶段, 这种俯冲作用能够带来更深、更富集金元素的岩浆, 而在此后的陆内作用

时期, 矽卡岩矿床中很少再有金元素富集矿化表现, 暗示着哈西亚图矿床岩浆岩来源可能与区内其他矽卡岩矿床不同, 具有更深、更富集金元素的岩浆岩来源^[32]。微量元素配分图显示出矽卡岩与围岩的相似性以及磁铁矿氧同位素组成特征则表明成矿热液中有地层同生水或大气降水的混入, 这可能是在岩浆侵位间隙大气降水或地层同生水沿昆中大断裂诱发的次级断裂带下参与岩体分异出的成矿热液混合的结果, 与此同时, 在含矿热液运移过程中遇到金水口岩群片麻岩类地层, 从中淋滤出铁质等金属物质并与含矿热液再次发生混合形成成矿流体。

5 结 论

1) 矿区硫、铅同位素表明哈西亚图矿区成矿物质来源于地壳与地幔混合岩浆, 可能接近于安山质岩浆的成分。磁铁矿 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值高于海水和大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 但低于正常岩浆水 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 说明磁铁矿并非是次生岩浆直接结晶形成, 并且成矿流体中有部分大气降水的混入导致 $\delta^{18}\text{O}$ 值降低。

2) 哈西亚图矿床形成于洋壳俯冲阶段, 与区域其他矽卡岩矿床相比, 成矿物质具有更深、更富集金元素的特性。

参考文献:

[1] 刘建楠, 丰成友, 赵一鸣, 等. 青海野马泉矽卡岩铁锌多金属矿区侵入岩、交代岩及矿化蚀变特征[J]. 矿床地质, 2013, 32(1): 77-93.

LIU J N, FENG C Y, ZHAO Y M, et al. Characteristics of intrusive rock, metasomatites, mineralization and alteration in Yemaquan skarn Fe-Zn-polymetallic deposit,

- Qinghai Province[J]. *Mineral Deposits*, 2013, 32(1): 77-93.
- [2] 李玉春, 李彬, 陈静, 等. 东昆仑拉陵灶火矿区花岗岩闪长岩 Sr-Nd-Pb 同位素特征及其地质意义[J]. *矿物岩石*, 2013, 33(3): 110-115.
LI Y C, LI B, CHENG J, et al. Sr-Nd-Pb isotopic characteristics of ore-bearing granodiorites from Lalingzaohuo deposit and its geological significance[J]. *J Mineral Petrol*, 2013, 33(3): 110-115.
- [3] 马圣钊, 丰成友, 张道俊, 等. 青海虎头崖矽卡岩型多金属矿床蚀变矿化分带特征研究[J]. *矿床地质*, 2013, 32(1): 109-121.
MA S C, FENG C Y, ZHANG D J, et al. Alteration and mineralization zoning of Hutouya polymetallic deposit in Qimantag area, Qinghai Province[J]. *Mineral Deposits*, 2013, 32(1): 109-121.
- [4] 丰成友, 王松, 李国臣, 等. 青海祁漫塔格中晚三叠世花岗岩: 年代学、地球化学及成矿意义[J]. *岩石学报*, 2012, 28(2): 665-678.
FENG C Y, WANG S, LI G C, et al. Middle to Late Triassic granitoids in the Qimantag area, Qinghai Province, China: Chronology, geochemistry and metallogenic significances[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(2): 665-678.
- [5] 赵一鸣, 丰成友, 李大新, 等. 青海西部祁漫塔格地区主要矽卡岩铁多金属矿床成矿地质背景和矿化蚀变特征[J]. *矿床地质*, 2013, 32(1): 1-19.
ZHAO Y M, FENG C Y, LI D X, et al. Metallogenic setting and mineralization-alteration characteristics of major skarn Fe-polymetallic deposits in Qimantag area, western Qinghai Province[J]. *Mineral Deposits*, 2013, 32(1): 1-19.
- [6] 于淼, 丰成友, 赵一鸣, 等. 青海卡而却卡铜多金属矿床流体包裹体地球化学及成因意义[J]. *地质学报*, 2014, 88(5): 903-917.
YU M, FENG C Y, ZHAO Y Y, et al. Fluid inclusion geochemistry in the Kaerqueka copper polymetallic deposit, Qinghai Province and its genetic significances[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(5): 903-917.
- [7] 黎存林, 代岩, 王雪萍, 等. 青海省格尔木市哈西亚图地区铁多金属矿床的发现及意义[J]. *西北地质*, 2012, 45(1): 222-228.
LI C L, DAI Y, WANG X P, et al. Discovery and significance of the iron-polymetallic deposits in Haxiyatu areas of Golmud city in Qinghai[J]. *Northwestern Geology*, 2012, 45(1): 222-228.
- [8] 水应东, 辛军强, 代岩, 等. 青海哈西亚图多金属矿床地质特征及成因探讨[J]. *青海大学学报(自然科学版)*, 2014, 32(5): 35-41.
SHUI Y L, XIN J Q, DAI Y, et al. Geological characters and genesis of polymetallic deposit in Haxiyatu region of Qinghai province [J]. *Journal of Qinghai University*, 2014, 32(5): 35-41.
- [9] 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J]. *高校地质学报*, 2007, 13(3): 403-414.
MO X X, LUO Z H, DENG J F, et al. Granitoids and crustal growth in the east Kunlun orogenic belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(3): 403-414.
- [10] 陆露, 张延林, 吴珍汉, 等. 东昆仑早古生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地球学报*, 2013, 34(4): 447-454.
LU L, LIN Y L, WU H Z, et al. Zircon U-Pb dating of early Paleozoic granites from the east Kunlun mountains and its geological significance [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2013, 34(4): 447-454.
- [11] 青海省核工业地质局. 哈西亚图铁多金属矿床详查报告[R]. 2011.
- [12] 姜春发, 王宗起, 李锦轶. 中央造山带开合构造[M]. 北京: 地质出版社, 2000.
JIANG C F, WANG Z Q, LI J Y, et al. Opening-closing tectonics of the central orogenic belt [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000.
- [13] 丁俊, 张术根, 徐忠发, 等. 印尼塔里亚布锡铁多金属矿床矿浆型磁铁矿的矿物学特征与形成机理探讨[J]. *矿物学报*, 2012, 32(2): 90-99.
DING J, ZHANG S G, XU Z F, et al. The mineralogical characteristics and mechanism discussion of ore-magma type magnetite from Taliabu Sn-Fe polymetallic deposit, Indonesia [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2012, 32(2): 90-99.
- [14] 洪为, 张作衡, 李凤鸣, 等. 新疆西天山查岗诺尔铁矿床稳定同位素特征及其地质意义[J]. *岩矿测试*, 2012, 31(6): 1077-1087.
HONG W, ZHANG Z H, ZHAO F M, et al. Mineralogy of the Chaganguoer iron deposit in western Tianshan mountains, Xinjiang and its geological significance [J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2012, 31(6): 1077-1087.
- [15] OHMOTO H, RYE R O. Isotopes of sulfur and carbon [C] // *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. BARNES H, ed. New York: Wiley, 1979: 509-567.
- [16] 温泉, 温春齐, 黄于鉴. 基于 Excel 的金属矿床中总硫同位素计算与绘图[J]. *科技通报*, 2012, 28(4): 37-39.
WEN Q, WEN C Q, HUANG Y J. Calculating and plotting of total sulfur isotope composition in metal sulfide deposits based on excel [J]. *Bulletin of Science & Tech*

- nology, 2012, 28(4):37-39.
- [17] DOE B R, ZARTMAN R E. Plumbotectonics, the Phanerozoic [C] // Geochemistry of hydrothermal ore deposits. BARNES H L, ed. New York: Wiley, 1979:22-70.
- [18] THODE H G, MONSTER J, DUNFORD H B. Sulphur isotope geochemistry [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1961, 25(3):159-174.
- [19] SEAI R R I. Sulfur isotope geochemistry of sulfide minerals [J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2006, 61(1):633-677.
- [20] RYE R O, LUHR J F, WASSERMAN M D, et al. Sulfur and oxygen isotopic systematics of the 1982 eruptions of El Chichón Volcano, Chiapas, Mexico [J]. *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 1984, 23(1):109-123.
- [21] LUHR J F, LOGAN M A V. Sulfur isotope systematics of the 1982 El Chichón trachyandesite: an ion microprobe study [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(18):3303-3316.
- [22] 朱炳泉. 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.
- ZHU B Q. Isotopes in the earth science system theory and application—On the evolution of the continental crust and mantle [M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [23] 赵一鸣. 中国矽卡岩矿床 [M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- ZHAO Y M. Skarn deposits of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010.
- [24] 南卡俄吾, 贾群子, 李文渊, 等. 青海东昆仑哈西亚图铁多金属矿区石英闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和岩石地球化学特征 [J]. *地质通报*, 2014, 42(6):702-712.
- NAMKHA Norbu, JIA Q Z, LI W Y, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemical characteristics of quartz diorite from the Haxiyatu iron-polymetallic ore district in Eastern Kunlun [J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 42(6):702-712.
- [25] 于森. 青海杂林格铁矿矽卡岩矿物学及矿化蚀变带特征研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- YU M. Study on the mineralogy and mineralization alteration characteristics of the skarn iron in the sillite mine in Qingling, Qinghai [D]. Beijing: China University of geosciences, 2013.
- [26] 宋忠宝, 贾群子, 张占玉, 等. 东昆仑祁漫塔格地区野马泉铁铜矿床地质特征及成因探讨 [J]. *西北地质*, 2010, 43(4):209-217.
- SONG Z B, JIA Q Z, ZHANG Z Y, et al. Study on geological feature and origin of Yemaquan Fe-Cu deposit in Qimantage area, Eastern Kunlun [J]. *North Westren Geology*, 2010, 43(4):209-217.
- [27] 田承盛, 丰成友, 李军红, 等. 青海它温查汉铁多金属矿床⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学研究及意义 [J]. *矿床地质*, 2013, 32(1):169-176.
- TIAN C S, FENG C Y, LI J H, et al. ⁴⁰Ar-³⁹Ar geochronology of Tawenchahan Fe-polymetallic deposit in Qimantagmountain of Qinghai Province and its geological implications [J]. *Mineral Deposits*, 32(1):169-176.
- [28] 熊富浩, 马昌前, 张金阳, 等. 东昆仑造山带白日其利辉长岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义 [J]. *地质通报*, 2011, 30(8):1196-1202.
- XIONG F H, MA C Q, ZHANG J Y, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of Bairiqili gabbro pluton in East Kunlun orogenic belt and its geological significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(8):1196-1202.
- [29] SHIEH S R, MAO H K, HEMLEY R J, et al. Decomposition of phase D in the lower mantle and the fate of dense hydrous silicates in subducting slabs [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1998, 159(1):13-23.
- [30] 南卡俄吾, 贾群子, 李文渊, 等. 青海省火成岩同位素地质年代学与构造岩浆热事件对比研究 [J]. *西北地质*, 2014(2):51-61.
- NAMKHA Norbu, JIA Q Z, LI W Y, et al. A comparative study on isotopic geochronology and tectonic-magmatic hydrothermal events of igneous rock in Qinghai Province [J]. *Northwestern Geology*, 2014(2):51-61.
- [31] 南卡俄吾, 贾群子, 唐玲, 等. 青海东昆仑哈西亚图矿区花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄与岩石地球化学特征 [J]. *中国地质*, 2015, 42(3):702-712.
- NAMKHA Norbu, JIA Q Z, TANG L, et al. Zircon U-Pb age and geochemical characteristics of granodiorite from the Haxiyatu iron-polymetallic ore district in Eastern Kunlun [J]. *Geology in China*, 2015, 42(3):702-712.
- [32] 南卡俄吾, 贾群子, 李文渊, 等. 东昆仑地区中生代熔融、同化、存储和均一 (MASH) 过程及壳幔岩浆混合 [J]. *地球科学与环境学报*, 2015(1):37-45.
- NAMKHA Norbu, JIA Q Z, LI W Y, et al. Melting, assimilation, storage and homogenization (MASH) process and crust-mantle magma mixing of Mesozoic in East Kunlun region [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2015, 37(1):37-45.