

新疆霍什布拉克铅锌矿床微量元素地球化学

李志丹¹, 薛春纪², 董新丰³, 王思程⁴, 张岩^{5,6}

(1. 天津地质矿产研究所, 天津 300170; 2. 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 4. 北京大学 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871; 5. 国土资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室, 山东 济南 250013; 6. 山东省地质科学研究所, 山东 济南 250013)

摘要: 霍什布拉克铅锌矿床是新疆西南天山地区晚古生代碳酸盐岩容矿的重要矿床。本文采用高精度电感耦合等离子质谱(ICP-MS)对主要矿石矿物(黄铁矿、方铅矿、闪锌矿)和热液脉石矿物方解石进行了微量元素地球化学研究。研究表明,黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、方解石具有较为相似的稀土元素特征, Eu 正异常明显, 弱负或弱正 Ce 异常指示成矿流体最初由相对氧化的条件演化为还原条件。与霍什布拉克岩体、容矿围岩的稀土元素组成进行对比后发现, 硫化物及热液方解石稀土元素配分曲线部分与重结晶泥晶灰岩重合, 结合前人同位素地球化学研究, 认为容矿坦盖塔尔组碳酸盐岩为成矿提供了必要的成矿物质及成矿流体组分。Ga/In 值显示闪锌矿为低温成矿, 硫化物明显富集 LREE, Hf/Sm、Nb/La 和 Th/La 值小于 1, 显示铅锌成矿过程中成矿流体主体以富 Cl 为特征, Y/Ho、Zr/Hf 和 Nb/Ta 值变化范围相对较小, 表明成矿期流体性质相对较为稳定, 基本未混入外来流体。

关键词: 微量元素, 硫化物矿物, 热液方解石, 霍什布拉克铅锌矿, 新疆

中图分类号: P618.4; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)03-0540-11

Trace element geochemistry of the Huoshibulake zinc-lead deposit, Xinjiang

LI Zhi-dan¹, XUE Chun-ji², DONG Xin-feng³, WANG Si-cheng⁴ and ZHANG Yan^{5,6}

(1. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China; 2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China; 4. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution of Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China; 5. Key Laboratory of Gold Mineralization Processes and Resource Utilization of Ministry of Land and Resources, Jinan 250013, China; 6. Shandong Institute of Geological Sciences, Jinan 250013, China)

Abstract: The Huoshibulake deposit, hosted in the late Paleozoic carbonate rocks, is an important Zn-Pb deposit in southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang. The trace elements of main ore minerals (pyrite, galena and sphalerite) and hydrothermal calcite were analyzed by ICP-MS in this study. The results show that pyrite, galena, sphalerite and calcite have similar REE characteristics, positive Eu anomalies and faint Ce anomalies, indicating that the ore-forming fluids evolved from a relatively oxidizing environment to a reduction environment. The authors compared the REE patterns of sulfides, calcite, Huoshibulake granite and ore-bearing wall rocks, and found that they are partly coincident with recrystallized micritic limestone. In combination with previous researches on isotope geochemistry, the authors have reached the conclusion that the Tangaitaer carbonate supplied

收稿日期: 2013-08-03; 修订日期: 2014-02-04

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAB06B02); 国家自然科学基金资助项目(U1303292, 41072069); 中国地质调查局项目(1212011220926, 12120113057300)

作者简介: 李志丹(1986-), 男, 硕士, 矿床学、矿产普查与勘探专业, E-mail: cugcug@qq.com; 通讯作者: 薛春纪(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 从事矿床学、矿产普查与勘探专业的教学与研究, E-mail: chunji.xue@cugb.edu.cn

essential metallogenic materials and ore-forming fluids. The Ga/In ratios indicate that the ore-forming temperature was low. Sulfides have light REE enrichment characteristics, with the Th/La and Nb/La ratios less than 1, suggesting Cl-richness of the ore-forming fluids. Ratios of Y/Ho, Zr/Hf and Nb/Ta varying in narrow ranges indicate that the source of the ore-forming fluid at the main metallogenic stage was simple and stable, with no addition of other fluids.

Key words: trace element; metallic sulfides; hydrothermal calcite; Huoshibulake Zn-Pb deposit; Xinjiang

铅锌是新疆优势金属矿产资源(董连慧等, 2007),西南天山地区的铅锌矿勘查与研究一直备受关注(彭守晋, 1989, 1990; 蔡宏渊等, 2002; 祝新友等, 2010; 李志丹等, 2010, 2013; 董新丰等, 2013)。新疆西南天山地区目前已经发现的铅锌矿(床)点达 200 余处(叶庆同等, 1999),其中中新世界盆地内砂砾岩容矿的乌拉根矿床规模巨大,晚古生代盆地内泥盆系碳酸盐岩中的霍什布拉克、沙里塔什铅锌矿床也已达中型规模,且近年来仍有新突破(萨瓦亚尔顿铅锌矿,赵仁夫等, 2007)。因此对碳酸盐岩容矿的霍什布拉克铅锌矿开展解剖研究很有必要。

霍什布拉克铅锌矿床在 19 世纪就被当地居民发现。1953~1956 年,新疆有色金属公司 702 队对 I 号矿体求得铅锌金属量 27 万吨(平均品位铅 3.79%, 锌 7.20%),1958 年对 II 号矿体用稀疏工程进行了控制(叶庆同等, 1999)。2001~2002 年,新疆地矿局第二地质大队对矿床进行了补勘,求得剩余锌金属量 13 万吨,铅金属量 5 万吨。彭守晋(1989)最早对矿床开展过少量硫同位素组成、流体包裹体均一法测温研究;邓贵安等(2003, 2004)进行过较为系统的矿石硫、铅同位素组成、闪锌矿流体包裹体成分、围岩地球化学等研究;张志斌等(2007)针对围岩及矿石开展过地球化学研究;黄河等(2010)对矿区南部碱性岩体开展过地球化学研究,这些工作为进一步研究奠定了良好的基础。在矿床成因方面,前人主要持喷流沉积型成因认识,李志丹等(2010)注意到矿床的后生成矿特点,在对硫化物开展了矿相学和电子探针研究、对热液碳酸盐矿物开展了 C、O、H 同位素地球化学研究,并在前人基础上对硫化物、地层、岩体的 S、Pb 同位素组成进行了对比研究后,认为霍什布拉克矿床是由于造山期逆冲推覆作用使盆地流体大规模活化、运移形成的 MVT 型矿床。

闪锌矿与方铅矿等矿石矿物中微量元素含量、组合可提供矿床成因特征的重要信息(赵振华, 1997),目前已有许多学者运用硫化物微量元素分析

来对铅锌矿床进行研究且成果显著(丁振举等, 2003; 梁婷等, 2008; 王登红等, 2012; 王立强等, 2012)。本文针对霍什布拉克铅锌矿床的主要矿石矿物(方铅矿、闪锌矿、黄铁矿)和热液脉石矿物方解石开展了微量元素地球化学研究,并与霍什布拉克岩体、围岩地球化学特征进行了对比研究,以期为理解成矿作用提供新的参考。

1 矿床地质概况

霍什布拉克铅锌矿床位于新疆维吾尔自治区克孜勒苏柯尔克孜自治州境内,大地构造上位于西南天山阔克萨勒晚古生代陆缘盆地中部(图 1a)。

霍什布拉克铅锌矿床含矿层位上泥盆统坦盖塔尔组(D_3t)是一套由碎屑岩到碳酸盐岩组成的海进序列,整体形态为一东西长约 11 km、南北宽约 0.6~1 km 的断块(图 1b、图 2),可划分为两个岩性段:下段为碎屑岩段,由砂页岩互层组成;上段为碳酸盐岩段,由泥质灰岩、灰岩、板状灰岩等组成。上段碳酸盐岩及少量下段碎屑岩构成本矿床的容矿岩石。下石炭统巴什索贡组(C_1b)上部为灰色、深灰色微粒灰岩夹少量钙质砂岩,下部为红褐色中细粒砾岩夹灰岩薄层及透镜体;上石炭统喀拉治尔加组(C_2k)为碳酸盐胶结的灰色砂岩、石英砂岩夹页岩;康克林组(C_2kn)主要岩性为灰岩、生物灰岩、白云岩等。下二叠统(P_1b)岩性为砂岩、页岩和灰岩;上二叠统(P_2k)为砂岩、页岩和灰岩,夹硅质岩、碧玉岩和凝灰岩(图 1b)。卡拉铁克深断裂(F_1)是本区主干断裂,走向 NE,倾向 NNW,倾角 $70^\circ \sim 80^\circ$,霍什布拉克逆掩断层(F_2)及北霍什布拉克第一逆断层(F_3)即是其次级逆冲推覆断层。南霍什布拉克断裂(F_4)倾向 345° ,倾角 80° ,将巴什索贡组(C_1b)地层错断(图 1b)。矿区南部约 4 km 处出露有霍什布拉克岩体,岩性为钾长花岗岩和正长岩,岩体锆石 U-Pb 年龄为 261.5 ± 2.7 Ma(杨富全等, 2001),黑云母 Ar-Ar 坪年龄为 277.3 ± 2.2 Ma(王登红等, 2010)。

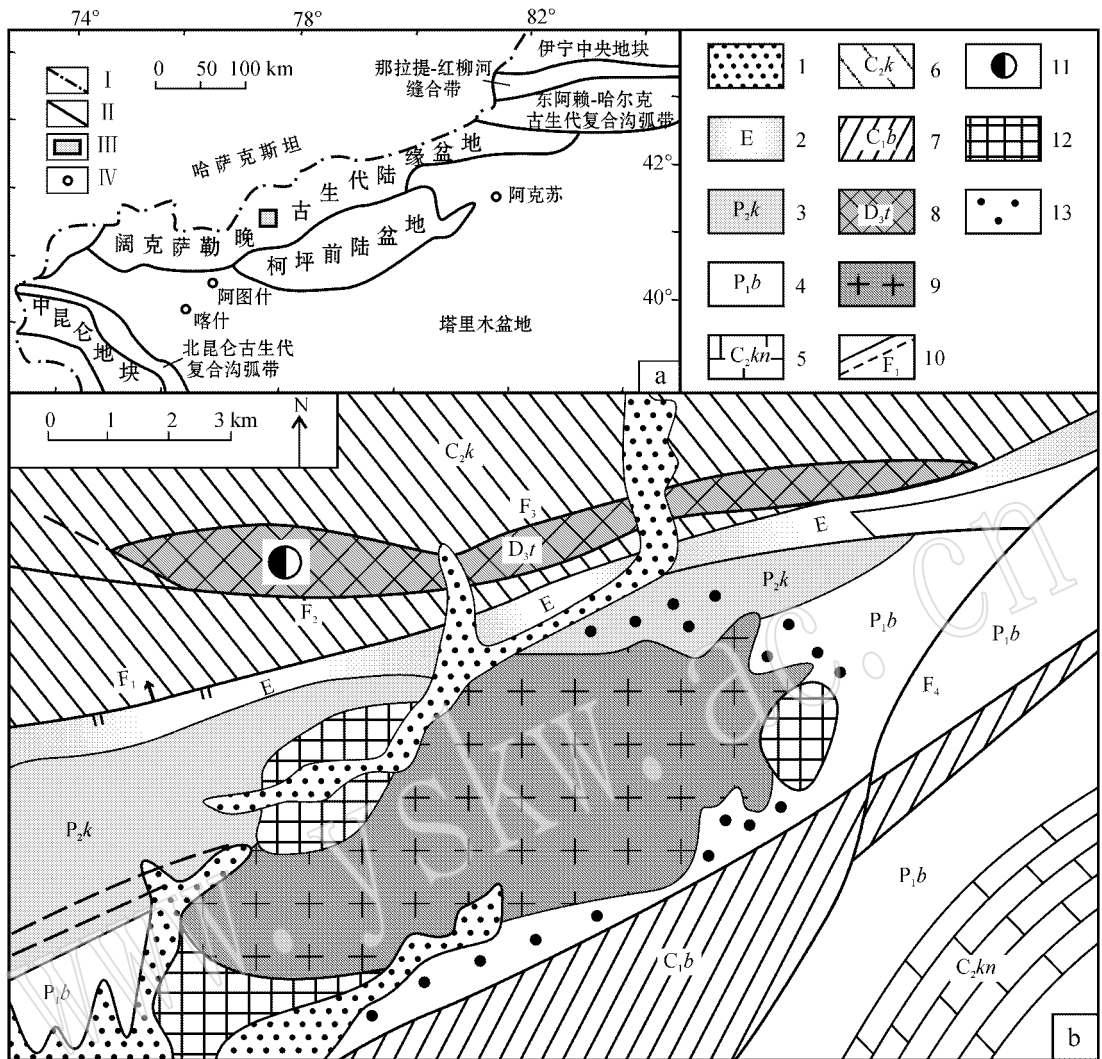


图 1 霍什布拉克铅锌矿床大地构造位置图 [a, 据张良臣等(2006)修改] 及区域地质图 [b, 据叶庆同等(1999)修改]

Fig. 1 Tectonic location (a, modified after Zhang Liangchen *et al.*, 2006) and regional geological map (b, modified after Ye Qingtong *et al.*, 1999) of the Huoshibulake Zn-Pb deposit

I—国境线; II—构造单元边界; III—研究区; IV—城市; 1—第四系; 2—古近系; 3—上二叠统; 4—下二叠统; 5—上石炭统康克林组; 6—上石炭统喀拉治尔加组; 7—下石炭统巴什索贡组; 8—上泥盆统坦盖塔尔组; 9—霍什布拉克岩体; 10—断裂及编号; 11—霍什布拉克矿床; 12—砂卡岩化; 13—角岩化; F₁—卡拉铁克大断裂; F₂—霍什布拉克逆掩断层; F₃—北霍什布拉克第一逆断层; F₄—南霍什布拉克断裂

I—national boundaries; II—boundary of tectonic unit; III—study area; IV—city; 1—Quaternary; 2—Paleogene; 3—Upper Permian; 4—Lower Permian; 5—Upper Carboniferous kangkelin Formation; 6—Upper Carboniferous Kalazhierjia Formation; 7—Lower Carboniferous Bashisuogong Formation; 8—Upper Devonian Tangaitaer Formation; 9—Huoshibulake rock mass; 10—fault and its serial number; 11—Huoshibulake deposit; 12—skarnization; 13—hornfelsed alteration; F₁—Kalatieke large fault; F₂—Huoshibulake overthrust; F₃—first north Huoshibulake reserve fault; F₄—south Huoshibulake fault

矿区出露上泥盆统坦盖塔尔组(D₃t)及喀拉治尔加组(C₂k)地层。坦盖塔尔组上下岩性段间发育霍什布拉克逆掩断层(F₂),断层以北为碳酸盐岩,以南为砂页岩。C₂k与D₃t为断层接触,并发育破碎带(图2)。区内发育霍什布拉克倒转背斜,倒转背斜走

向为EW,南翼倒转,北翼为正常翼,倾向N或330°,倾角30°~50°,容矿上泥盆统坦盖塔尔组上岩性段组成背斜的核部,两翼被近东西向断裂所破坏(图2)。

铅锌矿体总体上呈板状、层状、似层状产于坦

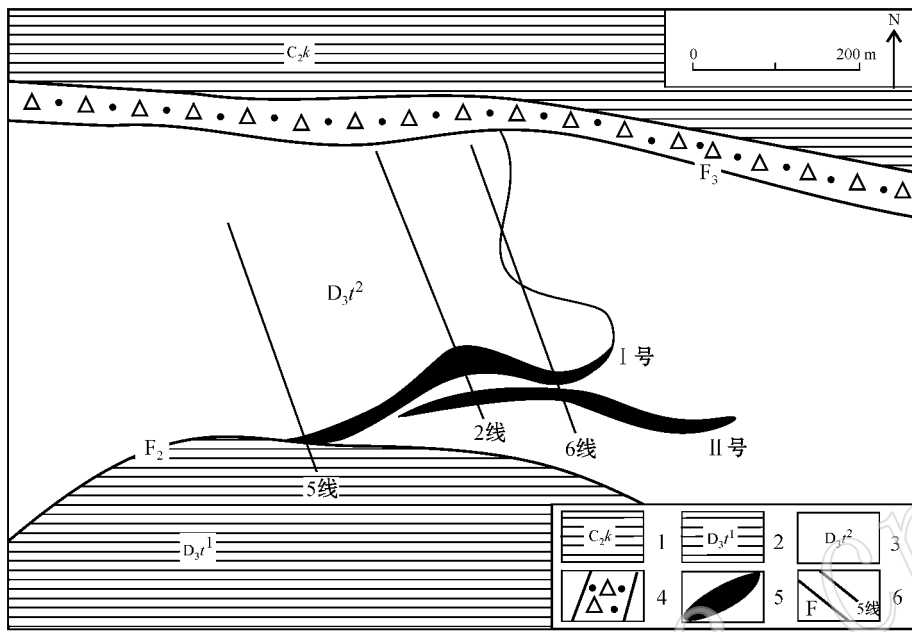


图 2 霍什布拉克铅锌矿区地质图 [据叶庆同等(1999) 张志斌等(2007)修改]

Fig. 2 Geological map of the Huoshibulake Zn-Pb deposit (modified after Ye Qingtong *et al.*, 1999 and Zhang Zhibin *et al.*, 2007)

- 1—上石炭统喀拉吉尔加组；2—上泥盆统坦盖塔尔组下段；3—上泥盆统坦盖塔尔组上段；4—破碎带；5—矿体；6—断层、勘探线及编号
- 1—Upper Carboniferous Kalazhierjia Formation；2—lower member of Upper Devonian Tangaitaer Formation；3—upper member of Upper Devonian Tangaitaer Formation；4—shatter zone；5—orebody；6—serial number of fault and exploration line

盖塔尔组上岩性段碳酸盐岩层位中。主要发育两个矿体，I号矿体为主矿体，主要由块状、脉状铅锌矿石组成；II号矿体由细脉浸染状、薄层状和纹层状方铅矿、闪锌矿石组成，底部发育有少量薄层块状铜矿石。

原生硫化物矿石矿物成分简单，主要为闪锌矿、方铅矿。次生氧化矿物复杂多样，有白铅矿、铅矾、菱锌矿、异极矿、黄钾铁矾、针铁矿、褐铁矿等，脉石矿物主要为黄铁矿、方解石和白云石，少量石英。原生矿石发育致密块状、块状、纹层状等构造，氧化矿石具有皮壳状、土状、钟乳状、蜂窝状和多孔状构造等，矿石结构多样，有胶状结构、交代残留结构、共生边结构、交代反应边结构等。

2 样品采集与测试

用于稀土、微量元素分析的金属硫化物(黄铁矿、方铅矿、闪锌矿)和热液脉石矿物(方解石)样品均为采自霍什布拉克铅锌矿床 I 号矿体采矿掌子面的新鲜矿石。挑选单矿物时，首先将矿石样品经表面清洗、晾干后，逐级破碎至 60~80 目，然后在实体

显微镜下挑选纯度达 99% 以上的样品，最后将挑纯后的单矿物样品研磨至 200 目以下送实验室分析测试。样品的分析测试工作在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。所用仪器为 Finnigan MAT 公司制造的 HR-ICP-MS(Element I)型质谱仪，测试方法和依据为《DZ/T0223-2001 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)方法通则》。分析结果见表 1 和表 2。其中，球粒陨石稀土元素丰度来自 Sun 和 McDonough(1989)，表 1 中 δEu 、 δCe 计算采用 Taylor 和 McLennan(1985)的公式 $\delta\text{Ce} = \text{Ce}_N / (\text{La}_N \times \text{Nd}_N)^{1/2}$ ； $\delta\text{Eu} = \text{Eu}_N / (\text{Sm}_N \times \text{Gd}_N)^{1/2}$ ，公式中 N 代表球粒陨石标准化。

3 测试结果及讨论

3.1 稀土元素特征

霍什布拉克铅锌矿床金属硫化物及热液脉石矿物方解石的稀土元素测试结果和配分模式图见表 1 和图 3。矿石中 5 件黄铁矿单矿物样品 ΣREE 变化范围较大，为 $0.81 \times 10^{-6} \sim 26.23 \times 10^{-6}$ ，重稀土元素含量($0.05 \times 10^{-6} \sim 1.62 \times 10^{-6}$)相对集中，但轻

表 1 霍什布拉克铅锌矿床黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、方解石单矿物稀土元素含量和特征参数

 $w_B/10^{-6}$

Table 1 Rare earth element concentrations and characteristic values of pyrite, galena, sphalerite and calcite in the Huoshubulake zinc-lead deposit

样号	矿物	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Σ REE	LREE	HREE	LREE/ HREE	(La/ Yb) _N	δ Eu	δ Ce
HK-61	黄铁矿	0.45	0.762	0.088	0.395	0.091	0.47	0.053	0.008	0.05	0.003	0.023	0.005	0.023	0.005	0.294	2.43	2.26	0.18	12.89	14.03	19.01	0.88
HK-11	黄铁矿	5.39	8.05	0.994	3.91	0.798	5.47	0.716	0.081	0.394	0.069	0.164	0.027	0.152	0.016	2.72	26.23	24.61	1.62	15.20	25.44	21.68	0.79
HK-12	黄铁矿	0.494	0.6	0.069	0.259	0.041	0.359	0.054	0.009	0.034	0.008	0.021	0.003	0.014	0.004	0.329	1.97	1.82	0.15	12.39	25.31	23.32	0.70
H-7	黄铁矿	0.22	0.247	0.029	0.176	0.022	0.068	0.029	0.003	0.003	0.001	0.007	0	0.007	0.002	0.073	0.81	0.76	0.05	14.65	22.54	8.23	0.65
HK-10	黄铁矿	2.94	4.36	0.525	2.17	0.372	3.53	0.409	0.041	0.221	0.035	0.093	0.016	0.059	0.014	1.66	14.79	13.90	0.89	15.65	35.74	27.53	0.79
HK-23	闪锌矿	1.56	2.43	0.311	1.43	0.324	2.81	0.282	0.037	0.176	0.025	0.07	0.013	0.037	0.006	1.39	9.51	8.87	0.65	13.72	30.24	27.76	0.81
HK-20-1	闪锌矿	1.46	2.18	0.241	1.03	0.19	1.06	0.171	0.026	0.11	0.017	0.049	0.007	0.042	0.007	0.856	6.59	6.16	0.43	14.36	24.93	17.62	0.82
H-3	闪锌矿	5.3	7.66	0.848	3.71	0.595	6.04	0.664	0.059	0.296	0.041	0.105	0.012	0.05	0.008	1.59	25.39	24.15	1.24	19.56	76.03	29.25	0.80
H-1	闪锌矿	0.516	0.893	0.12	0.531	0.139	0.697	0.121	0.014	0.058	0.015	0.031	0.005	0.029	0.004	0.512	3.17	2.90	0.28	10.45	12.76	16.05	0.85
HK-12	闪锌矿	4.78	7.19	0.613	1.86	0.243	0.543	0.173	0.014	0.067	0.009	0.028	0.004	0.01	0.004	0.363	15.54	15.23	0.31	49.28	342.87	7.71	0.88
HK-22	闪锌矿	0.893	1.51	0.201	0.911	0.123	0.712	0.144	0.019	0.107	0.015	0.03	0.006	0.028	0.008	0.573	4.71	4.35	0.36	12.18	22.88	16.32	0.84
HK-11	闪锌矿	2.09	3.28	0.429	1.56	0.343	2.29	0.372	0.042	0.2	0.041	0.097	0.011	0.095	0.014	1.71	10.86	9.99	0.87	11.46	15.78	19.49	0.80
HK-20	方铅矿	0.119	0.28	0.015	0.152	0.028	0.095	0.023	0.007	0.012	0.003	0.003	0.001	0.005	0.003	0.078	0.75	0.69	0.06	12.09	17.07	11.11	1.39
H-2	方铅矿	0.123	0.314	0.033	0.174	0.048	0.314	0.045	0.007	0.035	0.005	0.018	0.006	0.018	0.006	0.106	1.15	1.01	0.14	7.19	4.90	20.33	1.18
H-7	方铅矿	0.054	0.1	0.008	0.095	0.065	0.047	0.032	0.003	0.029	-	0.027	0.005	0.02	0.005	0.057	0.49	0.37	0.12	3.05	1.94	2.79	1.05
H-1	方铅矿	0.294	0.382	0.037	0.199	0.06	0.167	0.031	0.007	0.035	0.005	0.019	0.006	0.022	0.007	0.084	1.27	1.14	0.13	8.63	9.59	10.61	0.77
H-3	方铅矿	0.458	0.774	0.098	0.482	0.102	0.78	0.124	0.012	0.084	0.015	0.047	0.007	0.029	0.013	0.234	3.03	2.69	0.33	8.14	11.33	21.18	0.85
HK-10	方铅矿	2.69	3.89	0.478	2.05	0.422	2.92	0.399	0.053	0.274	0.038	0.072	0.018	0.042	0.018	0.969	13.36	12.45	0.91	13.62	45.94	21.42	0.78
HK-46	方解石	0.659	1.11	0.138	0.646	0.151	0.509	0.156	0.026	0.157	0.034	0.1	0.019	0.065	0.008	1.67	3.78	3.21	0.57	5.69	7.27	10.05	0.86
HK-31	方解石	1	1.39	0.168	0.692	0.224	1.42	0.142	0.02	0.087	0.017	0.05	0.006	0.034	0.007	0.903	5.26	4.89	0.36	13.48	21.10	22.72	0.76
HK-45	方解石	4.04	6.69	0.78	3.25	0.579	1.83	0.569	0.1	0.481	0.082	0.278	0.043	0.241	0.03	3.64	18.99	17.17	1.82	9.41	12.02	9.63	0.87
HK-24	方解石	3.69	5.92	0.686	2.68	0.457	1.76	0.432	0.066	0.369	0.071	0.195	0.028	0.143	0.023	2.72	16.52	15.19	1.33	11.45	18.51	11.93	0.85
HK-25	方解石	1.23	1.95	0.229	0.806	0.201	0.394	0.189	0.033	0.138	0.027	0.068	0.012	0.068	0.009	1.34	5.35	4.81	0.54	8.84	12.97	6.08	0.84

注：“-”为未检出项。

$w_B/10^{-6}$

表 2 霍什布拉克铅锌矿床黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、方解石单矿物微量元素含量

Table 2 Trace element compositions of pyrite, galena, sphalerite and calcite in the Huoshibulake Zn-Pb deposit

样号	矿物	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Ga	Rb	Sr	Nb	Mo	Cd	In	Sb	Cs	Ba	Ta	W	Re	Tl	Bi	Th	U	Zr	Hf
HK-61	黄铁矿	1.6	0.024	0.247	4.31	17.3	147	233	37.7	1.49	2.07	11.3	0.086	3.73	235	0.04	191	0.402	13.3	0.01	0.334	0.016	249	7	0.124	1.9	6.19	0.23
HK-11	黄铁矿	2.89	0.13	0.276	22.6	39.9	97.6	159	58.2	2.15	6.11	10	0.185	13.7	173	0.017	182	0.991	26.3	0.015	1.09	0.019	177	13.6	0.497	16.3	10.6	0.378
HK-12	黄铁矿	3.29	0.074	0.094	22	8.26	152	235	49.6	1.24	3.49	8.39	0.044	7.01	182	0.019	310	0.697	14.0	0.003	1.13	0.021	283	11.6	0.05	0.412	0.996	0.021
H-7	黄铁矿	1.08	0.018	0.052	0.876	16.3	61.7	129	53.7	1.06	2.22	2.88	0.012	1.74	60.9	0.064	163	0.122	7.96	0.002	0.18	0.005	184	9.94	0.039	0.213	0.255	0.008
HK-10	黄铁矿	3.29	0.122	0.195	48.4	20.3	74.8	137	55.9	1.67	4.7	7.1	0.074	5.25	158	0.012	185	0.93	17.0	0.006	0.588	0.007	195	8.74	0.266	4.32	2.36	0.044
HK-23	闪锌矿	2.99	0.195	0.218	8.36	9.98	25.2	22.8	55.4	1.24	3.75	20.7	0.03	1.08	1848	0.02	105	0.995	55.4	0.004	0.119	0.008	34.5	4.07	0.228	2.82	1.73	0.054
HK-20-1	闪锌矿	3.74	0.101	0.162	8.78	8.62	9.87	10	60.5	1.48	4.26	10.2	0.017	1.22	1913	0.027	66.3	2.79	23.2	0.001	0.1	0.006	32.7	4.18	0.194	1.33	1.56	0.032
H-3	闪锌矿	4.18	0.062	0.093	15.7	11.4	7.2	4.01	71.3	1.74	4.08	5.01	0.023	0.097	2017	0.034	36.4	3.76	15.1	0.008	0.056	0.003	16.4	1.76	0.206	3.15	0.99	0.055
H-1	闪锌矿	3.34	0.065	0.358	18.1	8.54	24.6	6.17	100	4.1	3.34	16.3	0.013	0.205	1691	0.033	28.8	1.54	18.7	-	0.027	0.004	5.91	0.759	0.109	0.987	0.861	0.037
HK-12	闪锌矿	3.18	0.096	0.113	10.2	8.51	19.2	18.2	82.5	2.32	3.76	3.64	0.02	0.77	1680	0.022	39.3	3.44	35.1	0.004	0.091	0.009	24	4.11	0.202	1.52	1.67	0.036
HK-22	闪锌矿	2.52	0.088	0.272	10.7	8.85	8.73	7.41	137	1.55	4.44	7.11	0.028	6.95	1909	0.036	54	2.2	20.7	0.008	0.063	0.005	27.2	3.92	0.188	1.16	1.27	0.025
HK-11	闪锌矿	1.43	0.09	0.218	10.1	7.36	11.7	10.3	85.1	2.24	4.24	7.05	0.045	1.05	1550	0.025	52.2	2.25	19.1	0.002	0.112	0.015	20.6	4.32	0.155	1.2	1.14	0.028
HK-20	方铅矿	1.84	0.051	5.23	6.93	20.1	6.36	12.2	5.11	0.225	1.25	0.493	0.044	0.533	165	0.011	116	0.178	1.84	0.029	0.062	0.011	292	74.1	0.113	0.331	0.633	0.02
H-2	方铅矿	1.26	0.086	2.71	0.565	12	10.4	15.5	15.6	0.129	0.818	23.4	0.005	0.393	121	0.008	20.8	0.169	5.45	0.006	0.026	0.008	168	42.9	0.033	0.919	0.301	0.035
H-7	方铅矿	0.288	0.039	0.838	0.154	14.1	16.7	17.2	1.91	0.077	0.531	0.61	0.009	0.475	46.3	0.006	319	0.03	6.01	0.004	0.031	0.014	283	71	0.034	0.201	0.22	0.036
H-1	方铅矿	0.106	0.126	0.096	1.83	11.7	7.37	21.5	5.53	0.082	0.577	4.52	0.015	1.07	14.5	0.003	94.6	0.015	3.53	0.005	0.061	0.016	102	42.9	0.05	0.572	0.357	0.031
H-3	方铅矿	0.5	0.245	31.9	1.31	15.2	3.88	4.66	8.36	0.275	0.428	0.92	0.046	0.473	44.1	0.006	319	0.063	13.0	0.027	0.107	0.027	292	43.5	0.121	0.641	0.51	0.076
HK-10	方铅矿	1.73	0.2	18.3	12.8	11.4	13.1	15.3	119	0.709	1.1	21.3	0.009	1.26	131	0.027	151	0.2	7.73	0.009	0.128	0.029	158	75.9	0.165	2.32	0.714	0.084
HK-46	方解石	4.7	0.079	0.998	4.05	4.96	3.18	33.2	13.2	0.203	1.68	563	0.007	0.101	6.45	0.082	0.117	0.044	185	-	0.036	0.006	0.223	0.019	0.038	0.146	1.14	0.016
HK-31	方解石	2.32	0.05	0.902	11.1	2.31	3.15	35.5	14.5	0.598	0.968	1097	0.004	0.065	4.51	0.009	0.059	0.052	72.8	0.001	0.031	0.003	0.076	0.016	0.051	0.12	1.23	0.015
HK-45	方解石	1.08	0.007	1.26	10.2	2.05	3.35	35.4	7.82	0.773	0.711	686	0.007	0.049	0.835	0.006	0.201	0.028	370	0.001	0.023	0.002	0.244	0.077	0.135	0.167	0.437	0.012
HK-24	方解石	0.573	0.02	0.932	8.25	1.22	2.71	31.9	86.5	0.55	0.391	896	0.01	0.416	2.51	0.019	0.137	0.038	41.8	0.002	0.017	-	0.078	0.093	0.104	0.506	1.12	0.014
HK-25	方解石	1.23	0.021	1.21	10	3.92	3.37	37.5	9.19	0.379	0.282	1052	0.008	0.038	11	0.005	0.107	0.019	48.6	0.002	0.026	0.005	0.078	0.011	0.06	0.064	2.32	0.013

注:“-”为未检出项。

稀土元素含量($0.76 \times 10^{-6} \sim 24.61 \times 10^{-6}$)变化范围大, LREE/HREE 为 12.39~15.20, 表现出极强的轻重稀土元素分馏, $\delta E_u = 8.23 \sim 23.32$, $\delta Ce = 0.65 \sim 0.88$, 前者表现出极强的正异常, 后者为微弱的负异常。7 件闪锌矿样品 ΣREE 为 $0.75 \times 10^{-6} \sim 25.39 \times 10^{-6}$, LREE($0.69 \times 10^{-6} \sim 24.15 \times 10^{-6}$)变化大, HREE($0.06 \times 10^{-6} \sim 1.24 \times 10^{-6}$)相对集中, LREE/HREE 为 10.45~49.28, 轻重稀土元素分馏明显, δE_u 介于 7.71~29.25 之间, δCe 介于 0.80~1.39 之间, 前者为明显的正异常, 后者为不太明显的负异常。6 件方铅矿单矿物样品 ΣREE 为 $0.49 \times 10^{-6} \sim 13.36 \times 10^{-6}$, 重稀土元素含量($0.12 \times 10^{-6} \sim 0.91 \times 10^{-6}$)相对集中, 但 LREE($0.37 \times 10^{-6} \sim 12.45 \times 10^{-6}$)变化范围大, $\delta E_u = 2.79 \sim 21.42$, $\delta Ce = 0.77 \sim 1.18$, 前者正异常明显, 后者从弱的负异常到弱的正异常。5 件共生热液脉石矿物方解石 ΣREE 为 $3.78 \times 10^{-6} \sim 18.99 \times 10^{-6}$, LREE($3.21 \times 10^{-6} \sim 17.17 \times 10^{-6}$)变化大, HREE($0.36 \times 10^{-6} \sim 1.82 \times 10^{-6}$)集中, LREE/HREE 为 5.69~13.48, 轻重稀土元素分馏明显, δE_u (6.08~22.72)为明显正异常, δCe (0.76~0.87)显示不太明显的负异常。

霍什布拉克矿床黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、共生方解石单矿物稀土元素配分曲线呈整体右倾的轻稀土元素富集型(图 3), 且配分曲线具有较为相似的特征, 表明它们在结晶时以较为相似的方式选择性赋存稀土元素。

矿物中稀土元素的主要赋存形式可能有吸附、晶格缺陷、类质同像及流体包裹体等。相对于类质同像和流体包裹体存在形式, 另外两种赋存状态下的稀土元素含量较低(赵振华, 1997; 中国科学院地球化学研究所, 2000; 毛光周等, 2006; 王立强等, 2012)。由于 REE^{3+} 的离子半径与 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 的离子半径相差较远, REE 很难以类质同像替代硫化物中的金属离子, 其最可能赋存于硫化物的流体包裹体中。因此, 霍什布拉克矿床金属硫化物 REE 特征可以直接反映成矿流体中的 REE 组成特点, 硫化物与热液方解石较为相似的稀土元素配分模式也可证明这一点。

在热液体系中, 稀土元素地球化学可以十分有效地示踪成矿流体的来源和水-岩相互作用。 δE_u 、 δCe 值是稀土元素地球化学研究中用来讨论成岩成矿的重要指数之一。一般认为, 在还原条件下溶液中

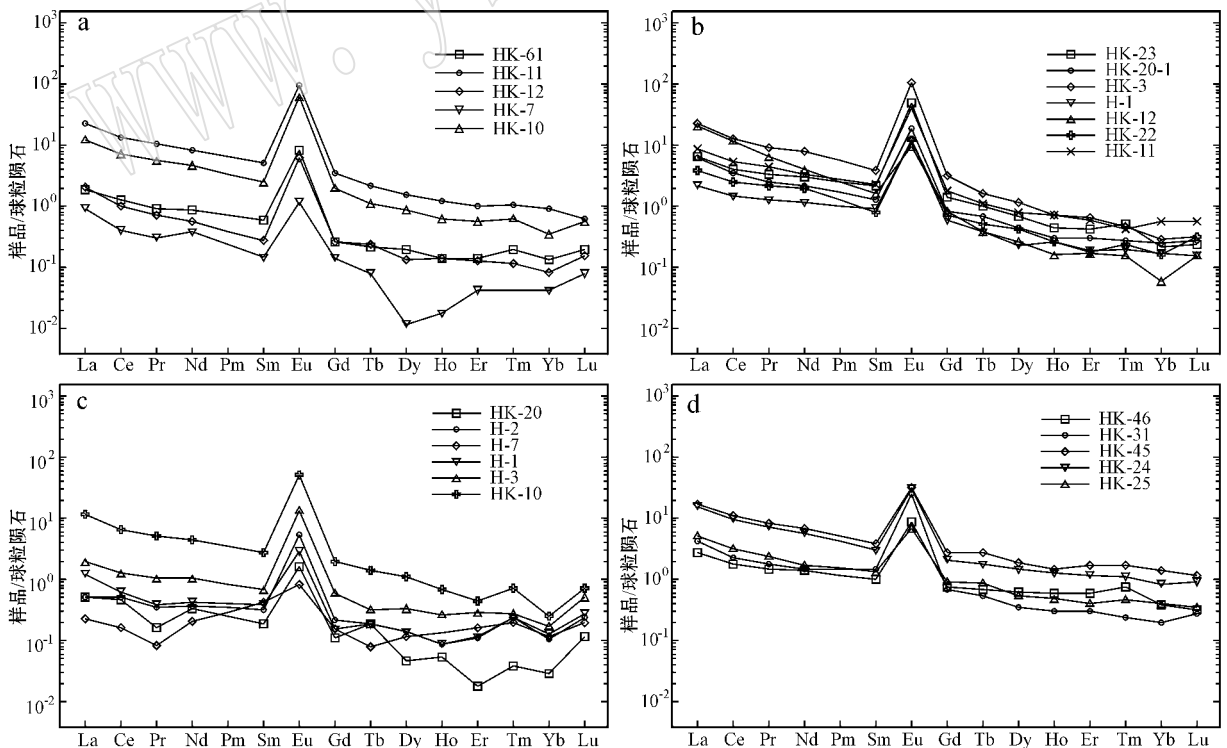


图 3 霍什布拉克铅锌矿床黄铁矿(a)、闪锌矿(b)、方铅矿(c)和方解石(d)单矿物稀土元素配分模式图

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of pyrite (a), sphalerite (b), galena (c) and calcite (d) in the Huoshibulake Zn-Pb deposit

Eu 会被还原 ($\text{Eu}^{3+} + \text{e}^{-} \rightarrow \text{Eu}^{2+}$), Eu^{2+} 比其他稀土元素更容易滞留在水溶液中, 从而使成矿流体由于逐渐富集 Eu^{2+} 而出现 Eu 正异常; 而还原条件往往不会造成 Ce 的负异常, 因为 Ce 负异常的出现与 Ce^{3+} 氧化成 Ce^{4+} 以 CeO_2 形式从溶液中沉淀下来有关。霍什布拉克矿床矿石硫化物单矿物与热液脉石矿物方解石均表现为明显的正 δEu 异常, 硫化物显弱负或弱正 δCe 异常, 方解石显弱负 δCe 异常, 显示成矿流体最初由相对氧化的条件演化为还原条件。

将矿区南部霍什布拉克岩体、容矿围岩与硫化物和热液方解石单矿物稀土元素特征进行对比(图 4), 可以发现, 单矿物稀土元素配分曲线与岩体明显

不存在相关性, 但与容矿地层稀土元素存在可比性。张志斌等(2007)研究表明, 霍什布拉克矿区不同岩性围岩稀土元素配分曲线明显分两组: 一组为重结晶泥晶灰岩的配分曲线, 稀土元素总量相对较低; 另一组为泥质粉砂岩、角岩化页岩、泥质粉砂质灰岩、粉砂质页岩、粉砂质泥灰岩、粉砂质灰岩组成的配分曲线, 稀土元素总量相对较高(图 4), 对比显示, 硫化物及热液方解石稀土配分曲线与重结晶泥晶灰岩部分重合, 暗示两者之间可能存在稀土元素亲缘性。结合霍什布拉克铅锌矿床硫化物 S、Pb 同位素组成及热液方解石 C、H、O 同位素研究(李志丹等, 2010), 可以认为容矿坦盖塔尔组碳酸盐岩为成矿提供了必要的成矿物质及成矿流体组分。

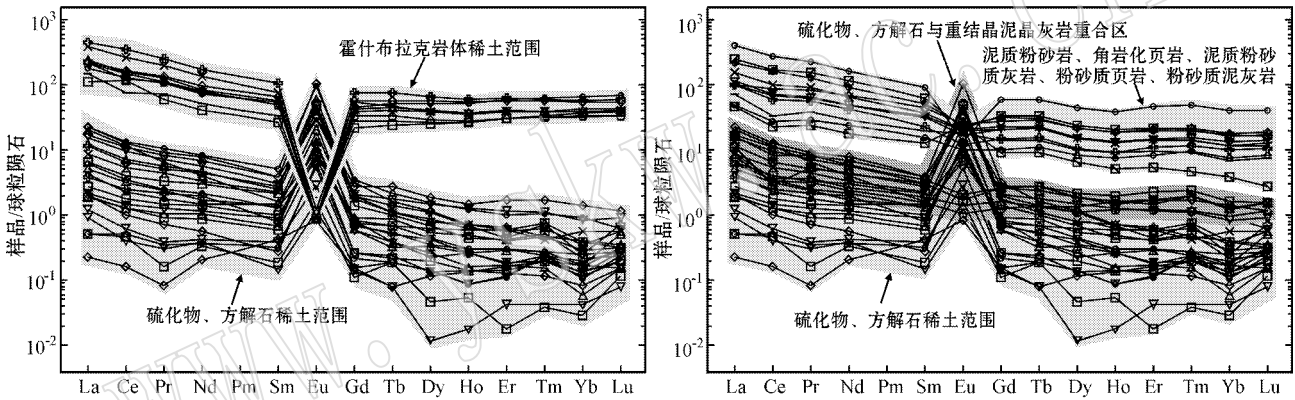


图 4 霍什布拉克矿床硫化物、热液方解石与霍什布拉克岩体(左)围岩(右)球粒陨石标准化稀土元素配分模式对比图(岩体数据来自黄河等, 2010; 围岩数据来自张志斌等, 2007; 样号与图 3 相对应)

Fig. 4 Comparative REE patterns of sulfide, hydrothermal calcite and Huoshibulake granite (left), wall rock (right) in the Huoshibulake deposit (granite data after Huang He *et al.*, 2010, wall rock data after Zhang Zhibin *et al.*, 2007, sample number as for Fig. 3)

3.2 微量元素

霍什布拉克铅锌矿黄铁矿中 Co 含量为 $(61.7 \sim 152) \times 10^{-6}$, 平均为 106.7×10^{-6} ; Ni 含量为 $(129 \sim 235) \times 10^{-6}$, 平均为 179.6×10^{-6} ; Cu 含量为 $(37.7 \sim 58.2) \times 10^{-6}$, 平均为 50.1×10^{-6} 。方铅矿中 Co 含量为 $(3.88 \sim 16.7) \times 10^{-6}$, 平均为 9.80×10^{-6} ; Ni 含量为 $(4.66 \sim 21.5) \times 10^{-6}$, 平均为 14.1×10^{-6} ; Cu 含量为 $(1.91 \sim 119) \times 10^{-6}$, 平均为 25.9×10^{-6} 。闪锌矿中 Co 含量为 $(7.2 \sim 25.2) \times 10^{-6}$, 平均为 15.4×10^{-6} ; Ni 含量为 $(4.01 \sim 22.8) \times 10^{-6}$, 平均为 11.7×10^{-6} ; Cu 含量为 $(55.4 \sim 137) \times 10^{-6}$, 平均为 87.1×10^{-6} 。黄铁矿中的 Co、Ni 含量远大于方铅矿、闪锌矿中含量, 主要是由于 Co、Ni 可以类

质同像置换黄铁矿中的 Fe; 闪锌矿中 Cu 大于黄铁矿、方铅矿中 Cu 含量, 是由于 Cu 能够直接以类质同像的方式置换 Zn 而进入闪锌矿晶格所致。

闪锌矿中 Ga/In 值可指示其形成温度。Ga/In 值介于 0.01~0.05 为高温闪锌矿, 0.01~5.0 为中温闪锌矿, 1.0~100.0 为低温闪锌矿(成都地质学院, 1978)。霍什布拉克矿床闪锌矿 Ga 含量为 $(1.24 \sim 4.1) \times 10^{-6}$, 平均为 2.1×10^{-6} , In 含量为 $(0.022 \sim 0.036) \times 10^{-6}$, 平均值为 0.03×10^{-6} , Ga/In 值为 43.06~124.24, 平均为 77.52, 属低温闪锌矿。在相同成矿体系, 闪锌矿的 Fe 含量越低, 颜色越浅, 其形成温度也越低, 霍什布拉克矿床闪锌矿显浅黄色, 镜下呈浅灰色, 这与 Ga/In 值反映的矿物形成温度相

一致。

稀土元素与高场强元素配合,可以判断成矿流体的性质(胡瑛等,2009)。研究表明,富 Cl 与富 F 流体均可大量迁移 LREE,但二者对 HFSE 的迁移有明显差异,富 Cl 的热液易富集 LREE, Hf/Sm、Nb/La 和 Th/La 值一般小于 1;而富 F 的热液可同时富集 LREE 和 HFSE, Hf/Sm、Nb/La 和 Th/La 值一般大于 1(Haas *et al.*, 1995; Keppler, 1996; 毕献武等, 2004; 胡瑛等, 2009; 汪立强等, 2012)。霍什布拉克铅锌矿床硫化物单矿物明显呈 LREE 富集, Hf/Sm 值除 1 件样品大于 1 外(2.53),其余 17 件样品介于 0.08~0.75 之间; Nb/La 和 Th/La 值均小于 1,其变化范围分别为 0.003~0.37 和 0.04~0.95。这些特征显示霍什布拉克铅锌矿床形成过程中成矿流体主体以富 Cl 为特征。

另外, Y-Ho、Zr-Hf 和 Nb-Ta 具有两两相近的离子半径和电价,在同一热液体系中,两者比值稳定,但当体系受到干扰变化(如发生水岩反应和交代作用)时,这些元素对会发生明显的分异,不同样品间同一元素对的比值也有较大的变化范围(Bau and Dulski, 1999; Yaxley *et al.*, 1998; 胡瑛等, 2009; 汪立强等, 2012)。霍什布拉克矿床 18 件硫化物单矿物样品 Y/Ho(15.6~73)、Zr/Hf(6.1~53.64)、Nb/Ta(0.83~22.5)值变化范围相对较小,表明成矿期流体性质相对较为稳定,基本未混入外来流体。

4 结论

霍什布拉克铅锌矿床是新疆西南天山地区晚古生代碳酸盐岩容矿的典型矿床。其主要矿石矿物(方铅矿、闪锌矿、黄铁矿)和热液脉石矿物方解石微量元素地球化学研究表明,黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、方解石具有较为相似的稀土元素特征, Eu 异常明显,弱负或弱正 Ce 异常指示成矿流体最初由相对氧化的条件演化为还原条件。

与霍什布拉克岩体、容矿围岩的稀土元素组成进行对比后发现,硫化物及热液方解石稀土元素配分曲线部分与重结晶泥晶灰岩重合,结合前人同位素地球化学研究,认为容矿坦盖塔尔组碳酸盐岩为成矿提供了必要的成矿物质及成矿流体组分。

Ga/In 值显示闪锌矿为低温成矿,硫化物明显富集 LREE, Hf/Sm、Nb/La 和 Th/La 值小于 1,显示铅锌成矿过程中成矿流体主体以富 Cl 为特征; Y/

Ho、Zr/Hf 和 Nb/Ta 值变化范围相对较小,表明成矿期流体性质相对较为稳定,基本未混入外来流体。

References

- Bau M and Dulski P. 1999. Comparing yttrium and rare earths in hydrothermal fluids from the Mid-Atlantic Ridge: Implications for Y and REE behavior during near-vent mixing and for the Y/Ho ratio of Proterozoic sea water[J]. *Chem. Geol.*, 155: 77~90.
- Bi Xianwu, Hu Ruizhong, Peng Jiantang, *et al.* 2004. REE and HFSE geochemical characteristics of pyrites in Yao, an gold deposit: tracing ore forming fluid signatures[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 23(1): 1~4 (in Chinese with English abstract).
- Cai Hongyuan, Deng Guian and Zheng Yuepeng. 2002. Genetic discussion on Wulagen lead-zinc deposit of Xinjiang[J]. *Mineral Resources and Geology*, 16(1): 1~5 (in Chinese with English abstract).
- Chengdu Geological College. 1978. *Mineral Deposits*(Under volume) [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Deng Guian and Cai Hongyuan. 2003. Genesis of the Huoshibulake lead-zinc deposit[J]. *Mineral Resources and Geology*, 17(6): 687~691 (in Chinese with English abstract).
- Deng Guian and Cai Hongyuan. 2004. Geology, geochemistry characteristic of Huoshibulake Lead-Zinc deposit, South Tianshan[A]. He Guoqi and Xu Xin. *The Collected Papers on Geology and Minerals of Tianshan Mountain, Xinjiang Area, China*[C]. Beijing: Geological Publishing House, 179~186 (in Chinese).
- Ding Zhenju, Yao Shuzhen, Liu Congqiang, *et al.* 2003. The characteristics of exhalation-sedimentary deposit of Donggouba polymetal deposit: evidence from ore's REE composition[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 792~798 (in Chinese with English abstract).
- Dong Lianhui, Zhuang Daoze, Feng Jing, *et al.* 2007. The stratabound lead-zinc deposits of xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 25(4): 339~344 (in Chinese with English abstract).
- Dong Xinfu, Xue Chunji, Li Zhidan, *et al.* 2013. Characteristics and geological significances of the organic matter in the Wulagen Zn-Pb deposit, Kashi sag, Xinjiang[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(1): 129~145 (in Chinese with English abstract).
- Hass J R, Shock E L and Sassani D C. 1995. Rare earth elements in hydrothermal systems: estimates of standard partial modal thermodynamic properties of aqueous complexes of the rare earth elements at high pressures and temperatures[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59(21): 4329~4350.
- Hu Ying, Chen Maohong, Dong Qingji, *et al.* 2009. Trace elements features of the vein quartzs, arsenian pyrites and their fluid inclusions in Jinfeng (Lannigou) gold deposit, Guizhou Province, China[J].

- Geological Journal of China Universities, 15(4): 506~516 (in Chinese with English abstract).
- Huang He, Zhang Zhaochong, Zhang Shu, *et al.* 2010. Petrology and geochemistry of the Huoshibulake alkali feldspar granite pluton in Southwest Tianshan, Xinjiang: Implications for petrogenesis, tectonic setting and mineralization[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 29(6): 707~718 (in Chinese with English abstract).
- Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences. 2000. Higher Geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 159 (in Chinese).
- Keppler H. 1996. Constraints from partitioning experiments on the composition of subduction zone fluid[J]. Nature, 380: 237~240.
- Li Zhidan, Xue Chunji, Dong Xinfeng, *et al.* 2013. Ore geology, S- and Pb-isotopic compositions of the Wulagen Zn-Pb deposit, Wuqia County, Xinjiang[J]. Earth Science Frontiers, 20(1): 40~54 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhidan, Xue Chunji, Zhang Shu, *et al.* 2010. Geology, geochemistry and genesis of the Huoshibulake Zn-Pb deposit, southwestern Tianshan, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 29(6): 983~998 (in Chinese with English abstract).
- Liang Ting, Wang Denghong, Hu Chang'an, *et al.* 2008. Geochemistry of trace and REE elements in the Caixiashan Pb-Zn deposit, Xinjiang[J]. Geology and Prospecting, 44(5): 1~9 (in Chinese with English abstract).
- Mao Guangzhou, Hua Renmin, Gao Jianfeng, *et al.* 2006. REE composition and trace element features of gold-bearing pyrite in Jinshan gold deposit, Jiangxi province[J]. Mineral Deposits, 25(4): 412~426 (in Chinese with English abstract).
- Peng Shoujin. 1989. The geological feature and genesis of Huoshibulake Pb-Zn deposit[J]. Xinjiang Nonferrous, 1: 79~84 (in Chinese).
- Peng Shoujin. 1990. The geological characteristics and origin of major lead-zinc ore deposits in Kasgar region[J]. Xinjiang Nonferrous, 2: 8~16 (in Chinese).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. Magmatism in Ocean Basins [C]. London: Geological Society Special Publications, 42: 313~345.
- Taylor S R and Mclennan S M. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1~372.
- Wang Denghong, Chen Zhenghui, Chen Yuchuan, *et al.* 2010. New data of the rock-forming and ore-forming chronology for China's important mineral resource areas[J]. Acta Geologica Sinica, 84(7): 1030~1040 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Li Chao, Chen Zhenghui, *et al.* 2012. New application of molybdenite in the study on ore deposits: rare earth elements geochemistry[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 42(6): 1647~1655 (in Chinese with English abstract).
- Wang Liqiang, Tang Juxing, Wang Denghong, *et al.* 2012. Rare earth element and trace element features of molybdenite in Baogpu Mo (Cu) deposit, Maizhoukanggar, Xizang (Tibet), and their constraints on the nature of ore-forming fluid[J]. Geological Review, 5: 887~892 (in Chinese with English abstract).
- Yang Fuquan, Wang Liben, Ye Jinhua, *et al.* 2001. Zircon U-Pb age of granites in the Huoshibulake area, Xinjiang[J]. Regional Geology of China, 20(3): 267~273 (in Chinese with English abstract).
- Yaxley G M, Green D H and Kamenetsky V. 1998. Carbonatite metasomatism in the southeastern Australia lithosphere[J]. Journal of Petrology, 39: 1917~1930.
- Ye Qingtong, Wu Yiping and Fu Xujie. 1999. Ore-forming Conditions and Metallogenic Prognosis of Gold and Nonferrous Metallic Resources in Southwestern Tianshan Mountain [M]. Beijing: Geol. Pub. House, 129~140 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Liangchen and Liu Dequan. 2006. Metallogenic Rules of Dominant Metal Minerals in Xinjiang, China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 284~288 (in Chinese).
- Zhang Zhibin, Ye Lin, Li Wenqian, *et al.* 2007. Geological and geochemical characteristics of huoshibulake Pb-Zn deposit in xinjiang [J]. Geotectonica et Metallogenia, 31(2): 205~217 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Renfu, Wen Zhiliang, Yang Pengfei, *et al.* 2007. Mineral character and exploration prospect of Lead-Zinc multi-metal ore deposits of Sawayaerdun in Xinjiang [J]. Northwestern Geology, 40(2): 56~69 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua. 1997. Trace Element Geochemical Principle [M]. Beijing: Science Press, 56~100 (in Chinese).
- Zhu Xinyou, Wang Jingbin, Liu Zengren, *et al.* 2010. Geologic characteristics and the genesis of the Wulagen Lead-Zinc deposit, Xinjiang, China [J]. Acta Geologica Sinica, 84(5): 695~702 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 等. 2004. 黄铁矿微量元素地球化学特征及其对成矿流体性质的指示[J]. 矿物岩石地球化学通报, 23(1): 1~4.
- 蔡宏渊, 邓贵安, 郑跃鹏. 2002. 新疆乌拉根铅锌矿床成因探讨[J]. 矿产与地质, 16(1): 1~5.
- 成都地质学院. 1978. 矿床学(下册)[M]. 北京: 地质出版社.
- 丁振举, 姚书振, 刘丛强, 等. 2003. 东沟坝多金属矿床喷流沉积成矿特征的稀土元素地球化学示踪[J]. 岩石学报, 19(4): 792~

- 798.
- 董连慧,庄道泽,冯京,等. 2007. 新疆层控型铅锌矿[J]. 新疆地质, 25(4): 339~344.
- 董新丰,薛春纪,李志丹,等. 2013. 新疆喀什凹陷乌拉根铅锌矿床有机质特征及其地质意义[J]. 地质前缘, 20(1): 129~145.
- 邓贵安,蔡宏渊. 2003. 霍什布拉克铅锌矿床成因研究[J]. 矿产与地质, 17(6): 688~691.
- 邓贵安,蔡宏渊. 2004. 南天山霍什布拉克铅锌矿床地质地球化学特征[A]. 何国琦,徐新. 中国新疆天山地质与矿产论文集[C]. 北京:地质出版社, 179~186.
- 胡瑛,陈懋弘,董庆吉,等. 2009. 贵州锦丰(烂泥沟)金矿床含砷黄铁矿和脉石英及其包裹体的微量元素特征[J]. 高校地质学报, 15(4): 506~516.
- 黄河,张招崇,张舒,等. 2010. 新疆西南天山霍什布拉克碱长花岗岩体岩石学及地球化学特征——岩石成因及其构造与成矿意义[J]. 岩石矿物学杂志, 29(6): 707~718.
- 李志丹,薛春纪,董新丰,等. 2013. 新疆乌恰县乌拉根铅锌矿床地质特征和S-Pb同位素组成[J]. 地质前缘, 20(1): 40~54.
- 李志丹,薛春纪,张舒,等. 2010. 新疆西南天山霍什布拉克铅锌矿床地质、地球化学及成因[J]. 矿床地质, 29(6): 983~998.
- 梁婷,王登红,胡长安,等. 2008. 新疆彩霞山铅锌矿微量和稀土元素地球化学特征初步研究[J]. 地质与勘探, 44(5): 1~9.
- 毛光周,华仁民,高剑锋,等. 2006. 江西金山含金黄铁矿的稀土元素赋存状态研究[J]. 矿物学报, 26(4): 409~417.
- 彭守晋. 1989. 霍什布拉克铅锌矿床地质特征及成因初探[J]. 新疆有色金属, 1: 79~84.
- 彭守晋. 1990. 喀什地区主要铅锌矿床地质特征及成因探讨[J]. 新疆有色金属, 2: 8~16.
- 王登红,陈郑辉,陈毓川,等. 2010. 我国重要矿产地成岩成矿年代学研究新数据[J]. 地质学报, 84(7): 1030~1040.
- 王登红,李超,陈郑辉,等. 2012. 辉钼矿在矿床学研究中的新用途(1) 稀土元素示踪[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(6): 1647~1655.
- 王立强,唐菊兴,王登红,等. 2012. 西藏墨竹工卡县邦铺钼(铜)矿床辉钼矿稀土-微量元素特征及对成矿流体性质的指示[J]. 地质论评, 5: 887~892.
- 杨富全,王立本,叶锦华,等. 2001. 新疆霍什布拉克地区花岗岩锆石U-Pb年龄[J]. 中国区域地质, 20(3): 267~273.
- 叶庆同,吴一平,傅旭杰,等. 1999. 西南天山金和有色金属矿床成矿条件和成矿预测[M]. 北京:地质出版社, 129~140.
- 张良臣,刘德权等. 2006. 中国新疆优势金属矿产成矿规律[M]. 北京:地质出版社, 284~288.
- 张志斌,叶霖,李文铅,等. 2007. 新疆霍什布拉克铅锌矿床地质、地球化学特征研究[J]. 大地构造与成矿学, 31(2): 205~217.
- 赵仁夫,温志亮,杨鹏飞,等. 2007. 新疆乌恰萨瓦亚尔顿铅锌矿床成矿地质特征及找矿远景[J]. 西北地质, 40(2): 56~69.
- 赵振华. 1997. 微量元素地球化学原理[M]. 北京:科学出版社, 56~100.
- 中国科学院地球化学研究所. 2000. 高等地球化学[M]. 北京:科学出版社, 159.
- 祝新友,王京彬,刘增仁,等. 2010. 新疆乌拉根铅锌矿床地质特征与成因[J]. 地质学报, 84(5): 695~702.