

新疆蒙库铁矿床稀土元素地球化学及对铁成矿作用的指示*

杨富全¹ 毛景文¹ 徐林刚² 张岩³ 刘锋¹ 黄成林⁴ 周刚⁵ 刘国仁⁵ 代军治²

YANG FuQuan¹, MAO JingWen¹, XU LinGang², ZHANG Yan³, LIU Feng¹, HUANG ChengLin⁴, ZHOU Gang⁵, LIU GuoRen⁵ and DAI JunZhi²

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

2. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

3. 宁夏国土资源厅信息中心, 银川 750002

4. 新疆富蕴县八钢蒙库铁矿采选分厂, 新疆富蕴县 836100

5. 新疆地质矿产勘探开发局第四地质大队, 阿尔泰 836500

1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. State Key Laboratory of Geo-Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3. Information Center, Ningxia Department of Land and Resources, Yinchuan 750002, China

4. Xinjiang Fuyun County Bagang Mengku Iron Ore Mining and Mineral Processing Plant, Xinjiang Fuyun 836100, China

5. No. 4 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Xinjiang Altay 836500, China

2007-06-20 收稿, 2007-08-24 改回.

Yang FQ, Mao JW, Xu LG, Zhang Y, Liu F, Huang CL, Zhou G, Liu GR and Dai JZ. 2007. REE geochemistry of the Mengku iron deposit, Xinjiang, and its indication for iron mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10):2443–2456

Abstract The large Mengku iron deposit, Fuyun County, Xinjiang, is hosted in the metamorphosed volcanoclastic – sedimentary rocks of the Lower Devonian Kangbutiebao Formation. The orebodies in the deposit occur as beds or lenses. There are skarns in the orebodies, but they do not occur in a contact zone of the intrusion. Epidote, garnet and ores have similar chondrite – normalized REE distribution patterns and are enriched in light REE (LREE) with a moderate Eu positive anomaly but no Ce anomaly, implying that there is genetic relation between ores and skarns. Garnet has kick – down – line – shaped REE distribution patterns with a pronounced Eu positive anomaly. Three types of fluid inclusion, namely melt inclusions, melt – fluid inclusions and two – phase aqueous type inclusions, have been recognized in garnet. The combined REE geochemistry and fluid inclusion studies imply that the garnet skarn is of magmatic origin and hydrothermal origin. The garnet skarn formed in the magmatic – hydrothermal transitional stage in which the crystal, melt and fluid phases coexist. The geological characteristics and REE geochemistry of skarn minerals and ores suggest that the Mengku iron deposit is best classified as a skarn – type iron deposit.

Key words Skarn, REE geochemistry, Iron deposit, Mineralization, Mengku

摘要 新疆富蕴县蒙库大型铁矿呈层状、似层状、透镜状赋存于下泥盆统康布铁堡组变质火山 – 沉积岩系中。矿体中发育矽卡岩, 但矽卡岩并不产在侵入岩接触带上。绿帘石、石榴石和矿石的稀土配分模式具有相似性, 均为轻稀土富集, 正铈异常, 基本上无铈异常, 暗示它们之间存在成因联系。石榴石稀土配分模式呈折线型, 具有明显的正铈异常, 石榴石流体包裹体中熔融包裹体、熔流包裹体和气液包裹体共存, 表明石榴石矽卡岩具有岩浆成因和热液成因的特征, 形成于晶体 + 熔体 + 流体三相共存的岩浆 – 热液过渡阶段。矿床地质特征、矽卡岩矿物和矿石稀土特征表明蒙库铁矿为矽卡岩型矿床。

关键词 矽卡岩; 稀土元素地球化学; 铁矿床; 成矿作用; 蒙库

中图法分类号 P588.312; P595; P618.31

* 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB411302)、国家自然科学基金项目(编号40672065)、“十一五”国家科技支撑计划重点项目(编号2006BAB07B02-01)和国土资源大调查项目(编号1212010561506)联合资助。

第一作者简介: 杨富全, 男, 1968年生, 博士, 研究员, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: fuquanyang@163.com

新疆阿尔泰山南缘是我国重要的有色、贵金属成矿带之一。在泥盆纪火山岩建造中发现了阿舍勒大型铜锌矿床、可可塔勒大型铅锌矿床、蒙库大型铁矿床、乔夏哈拉中型铁铜金矿床、铁木尔特中型铅锌矿床、阿巴宫中型铅锌矿床等,它们构成一个与海相火山作用有关的铁铜铅锌成矿系列(王京彬等,1998;王登红等,2002)。在下泥盆统康布铁堡组变质火山-沉积岩系中,发现了许多铁矿床(点),其中不少铁矿呈层状和似层状沿某一层位分布,矿体附近发育大量矽卡岩矿物。这些矽卡岩不是沿岩体接触带不规则状分布,而是沿层发育。尽管个别矿区有岩体出露,但在接触带上不发育矽卡岩型矿化。已发现的矿床有蒙库、阿巴宫、结别特、巴利尔斯、加尔巴斯岛等铁矿床,其中蒙库大型铁矿床是典型代表。蒙库铁矿床于1953年被发现,随后的50余年多家地质单位对其进行了普查及详查工作,目前探明铁储量1.1亿吨,全铁平均品位44%,远景储量超过2.1亿吨^①,成为新疆目前规模最大的铁矿,现由八一钢铁集团和紫金矿业分别开发。前人对蒙库、阿巴宫等铁矿进行过一些研究,但对于赋矿围岩、矿区出露的侵入岩、矽卡岩、矿石矿物的稀土元素地球化学研究十分薄弱,导致成矿物质来源、成矿作用的研究还缺乏有力证据。对于其成因长期存在分歧,有矽卡岩型、火山喷流沉积型、火山喷流沉积+叠加改造型、海相火山岩型、矿浆贯入之争(张建中等,1987;王京彬等,1998;王登红等,2002;仇仲学,2003;张振福,2003;Wang *et al.*, 2003;李嘉兴等,2003;胡兴平,2004;闫升好等,2005;万博和张连昌,2006;徐林刚等,2007)。

稀土元素作为具有相同或相近的电价和离子半径以及相似地球化学行为的元素组,其在岩浆作用体系中矿物或矿物-熔体之间的分配行为主要受晶体场控制,具有普遍一致的独特地球化学特征,因而,长期以来稀土元素成为探讨与岩浆作用有关的成岩成矿地质地球化学过程的示踪剂。如一些学者(赵一鸣等,1990;Chen *et al.*, 1992;韩松等,1993;季宏兵等,1997;赵斌等,1999;王莉娟等,2002;肖成东和刘学武,2002;凌其聪和刘丛强,2003;梁婷等,2007)通过对矽卡岩矿床和矽卡岩矿物的稀土元素地球化学进行研究,探讨成矿作用。近年来通过对古代火山成因块状硫化物和铁建造等化学沉积物的研究,表明其具有与现代海底热液系统相似的稀土元素地球化学特征(Lottermoser, 1989; Bau and Möller, 1993; Klein and Ladeira, 2002; Ma *et al.*, 2004),因此,应用稀土元素地球化学示踪古代热水流体成矿作用过程,为鉴别矿床成因等提供了强有力的约束,如丁振举等(2003)、徐九华等(2004)、闫升好等(2005)利用稀土元素地球化学特征探讨喷流沉积矿床的成因。

本文对蒙库铁矿的赋矿围岩角闪斜长变粒岩、角闪二长浅粒岩、斜长透辉角闪岩,矿区出露的片麻状斜长花岗岩、石榴石、绿帘石、磁铁矿、黄铁矿、石榴石磁铁矿矿物的稀土元素地球化学进行了系统研究,探讨这种特殊类型矽卡岩形成过程中的REE行为以及矿床成因。

1 区域地质背景

阿尔泰山带是由一系列大陆块体、岛弧和增生杂岩构成的增生型造山带,是中亚造山带的重要组成部分(Sengör *et al.*, 1993; Xiao *et al.*, 2004)。新疆阿尔泰山带被NW向断裂划分为北阿尔泰、中阿尔泰和南阿尔泰(图1)。北阿尔泰位于红山嘴-诺尔特断裂以北,最老地层为中-上泥盆统忙代恰群绿片岩,上泥盆统-下石炭统库马苏组为变质沉积岩,局部夹凝灰岩,下石炭统红山嘴组为火山熔岩、火山碎屑岩和陆源碎屑岩,夹灰岩透镜体。S型钾长花岗岩侵入到这些地层中。

中阿尔泰位于红山嘴断裂与阿巴宫断裂、巴塞断裂之间,主要为早古生代的变质岩系,出露地层主要有震旦纪至中奥陶世的巨厚陆源复理石建造(哈巴河群或喀纳斯群)、晚奥陶世的火山-磨拉石及陆源碎屑建造(东锡勒科组、白哈巴组),中-晚志留世变砂岩(库鲁木图组)。李天德等(1996)认为阿尔泰-青河一带大部分地层时代为元古宙。在阿尔泰市以东,发育低压柱石型和中压蓝晶石型巴洛克式热穹隆,其中心位于可可托海镇(Li *et al.*, 2003)。志留纪斜长花岗岩、黑云母花岗岩岩基出露于NW部,辉长岩分布在可可托海镇附近,片麻状英云闪长岩岩基分布在青河北部。泥盆纪片麻状斜长花岗岩,少量黑云母花岗岩、二云母花岗岩岩基分布于西部,辉长岩、辉长岩闪长岩岩株出露于东部。

南阿尔泰北以阿巴宫断裂为界,南以克兹加尔断裂为界与额尔齐斯构造带相邻。主要由泥盆纪火山-沉积岩系组成,局部出露石炭纪火山-沉积岩系。泥盆纪海相火山岩主要分布在NW向四个斜列的火山沉积盆地中,从NW至SE依次为阿舍勒盆地、冲乎尔盆地、克兰盆地和麦兹盆地。下泥盆统康布铁堡组为一套中酸性火山熔岩、火山碎屑岩、碎屑岩和少量基性火山岩,岩石发生不同程度的变质,部分变质为片麻岩、片岩、变粒岩,该组是铁、铜、铅、锌的主要赋矿地层。下-中泥盆统阿舍勒组仅出露于阿舍勒火山盆地,由轻变质中酸性火山碎屑岩、中酸性熔岩、细碧岩夹灰岩、凝灰岩、碧玉岩组成,该组是阿舍勒铜锌矿的重要赋矿地层。中泥盆统阿勒泰组为一套类复理石建造夹少量基性、酸性火山岩和硅质岩。泥盆纪侵入岩主要为闪长岩、斜长花岗岩、英云闪长岩,晚石炭-二叠纪后碰撞花岗岩分布广泛。近年来,发现了一些三叠纪和侏罗纪侵入体(王登红等,2002)。南阿尔泰岩石变形强烈,发育透入性片理、线理、紧闭褶皱(闫升好等,2006)。

阿尔泰山带于晚前寒武纪晚期到早古生代早期为稳定大陆边缘阶段,奥陶纪-志留纪哈萨克斯坦-准噶尔板块与西伯利亚板块之间发生分裂,形成古亚洲洋,并产生洋壳俯冲作用。泥盆纪-早石炭世古亚洲洋板块向北俯冲在西伯

^① 新疆地质矿产局第四地质大队. 2005. 新疆富蕴县蒙库铁矿床深部详查总体设计.

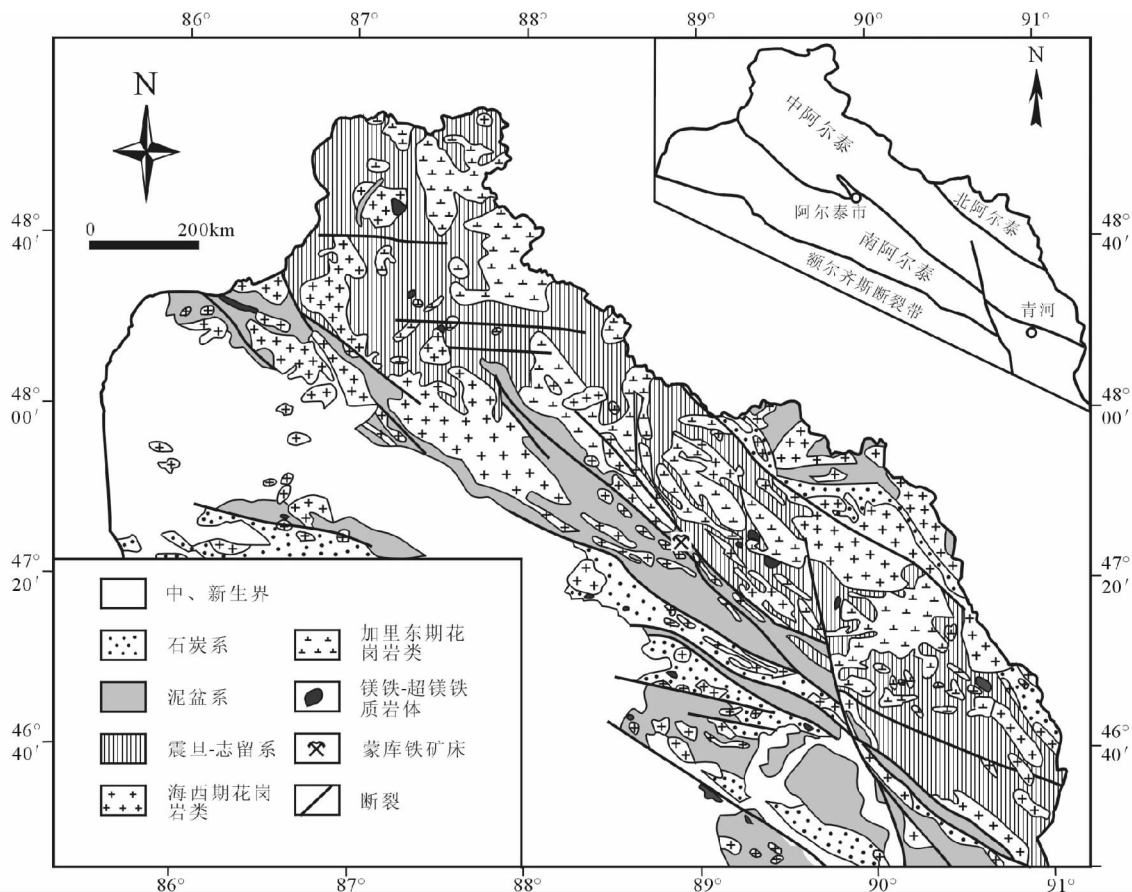


图1 新疆阿尔泰区域地质略图(据 Li *et al.*, 2003; 闫升好等, 2006; 童英等, 2006)

Fig. 1 Simplified regional geological map of Altay Mountains in Xinjiang (modified from Li *et al.*, 2003; Yan *et al.*, 2006; Tong *et al.*, 2006)

利亚板块之下,形成了南阿尔泰岛弧系。由于俯冲作用导致在西伯利亚板块南缘加里东的陆缘增生体上形成了一系列陆缘断陷盆地,并广泛发育康布铁堡组和阿尔泰组火山-沉积建造,同时也形成与火山作用有关的铁、铜、铅、锌矿床。早泥盆世到早石炭世,古亚洲洋板块向南俯冲到哈萨克斯坦-准噶尔板块之下,形成了准噶尔北缘陆源-海相火山岩系。中、晚石炭世,古亚洲洋逐渐收缩,西伯利亚板块和哈萨克斯坦-准噶尔板块发生碰撞造山作用。在碰撞期间形成了陆相火山喷发、花岗岩侵入和大型韧性剪切带和走滑断裂。晚石炭世末到二叠纪进入了后碰撞演化阶段,动力背景由洋陆俯冲体系转变为伸展构造环境,形成了与地幔作用有关的基性-超基性岩、碱性花岗岩,局部有早二叠世陆相火山喷发作用(牛贺才等, 2006)。中生代经历了亚洲大陆边缘演化阶段以及新生代陆内造山演化阶段(李锦铁和徐新, 2004)。

2 矿区地质特征

2.1 地层

蒙库铁矿床位于阿尔泰山南缘,属富蕴县管辖,据县城 NW

67km。大地构造上位于早泥盆世阿尔泰陆缘裂谷带北部的近(古)陆断陷火山沉积盆地内(王京彬, 1998),即麦兹古火山-沉积盆地的北西部麦兹复式向斜中。

矿区出露中上志留统松克木群、下泥盆统康布铁堡组和中泥盆统阿勒泰组(图 2)。松克木群原岩为一套浅海-滨海相碎屑沉积建造,经历了绿片岩、角闪岩相的区域变质作用,主要由黑云母片麻岩、石英黑云母片岩、黑云石英片岩夹斜长角闪岩组成。康布铁堡组厚度大于 1200m,为变质海相细碧质-角斑质-石英角斑质为主的火山沉积岩-正常沉积岩组合,可分为上下两个亚组。下亚组出露于矿区中部,分为三个岩性段,各岩性段之间多为渐变过渡关系。第一段由条带状不纯大理岩、透辉石大理岩组成,呈细小的窄带展布在矿区 NE 部及 SW 部。第二段以浅灰白色、灰-深灰色条带状角闪斜长变粒岩、磁铁变粒岩为主,夹斜长角闪片麻岩、黑云母片岩、大理岩及贫铁矿条带。第三段是区内主要赋矿层位,下部以黑云母角闪斜长片麻岩为主,夹角闪变粒岩、(角闪)磁铁变粒岩、黑云母变粒岩、黑云母(角闪)片岩和大理岩。中部以条带状角闪斜长变粒岩和大理岩为主,夹(黑云母)角闪斜长片麻岩、磁铁变粒岩、含斑角闪变粒岩、斜长角

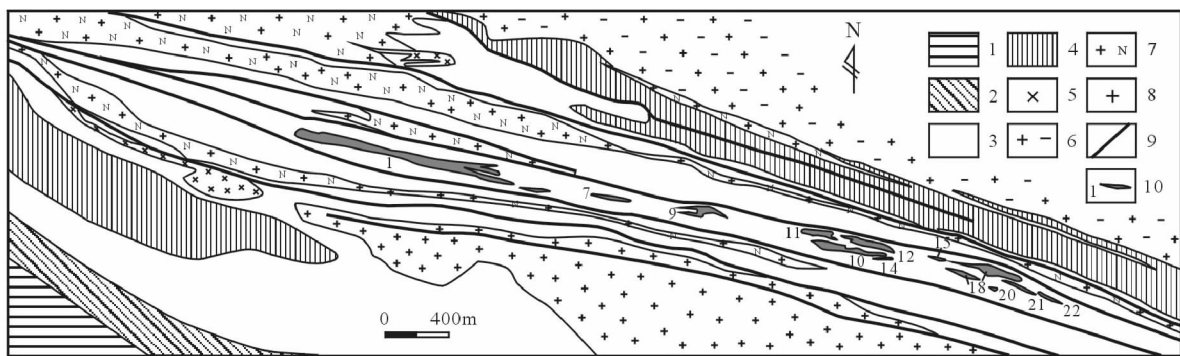


图2 蒙库铁矿矿区地质图(据新疆地质矿产勘探开发局第四地质大队,2005)

1-中泥盆统阿勒泰组变质砂岩、大理岩;2-下泥盆统康布铁堡上亚组变质凝灰质砂岩、变质砂岩、浅粒岩;3-下泥盆统康布铁堡下亚组大理岩、变质砂岩、角闪变粒岩、浅粒岩、片麻岩;4-上志留统松克木群片岩夹斜长角闪岩;5-斜长角闪岩脉;6-黑云母花岗岩;7-角闪斜长花岗岩;8-片麻状黑云斜长花岗岩;9-断层;10-铁矿体及编号

Fig.2 Geological map of the Mengku iron ore district (after No. 4 Geological Party of the Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development,)

闪岩和黑云母片岩。上部主要为变粒岩和角闪变粒岩,夹角闪二长浅粒岩、角闪斜长浅粒岩、角闪钾长浅粒岩、(黑云母)角闪斜长片麻岩、含斑角闪斜长片麻岩、斜长透辉角闪岩、(含斑)磁铁变粒岩、黑云母片岩和大理岩。

康布铁堡组上亚组主要分布于矿区的SW,下部岩性为变质凝灰质砂岩、浅粒岩、含砾砂岩三者互层。中部为变质含砾砂岩、长英质砂岩和泥质砂岩。上部为变质凝灰质砂岩、钙质石英长石砂岩、泥质粉砂岩、粉砂岩夹大理岩透镜体。阿勒泰组为浅海相复理石建造,岩石组合为变质含砾砂岩、钙质砂岩和变凝灰质砂岩互层,底部夹大理岩。

2.2 构造及岩浆岩

矿区褶皱和断裂发育,由NW-SE向展布的复式背斜和断裂组成,与区域构造线一致。褶皱构造为紧闭线型复式褶皱,形态复杂且多被岩体和断层破坏。铁木下尔滚向斜及蒙库背斜组成褶皱构造的主体,两者均为蒙库复向斜NE倒转翼的次级褶皱。矿区主要发育NW和NNW向断裂,这些断裂是区域上巴塞断裂的一部分或次级断裂,表现为强烈挤压破碎带。

岩浆活动比较强烈,主要分布于矿区的NE和SW,岩石类型主要为片麻状黑云母二长花岗岩、片麻状黑云斜长花岗岩,另有少量中性岩脉。矿区3个片麻状黑云斜长花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为404~378Ma(另文发表),为早中泥盆世岩浆活动的产物。矿区SE部的片麻状黑云斜长花岗岩具有似片麻状构造,磷片粒状变晶结构。主要矿物成分以斜长石为主,占70%~75%,其次为石英(20%~25%),少量黑云母(5%~10%)。岩石地球化学表明,岩体具有高硅($\text{SiO}_2 = 76.93\% \sim 78.63\%$)、富碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 4.64\% \sim 7.15\%$)、富钠($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 6$)、贫铁。 $\text{Al}_2\text{O}_3 = 12.05\% \sim$

12.68%, $A/NCK = 1.03 \sim 1.09$,属微过铝质。在AR-SiO₂图解上主要投影在碱性岩区(图略)。总稀土含量变化较大,变化于 $133.65 \times 10^{-6} \sim 249.81 \times 10^{-6}$, $\text{LREE}/\text{HREE} = 4.3 \sim 5.6$,稀土配分模式为轻稀土富集,重稀土相对亏损的右倾型,具有明显的铕负异常(另文发表)。

2.3 矽卡岩

蒙库铁矿床的矽卡岩发育,主要分布于矿体周围,或呈团块状分布于矿体中,其矿物组合为石榴石(钙铁石榴石为主,少量钙铝石榴石)、辉石(透辉石为主,含少量普通辉石)、角闪石(以阳起石为主)、绿帘石、绿泥石(徐林刚等,2007),属典型的钙质矽卡岩(赵一鸣等,1990)。矽卡岩在空间上有一定的分布规律,矿区由西向东出露的矽卡岩越来越多。1号矿体内和边部见少量石榴石和绿帘石等矽卡岩残留体,7号矿体附近见多层顺层分布的石榴石矽卡岩,再向东9,10,12,14和新18号矿体(包括16-19号)赋存于矽卡岩体中(图3)。这些矽卡岩不是沿岩体接触带不规则状分布,而是沿斜长角闪岩、角闪斜长变粒岩、角闪斜长浅粒岩、大理岩呈层状、似层状和透镜状分布,总体顺层,局部切层。采矿坑中可见石榴石和绿帘石逐渐交代角闪斜长变粒岩,部分交代大理岩,石英绿泥石磁铁矿脉和绿泥石逐渐交代石榴石、辉石和绿帘石。镜下普遍见绿帘石交代石榴石和辉石,绿泥石交代绿帘石。

石榴石分为两期,早期分布广泛,呈肉红色,粒度较细,一般在0.2mm左右,主要呈他形-半自形。晚期为脉状,分布局限,明显切穿早期石榴石,呈含石榴石石英脉、含石榴石方解石石英脉、含绿帘石石榴石石英脉。晚期石榴石为暗红色,粒度粗大,晶形较好,粒径可达2cm,环带结构发育。

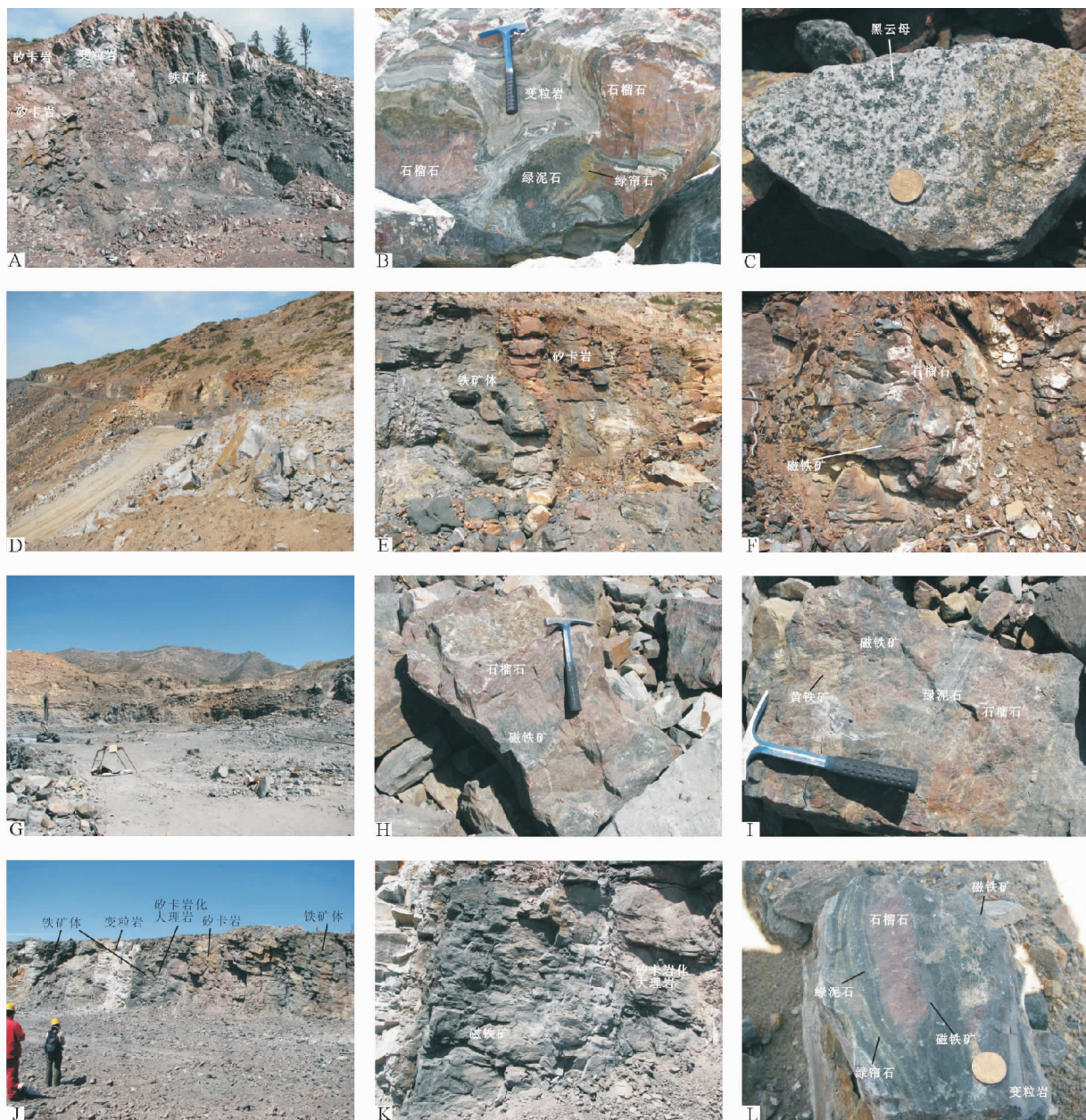


图3 蒙库铁矿床矿体及砂卡岩特征

A-9号矿体赋存于砂卡岩中；B-9号矿体中砂卡岩交代变粒岩，变质条带围绕石榴石砂卡岩分布；C-9号矿体中黑云母大理岩残留体；D-7号矿体景观；E-7号矿体赋存于砂卡岩中；F-7号矿体中石榴石磁铁矿矿石；G-1号矿体景观，围岩为变粒岩和浅粒岩；H-1号矿体中磁铁矿石榴石砂卡岩；I-1号矿体中黄铁矿磁铁矿化砂卡岩；J-新18号矿体，围岩为砂卡岩和变粒岩；K-新18号矿体中砂卡岩化大理岩；L-新18号矿体中磁铁矿砂卡岩交代变粒岩

Fig.3 Features of orebodies and skarn of Mengku iron deposit

3 矿床地质特征

蒙库铁矿区已控制矿化带EW长约5.5km、宽约400m，共发现了33个矿体，其中有4个盲矿体。1号、18号和盲3号规模较大。矿区西段1-6号矿体的赋矿围岩以变粒岩、角

闪斜长变粒岩、角闪黑云变粒岩、含斑微晶变粒岩、浅粒岩为主，规模较大的矿体的围岩主要为变粒岩，其次为角闪斜长片麻岩、黑云母片麻岩、大理岩。矿区东段7-22号矿体的近矿围岩为砂卡岩、角闪斜长变粒岩、大理岩。1号矿体是蒙库铁矿床最主要的工业矿体，地表长1560m，最大厚度103.2m，最小厚度2m，平均41.3m，最大延深达550m。其它矿体长

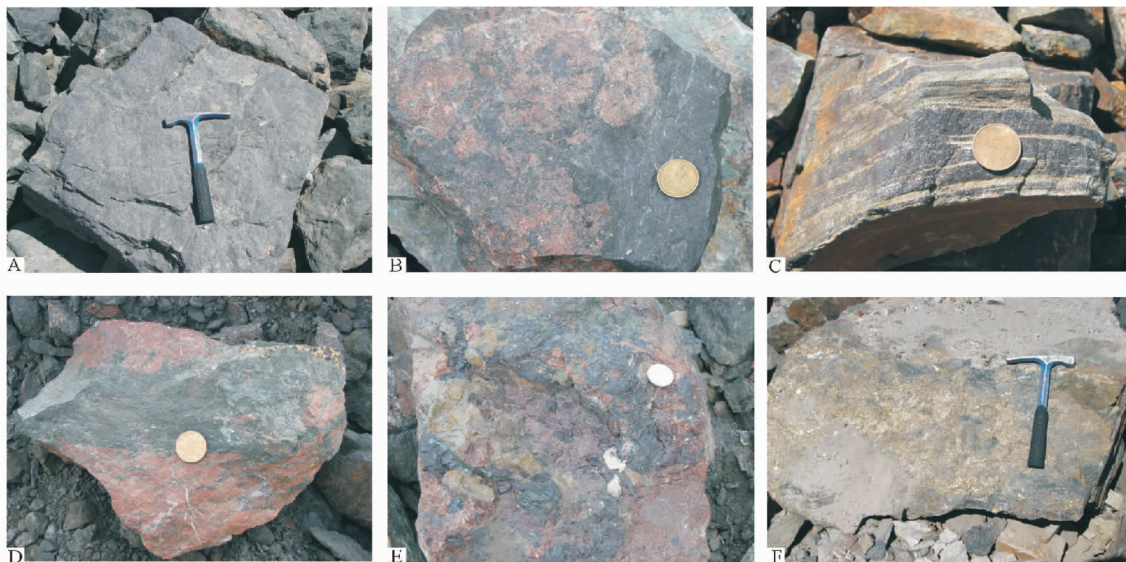


图4 蒙库铁矿床矿石构造

A-块状磁铁矿矿石; B-磁铁矿呈浸染状和脉状交代石榴石砂卡岩; C-磁铁矿呈条带状分布; D-磁铁矿呈脉状交代石榴石砂卡岩;
E-磁铁矿呈斑杂状分布于石榴石砂卡岩中; F-块状黄铁矿磁铁矿矿石

Fig. 4 Photographs of ore structures in the Mengku iron deposit

100~750m,厚1~94m,延深50~300m。矿体形态呈似层状、薄板状、扁豆状、透镜状、脉状及不规则状,在深部可见镰刀状不规则矿体。矿体具有膨大、收缩、分枝、复合、尖灭、再现。矿体总体产状与围岩产状一致,局部常见穿层现象,走向 $290^{\circ}\sim 300^{\circ}$,向SW或NE陡倾,倾角多数大于 70° 。

矿石类型可划分为石榴石磁铁矿型、钙铁辉石磁铁矿型、块状磁铁矿型、石英角闪磁铁矿型、角闪辉石磁铁矿型。矿石构造主要为块状、浸染状,其次为条带状、角砾状、斑杂状、脉状构造(图4)。矿石结构主要有粒状变晶结构、交代残余结构、变余结构和碎裂结构。矿石中主要金属矿物为磁铁矿,其次为磁赤铁矿,少量黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、赤铁矿、辉钼矿等。脉石矿物主要为透辉石、角闪石、长石和石榴石,其次为黑云母、石英、方解石、绿泥石、绿帘石、绢云母,少量方柱石、磷灰石、榍石等。

矿石平均品位TFe为24%~58%,多数在35%~48%之间, $\geq 50\%$ 的富矿约占1/4左右(胡兴平,2004),矿石中还伴生有铜,含量为0.001%~1.53%(李建国等,2006①)

围岩蚀变主要为矽卡岩化、硅化、方柱石化和绿泥石化。

4 样品及分析方法

本次在蒙库铁矿采集27件样品进行稀土分析,为进行对比研究,另有2件石榴石样品采自索尔库都克砂卡岩型铜钼矿的探槽中。蒙库铁矿样品主要采自矿区SE片麻状黑云斜长花岗岩、1号(原1号与6号矿体合并为1号)、7号、9号、10号和新18号矿体。薄片鉴定后选择新鲜和有代表性

的样品进行稀土元素地球化学分析。其中1件为片麻状黑云斜长花岗岩和1件片麻状二长花岗岩(1号矿体附近)、6件近矿围岩(角闪钾长浅粒岩、角闪斜长浅粒岩、角闪二长浅粒岩、角闪斜长变粒岩和斜长透辉角闪岩)、1件块状黄铁矿、4件磁铁矿矿石(块状磁铁矿、石榴石磁铁矿矿石、黄铁矿磁铁矿矿石),从砂卡岩中分离出3件绿帘石和11件石榴石单矿物样品。

石榴石和绿帘石单矿物样品由中国地质科学院地质研究所样品加工室先清洗,再粉碎,在双目镜下进行人工挑选,纯度达99%以上。将要测定的全岩样品先清洗、再粉碎、缩分。全岩和单矿物样品在玛瑙研钵中研磨至200目以下。稀土元素分析在国家地质实验测试中心测定,采用等离子质谱法(ICP-MS)分析,分析误差小于5%。

5 稀土元素分析结果及地球化学特征

29件岩石、矿石和单矿物稀土元素分析结果列于表1,同时表中还列出闫升好(2005)分析的3件样品。图5给出了样品球粒陨石标准化的稀土元素配分模式。这些样品的稀土元素地球化学特征如下:

花岗岩:1件片麻状黑云斜长花岗岩和1件片麻状二长花岗岩样品的稀土含量较高,变化不大,为 $172.5 \times 10^{-6} \sim 211.33 \times 10^{-6}$ 。LREE/HREE = 3.3~4.25, $(La/Yb)_N = 2.3$

① 李建国,蔡永彪,陈新杰等. 2006. 新疆富蕴县蒙库铁矿床1~9号矿体深部详查(续作)设计书.

表1 蒙库铁矿床岩石、矿石、矿物稀土元素成分分析(×10⁻⁶)

Table 1 REE contents of rocks, ores and minerals from Mengku Fe deposit(×10⁻⁶)

样号	M1-19	M1-25	M7-15	M9-18	M9-19	M9-22	M9-23	M9-32	M9-40-1	M9-44	M10-10	Mk-3	S01-1	S01-2	M9-10	M9-12
岩性	石榴石	石榴石	石榴石	石榴石	石榴石	石榴石	石榴石	石榴石	石榴石	石榴石	石榴石	石榴石	石榴石	石榴石	绿帘石	绿帘石
La	1.27	3.03	2.04	1.09	1.28	0.85	0.70	1.10	1.91	1.39	1.70	0.63	1.36	0.61	8.90	11.1
Ce	4.86	6.82	5.91	10.0	9.81	3.54	5.74	5.07	5.75	2.98	6.96	3.47	2.71	1.18	20.8	24.0
Pr	0.90	1.31	1.04	2.58	2.27	0.73	1.65	1.00	0.89	0.41	1.24	0.74	0.60	0.33	3.31	3.76
Nd	3.63	6.31	6.14	13.3	11.8	3.03	8.85	4.66	3.39	1.46	5.82	3.27	3.38	1.92	15.8	17.8
Sm	0.81	2.47	6.43	3.37	3.20	0.81	2.20	0.96	0.76	0.33	1.03	0.83	1.36	0.83	4.58	4.98
Eu	1.35	3.04	5.62	3.18	3.06	1.34	2.36	1.19	0.84	0.33	0.98	1.15	0.55	0.32	4.26	3.19
Gd	2.01	6.02	25.1	4.33	4.50	1.52	2.10	0.73	1.04	0.39	1.16	1.12	1.88	1.37	5.60	5.72
Tb	0.44	1.40	6.16	0.68	0.73	0.33	0.33	0.09	0.21	0.07	0.17	0.19	0.38	0.33	1.10	1.01
Dy	3.16	12.0	50.3	4.19	4.36	2.21	2.06	0.55	1.49	0.53	0.99	1.18	2.28	2.37	7.56	6.72
Ho	0.70	3.17	12.1	0.83	0.89	0.45	0.39	0.11	0.33	0.12	0.19	0.25	0.45	0.55	1.54	1.37
Er	1.84	10.8	35.1	2.26	2.46	1.17	1.02	0.30	0.91	0.33	0.55	0.6	1.18	1.65	4.21	3.86
Tm	0.22	1.69	4.50	0.31	0.34	0.15	0.13	0.05	0.12	0.05	0.07	0.08	0.16	0.24	0.55	0.51
Yb	1.13	10.8	24.7	1.86	2.14	0.83	0.76	0.27	0.62	0.29	0.46	0.44	0.98	1.46	3.17	3.06
Lu	0.13	1.33	2.56	0.26	0.31	0.10	0.10	0.05	0.07	0.04	0.06	0.05	0.14	0.22	0.48	0.45
Y	26.6	116	472	30.8	32.7	13.7	12.4	3.90	9.60	4.06	7.98	8.18	12.4	16.2	40.0	35.6
ΣREE	22.45	70.19	187.7	48.24	47.15	17.06	28.39	16.13	18.33	8.72	21.38	14.00	17.41	13.38	81.86	87.53
LR/HR	1.33	0.49	0.17	2.28	2.00	1.52	3.12	6.50	2.83	3.79	4.86	2.58	1.34	0.63	2.38	2.86
(La/Sm)N	1.01	0.79	0.2	0.21	0.26	0.68	0.2	0.74	1.62	2.71	1.07	0.49	0.65	0.47	1.25	1.44
(Gd/Yb)N	1.47	0.46	0.84	1.93	1.74	1.52	2.29	2.23	1.39	1.11	2.08	2.10	1.59	0.78	1.46	1.55
(La/Yb)N	0.81	0.2	0.06	0.42	0.43	0.74	0.66	2.92	2.21	3.43	2.65	1.03	1	0.3	2.01	2.6
δEu	3.09	2.31	1.18	2.54	2.46	3.64	3.31	4.18	2.89	2.8	2.73	3.65	1.05	0.91	2.57	1.82
δCe	1.07	0.84	0.99	1.03	1.09	1.02	0.92	1.09	1.08	0.96	1.12	1.08	0.73	0.64	0.94	0.91
样号	M9-38	M1-27	Mk-1	M7-2	M10-8	M18-11	M7-18	Mk-2	M1-8	M1-16	M7-10	M9-1	M10-1	M10-2	M1-1	My-1
岩性	绿帘石	磁铁矿 磁铁矿	块状磁 铁矿	块状磁 铁矿 磁铁矿	石榴石 磁铁矿	黄铁矿 磁铁矿	块状黄 铁矿	块状黄 铁矿	角闪钾 长浅 粒岩	角闪斜 长变 粒岩	角闪二 长浅 粒岩	斜长透 辉角 闪岩	角闪斜 长变 粒岩	角闪斜 长浅 粒岩	二长花 岗岩	斜长花 岗岩
La	43.5	1.38	2.18	49.1	3.77	6.81	44.9	21.6	19.4	29.6	23.6	8.25	24.0	30.4	23.2	35.4
Ce	95.3	3.11	4.41	103	7.85	12.00	82.3	30.90	44.6	59.1	54.6	19.3	47.9	72.8	54.30	78.20
Pr	13.1	0.57	0.69	13.4	1.49	1.51	11.4	2.91	6.56	8.39	7.38	3.15	6.81	9.72	8.40	9.53
Nd	53.1	2.15	3.59	54.0	8.43	5.62	48.3	8.86	27.3	32.8	30.5	15.0	28.6	37.2	35.7	38.1
Sm	12.1	0.59	1.22	11.3	3.33	1.04	10.8	1.31	7.75	6.97	7.74	4.21	6.59	7.68	9.06	8.63
Eu	4.78	0.36	0.73	5.83	2.13	0.43	9.70	1.18	2.84	1.97	2.62	2.08	1.73	0.76	1.89	1.25
Gd	11.3	0.62	1.42	9.06	4.45	0.90	8.70	1.64	9.28	6.57	8.11	4.64	6.64	6.82	8.88	8.97
Tb	1.89	0.12	0.24	1.06	0.94	0.11	0.92	0.21	2.05	1.11	1.46	0.81	1.09	1.15	1.61	1.66
Dy	12.8	0.66	1.5	5.77	6.35	0.67	4.69	1.15	14.6	7.58	9.43	5.34	7.45	8.24	10.9	10.8
Ho	2.57	0.14	0.33	0.94	1.28	0.13	0.74	0.2	3.25	1.58	1.89	1.11	1.55	1.77	2.29	2.33
Er	7.45	0.41	1.01	2.48	3.58	0.39	1.74	0.5	9.80	4.71	5.36	3.14	4.58	5.78	6.97	7.28
Tm	1.03	0.08	0.14	0.33	0.49	0.06	0.20	0.07	1.42	0.72	0.79	0.47	0.67	0.94	1.09	1.05
Yb	6.50	0.47	0.86	2.16	2.90	0.37	1.22	0.49	8.34	4.68	4.96	2.88	4.42	6.41	7.11	7.05
Lu	0.98	0.09	0.12	0.34	0.39	0.06	0.18	0.08	1.17	0.74	0.73	0.45	0.67	1.02	1.10	1.08
Y	62.9	4.12	9.75	22.2	36.5	3.83	17.7	6.86	80.4	37.1	38.1	26.6	36.2	44.9	55.0	73.5
ΣREE	266.4	10.75	18.44	258.77	47.38	30.1	225.79	71.10	158.36	166.52	159.17	70.83	142.7	190.69	172.5	211.33
LR/HR	4.98	3.15	2.28	10.69	1.32	10.19	11.28	15.38	2.17	5.01	3.86	2.76	4.27	4.93	3.3	4.25
(La/Sm)N	2.32	1.51	1.15	2.8	0.73	1.23	2.68	10.65	1.62	2.74	1.97	1.26	2.35	2.56	1.7	2.65
(Gd/Yb)N	1.44	1.09	1.37	3.47	1.27	2.01	5.90	2.77	0.92	1.16	1.35	1.33	1.24	0.88	1.03	1.05
(La/Yb)N	4.8	2.11	1.82	16.3	0.93	13.18	26.39	31.65	1.67	4.54	3.41	2.05	3.9	3.4	2.3	3.6
δEu	1.23	1.81	1.69	1.7	1.69	1.33	2.96	2.46	1.02	0.88	1	1.43	0.79	0.31	0.6	0.43
δCe	0.97	0.86	0.88	0.97	0.81	0.88	0.87	0.83	0.97	0.91	1.01	0.93	0.91	1.03	0.95	1.02

注: S01-1, S01-2 采自索尔库都克矿床; Mk-1, Mk-2, Mk-3 据闫升好等, 2005; 其他为本文资料, 样号中的 M1、M7、M9、M10、M18 表示采自 1 号、7 号、9 号和新 18 号矿体

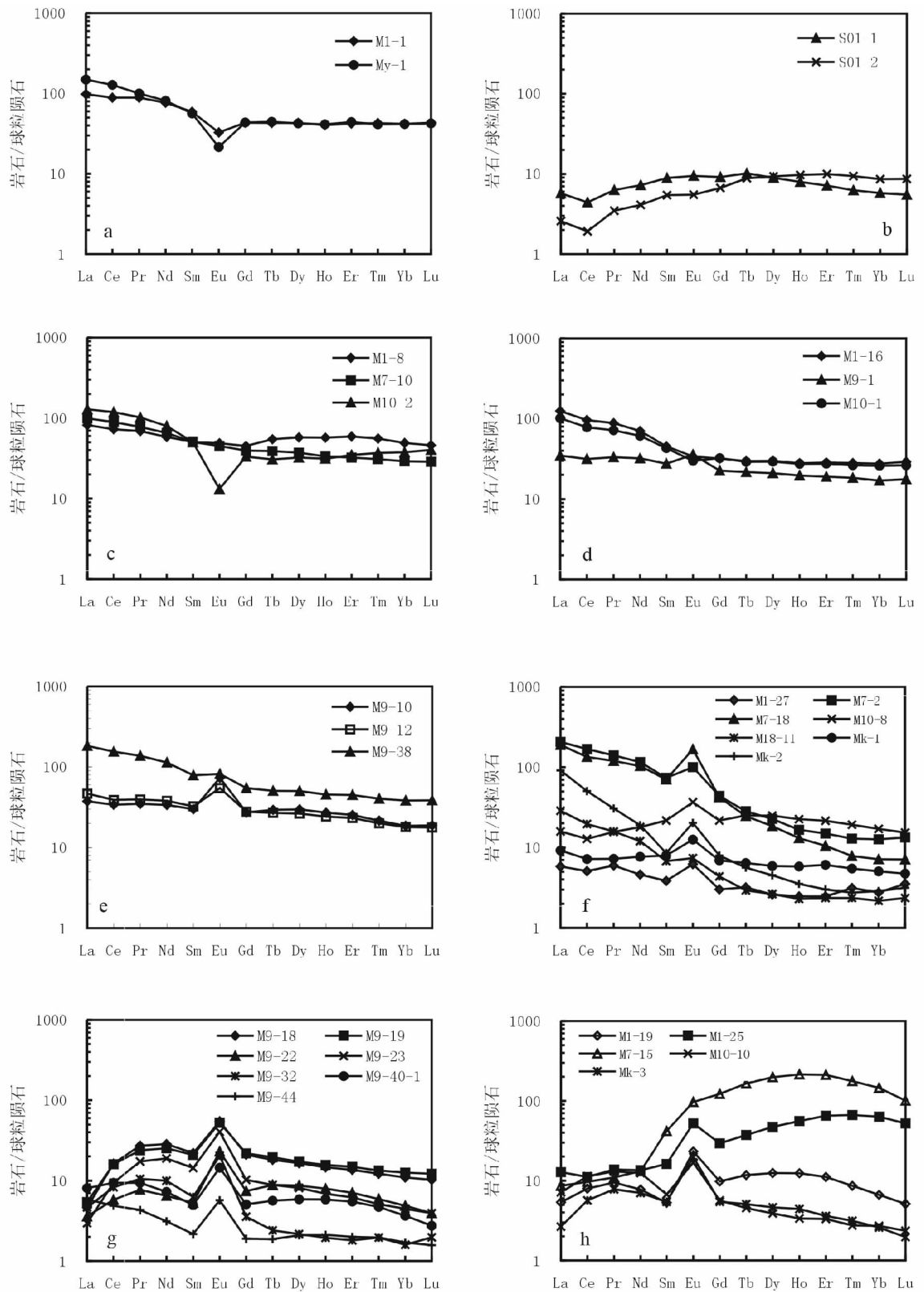


图5 蒙库铁矿床岩石、矿石及矿物的稀土元素配分模式

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns of rocks, ores and minerals from Mengku Fe deposit

~3.6, 表明轻重稀土元素之间发生了较明显的分异作用, 轻稀土元素相对富集。 $(La/Sm)_N = 1.7 \sim 2.65$, $(Gd/Yb)_N = 1.03 \sim 1.05$, 显示轻稀土元素组内部有分异作用, 而重稀土元素组内部基本上没有发生分异。 $\delta Eu = 0.43 \sim 0.6$, 具有中等负铈异常。 $\delta Ce = 0.95 \sim 1.02$, 基本无铈异常。 稀土元素配分模式(图 5a)为轻稀土富集, 重稀土相对亏损的右倾型, 具有左陡右缓, 铈负异常明显的特征。 2 件样品稀土元素配分模式相似, 反映它们具有相同的源区性质或为同源岩浆演化的产物(Yang *et al.*, 2007)。

索尔库都克矽卡岩型铜铅矿床: 2 件矿体围岩石榴石单矿物的稀土总量较低, 变化于 $13.38 \times 10^{-6} \sim 17.41 \times 10^{-6}$ 。 $LREE/HREE = 0.63 \sim 1.34$, $(La/Yb)_N = 0.3 \sim 1$, 表明轻重稀土元素之间分异作用不明显。 $(La/Sm)_N = 0.47 \sim 0.65$, $(Gd/Yb)_N = 0.78 \sim 1.59$, 显示轻、重稀土元素组内部有一定分异作用。 $\delta Eu = 0.91 \sim 1.05$, 基本无铈异常。 $\delta Ce = 0.64 \sim 0.73$, 具有中等负铈异常。 稀土元素配分模式(图 5b)显示曲线弧形向上弯曲, 具有明显的铈负异常。

浅粒岩: 3 件样品分别是角闪钾长浅粒岩、角闪二长浅粒岩和角闪斜长浅粒岩, 其稀土元素总量较高, 变化于 $158.36 \times 10^{-6} \sim 190.69 \times 10^{-6}$ 。 $LREE/HREE = 2.17 \sim 4.93$, $(La/Yb)_N = 1.67 \sim 3.41$, 表明轻重稀土元素之间发生了分异作用, 轻稀土元素相对富集。 $(La/Sm)_N = 1.62 \sim 2.56$, $(Gd/Yb)_N = 0.88 \sim 1.35$, 表明轻稀土元素组内部发生一定程度的分异作用, 而重稀土元素组内部基本上未发生分异。 角闪钾长浅粒岩和角闪二长浅粒岩的 $\delta Eu = 1 \sim 1.02$, $\delta Ce = 0.97 \sim 1.01$, 无铈和铈异常, 稀土元素配分模式为轻稀土相对富集的右倾型(图 5c)。 角闪斜长浅粒岩的 $\delta Eu = 0.31$, 具有强负铈异常, 稀土配分曲线呈 V 字型, 铈负异常明显, 其形态与片麻状花岗岩类似(图 5a)。

变粒岩和角闪岩: 2 件角闪斜长变粒岩的总稀土含量变化于 $142.7 \times 10^{-6} \sim 166.52 \times 10^{-6}$, 稀土配分模式特点是轻稀土相对富集的右倾型 [$LREE/HREE = 4.27 \sim 5.01$; $(La/Yb)_N = 3.9 \sim 4.54$], 左陡倾 [$(La/Sm)_N = 2.35 \sim 2.74$], 而右平缓 [$(Gd/Yb)_N = 1.16 \sim 1.24$], 具有弱负铈异常($\delta Eu = 0.79 \sim 0.88$)。 1 件斜长透辉角闪岩的稀土元素总量较低, 为 70.83×10^{-6} , 稀土元素配分模式不同于角闪斜长变粒岩和浅粒岩, 具有轻稀土略富集, [$LREE/HREE = 2.76$, $(La/Yb)_N = 2.05$], 轻、重稀土元素组内部无分异作用的平坦曲线, 无铈异常, 但具有明显的正铈异常($\delta Eu = 1.43$) (图 5d)。

绿帘石: 3 件绿帘石样品总稀土元素含量变化较大, 为 $81.86 \times 10^{-6} \sim 266.4 \times 10^{-6}$ 。 稀土元素配分模式(图 5e)类似于斜长透辉角闪岩(图 5d), 显示轻稀土相对富集 [$LREE/HREE = 2.38 \sim 4.98$; $(La/Yb)_N = 2.01 \sim 4.8$], 重稀土相对平坦的右倾特征 [$(La/Sm)_N = 1.25 \sim 2.32$, $(Gd/Yb)_N = 1.44 \sim 1.55$], 具有强的正铈异常($\delta Eu = 1.23 \sim 2.57$), 基本无铈异常。

矿石: 3 件块状磁铁矿矿石、2 件块状黄铁矿、1 件石榴石磁铁矿矿石和 1 件黄铁矿磁铁矿矿石的稀土元素总量变化较大, 除块状磁铁矿矿石(M7-2)和块状黄铁矿(M7-18)稀土元素总量较高($225.79 \times 10^{-6} \sim 258.77 \times 10^{-6}$)外, 其它样品稀土元素总量较低($10.75 \times 10^{-6} \sim 71.10 \times 10^{-6}$)。 $LREE/HREE = 1.32 \sim 15.38$, $(La/Yb)_N = 0.93 \sim 31.65$, 其中 1 件块状磁铁矿矿石、1 件黄铁矿磁铁矿矿石和 2 件块状黄铁矿样品轻重稀土分异程度高 [$(La/Yb)_N = 13.18 \sim 31.65$]。 在稀土配分模式上(图 5f), 除石榴石磁铁矿矿石(M10-8)略有差别外, 其它样品具有十分相似的稀土配分模式。 稀土配分模式为轻稀土相对富集, 重稀土相对亏损的右倾型, 轻稀土和重稀土之间有明显的分异作用 [$(La/Sm)_N = 0.73 \sim 10.65$, $(Gd/Yb)_N = 1.09 \sim 5.90$]。 7 件样品均为强正铈异常($\delta Eu = 1.33 \sim 2.96$), 多数样品具有弱负铈异常($\delta Ce = 0.81 \sim 0.88$)。

石榴石: 9 号矿体 7 件石榴石的稀土元素总量较低, 变化于 $8.72 \times 10^{-6} \sim 48.24 \times 10^{-6}$, 平均为 26.29×10^{-6} 。 $LREE/HREE = 1.52 \sim 6.50$, $(La/Yb)_N = 0.42 \sim 3.43$, 表明轻重稀土元素之间发生了分异作用, 部分样品轻稀土元素相对富集。 $(La/Sm)_N = 0.2 \sim 2.71$, $(Gd/Yb)_N = 1.11 \sim 2.29$, 表明轻、重稀土元素组内部发生一定程度的分异作用。 7 件样品基本上无铈异常($\delta Ce = 0.92 \sim 1.09$), 但具有强的正铈异常($\delta Eu = 2.46 \sim 3.64$)。 稀土配分模式上(图 5g), 所有样品具有十分相似的稀土配分模式, 呈折线型分布模式, 轻稀土呈现向上弧形弯曲, 在 Eu 处出现峰, 多数重稀土曲线平滑向右倾斜, 少数略向上弧形弯曲。

其它矿体中采集了 5 件石榴石样品, 其稀土总量变化较大, 除 1 件样品达到 187.7×10^{-6} 外, 其他样品介于 $14 \times 10^{-6} \sim 70.19 \times 10^{-6}$ 。 除 M1-25 具有弱的铈异常外($\delta Ce = 0.84$), 其它样品基本无铈异常($\delta Ce = 0.99 \sim 1.12$)。 M7-15 具有弱的正铈异常($\delta Eu = 1.18$), 其它 4 件样品具有强的正铈异常($\delta Eu = 2.31 \sim 3.65$)。 M7-15 和 M1-25 稀土配分模式(图 5h)显示, 重稀土相对富集的左倾型 [$LREE/HREE = 0.17 \sim 0.49$; $(La/Yb)_N = 0.06 \sim 0.2$], 其它样品的稀土配分模式与 9 号矿体的石榴石类似。

6 讨论

6.1 矽卡岩、矿石稀土模式的成因

矿区的绿帘石是矽卡岩矿物之一, 其稀土特征和配分模式类似于斜长透辉角闪岩, 但铈正异常更加明显, 这与野外见到的绿帘石交代斜长透辉角闪岩的事实相吻合, 表明绿帘石与斜长透辉角闪岩有密切的成因联系。 绿帘石与矿区花岗岩的稀土配分模式相比, 除均为右倾, 轻稀土轻微富集外, 其差别较大, 前者为正铈异常, 后者为负铈异常。

尽管采自不同矿体的磁铁矿矿石、块状黄铁矿、石榴石磁铁矿矿石和黄铁矿磁铁矿矿石的稀土元素总量变化较大, 但它

们的稀土特征相近,具有一致的钕富集,稀土元素配分模式曲线一致,表明它们具有共同的来源和相似的成因机制(Frietsch and Perdahl, 1995)。稀土元素特征暗示矿石沉淀过程中稀土元素没有发生明显的分异,矿石中稀土元素特征可代表初始成矿流体中稀土元素特征(杨耀民等, 2004)。尽管前人认为矿床的形成经历了火山喷流沉积和岩浆热液叠加改造作用,但从稀土元素特征上并没有反映出这两种截然不同的成矿作用,这些矿石是从同一种具有强烈钕富集的成矿流体中结晶的,可能不存在多种成矿作用叠加成矿。不同矿石类型的稀土元素特征与采自不同矿体、不同粒度的石榴石稀土特征相比,除二者均显示正钕异常外,轻稀土部分存在较大差别,石榴石以折线型稀土配分模式为特征,其原因是由其矿物晶体化学结构所决定。二者的稀土总量均较低,石榴石除 1 件样品稀土元素总量达到 187.7×10^{-6} , 其它样品稀土元素总量为 $8.72 \times 10^{-6} \sim 70.19 \times 10^{-6}$ 。矿石中除 1 件块状黄铁矿和 1 件块状磁铁矿的稀土总量较高外($225.79 \times 10^{-6} \sim 258.77 \times 10^{-6}$), 其它样品较低($10.75 \times 10^{-6} \sim 71.10 \times 10^{-6}$)。

9 号矿体的石榴石可分成两期,早期粒度较细,呈块状,晚期为脉状,粒度粗大,晶形较好。M9-18 和 M9-19 分别为晚期的绿泥石石榴石石英脉和含绿帘石榴石石英脉,其它 5 件样品为早期的石榴石,除晚期石榴石稀土总量较高外,其稀土元素配分模式(图 5g)相似,表明形成后者的流体是由前者演化而成,两者具有同源性。

总体上看,斜长透辉角闪岩、绿帘石、不同期次的石榴石和矿石的稀土配分模式具有相似性,均为右倾,正钕异常($\delta Eu = 1.23 \sim 3.65$),基本上无铈异常(部分矿石具有很弱的负钕异常, $\delta Ce = 0.81 \sim 0.86$),差别在于轻、重稀土元素组内部分馏程度不同,暗示它们之间存在成因联系。这种稀土配分模式与内蒙黄岗梁铁锡矿的早阶段石榴石相似,肖成东和刘学武(2002)认为后者的石榴石是岩浆成因。蒙库矿区石榴石稀土配分模式与安徽冬瓜山层控夕卡岩型铜(金)矿床石榴石稀土配分模式不同,后者为轻稀土轻微富集的右倾型,具有明显的负钕异常,凌其聪和刘丛强(2003)认为冬瓜山矿区的石榴石为岩浆热液交代成因。蒙库矿区石榴石稀土配分模式与索尔库都克铜钼矿床石榴石明显不同,后者表现为向上弧形弯曲,无钕异常和具有明显的负铈异常,表明二者石榴石的成因及成矿环境明显不同。

接触交代成因矽卡岩全岩的 REE 分布模式主要受到岩体、碳酸盐地层及流体中 REE 丰度和分配行为控制,与石榴石单矿物中的 REE 分布特点显著不同,所以交代成因矽卡岩中 REE 分布几乎完全承袭了岩体中 REE 的分布模式。矽卡岩稀土配分模式与该区岩体的相似常被认为是交代成因的证据(赵斌等, 1999)。蒙库铁矿矽卡岩矿物和矿石的稀土配分模式与矿区花岗岩有较大差别,表明它们不是接触交代成因,这与矽卡岩不产于岩体接触带,而是呈层状顺层产出的事实相符。

Y 和 Ho 两个元素具有相同的离子电价,其 8 次配位的

离子半径也几乎完全相同。因此这两个元素在许多地球化学环境中具有相似的化学行为。Bau and Dulski (1996) 认为 Y/Ho 值在不同类型火成岩、硅酸盐碎屑沉积岩及球粒陨石中没有明显的变化,球粒陨石中 Y/Ho 为 28 (Anders and Greves, 1989), 但在水溶液体系中的化学行为则发生分异。蒙库铁石榴石、绿帘石和矿石的 Y/Ho = 23.6 ~ 42, 大多数变化于 26 ~ 36 之间,接近陨石的比值,表明它们主要为岩浆成因,少数具有热液成因特征,与内蒙黄岗梁石榴石成因相同(肖成东和刘学武, 2002)。

Bau and Dulski (1995) 在对德国 Tannenboden 矿床和 Beihilfe 矿床中萤石和方解石的稀土元素地球化学行为进行研究后认为,同源脉石矿物的 Y/Ho-La/Ho 大体呈水平分布。尽管蒙库铁矿采自不同矿体、不同类型矿石、石榴石和绿帘石样品的稀土元素特征及配分模式有一定差别,但在 Y/Ho-La/Ho 图解(图 6)上,呈现水平分布,在稀土元素变异图(图 7)上,这些样品具有明显的相关性,表明矿石和矽卡岩矿物具有同源性,即具有明显的成因联系。

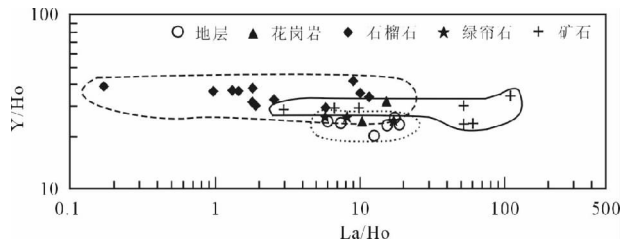


图 6 蒙库铁矿床岩石、矿石及矿物的 Y/Ho-La/Ho 图
Fig. 6 Y/Ho-La/Ho diagram of rocks, ores and minerals from Mengku Fe deposit

赵斌等(1999)对长江中下游分布的矽卡岩稀土特征进行了详细研究,认为岩浆成因矽卡岩绝大多数为富集 LREE 的折线型分布模式,同时 REE 的分布相当均匀,其配分模式在大范围内基本保持一致,并受石榴石的 REE 分布模式控制。蒙库矿区不同矿体 12 件石榴石稀土配分模式相似,均为富集 LREE 的折线型,与长江中下游狮子山、伏牛山、西狮子山和胡村 Cu(Au)矿床矽卡岩的稀土配分模式一致,赵斌等(1999)提出这些矽卡岩为岩浆成因矽卡岩,是矽卡岩与岩浆基本达到反应平衡条件下形成的。

岩浆成因矽卡岩以出现熔融包裹体和熔流包裹体为特征。蒙库铁矿矽卡岩矿物中发现了大量的熔融包裹体和少量熔流包裹体(另文发表),如 M1-25 石榴石中硅酸盐熔融包裹体和纯气体包裹体共存, M7-15 石榴石中硅酸盐熔融包裹体、纯气体包裹体和气液两相包裹体三者共存, M9-13 石榴石中硅酸盐熔融包裹体、熔流包裹体、纯气体包裹体和气液两相包裹体四者共存, M10-10 石榴石中硅酸盐熔融包裹体、气体包裹体、气液两相包裹体和含子矿物的多相包裹体四者共存。M18-3 石榴石中硅酸盐熔融包裹体、气液两相包裹体、含子矿物的多相包裹体和含硅酸盐矿物的多相包裹体五

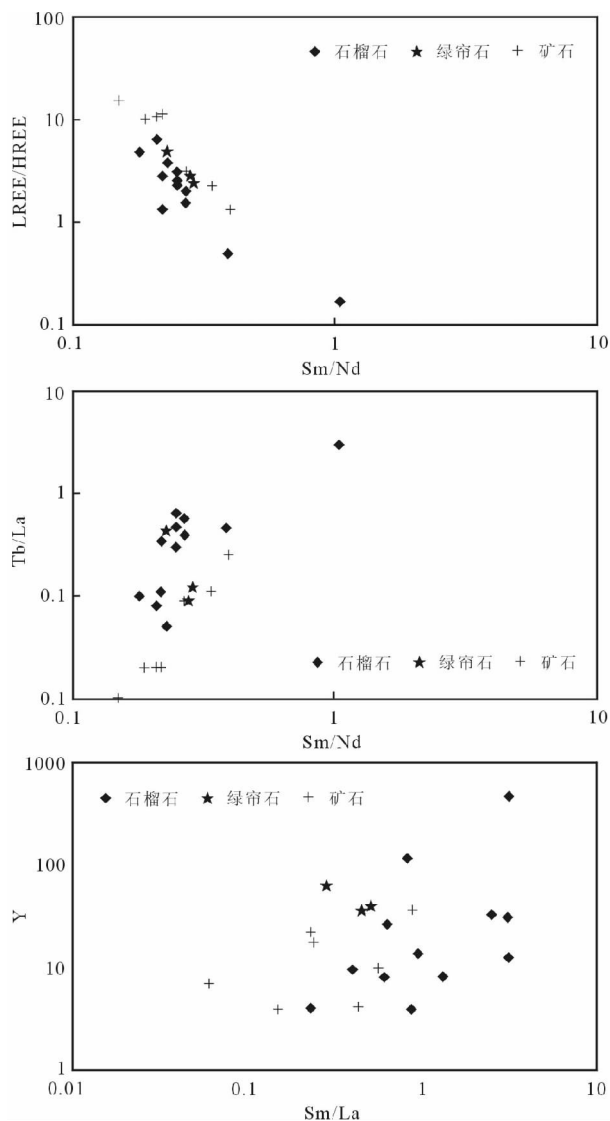


图7 蒙库铁矿床矿石及矿物 REE 变异图
Fig.7 Variation diagram of REE in ores and minerals from Mengku Fe deposit

者共存。在绿帘石中也见到了硅酸盐熔融包裹体和气液两相包裹体共存现象。矿物中熔融包裹体和气液两相包裹体共存是岩浆-热液过渡性质矿床的显著标志之一(林新多, 1999)。上述特征表明蒙库铁矿的矽卡岩和铁矿具有岩浆成因和岩浆热液成因的特征。

6.2 矽卡岩和矿石正铕异常的形成与成矿热液温度及成矿环境

对流体正 Eu 异常形成机理目前存在分歧,有长石斑晶/流体离子交换反应、流体迁移过程中颗粒或岩石对 Eu^{2+} 离子相对弱的吸附、吸附与络合的复合作用等多种解释(Bau, 1991; Klinkhammer et al., 1994; Hass et al., 1995)。这些形

成机制的共同特点是 Eu 以二价态离子出现作为前提,较高的温度是 Eu^{2+} 离子在流体中以主要形式出现的重要条件,因此温度条件是影响流体是否出现正铕异常的重要条件(丁振举等,2003)。蒙库铁矿矽卡岩矿物和矿石均出现强的正铕异常,表明其形成温度较高。这与流体包裹体测温结果一致,石榴石流体包裹体均一温度变化较大,熔融包裹体均一温度高达 1100℃,气液两相包裹体均一温度介于 200℃ ~ >550℃,主要集中在 220℃ ~ 270℃ 和 330℃ ~ 490℃;透辉石流体包裹体均一温度变化于 241℃ ~ 490℃,在 325℃ 和 445℃ 出现峰值;绿帘石流体包裹体均一温度变化于 200℃ ~ 351℃。

Ce 和 Eu 异常可反映成岩环境的氧逸度(肖成东和刘学武,2002),绿帘石、石榴石和矿石具有强的正铕异常,基本上无铈异常,表明成矿环境为氧化环境,早期石榴石和晚期石榴石稀土特征相似,暗示其形成时环境没有大的变化。总之蒙库矿区矽卡岩和矿石是由一种高温,铈强烈富集的流体在氧化环境下形成的。

6.3 矽卡岩、矿石流体来源及对成矿的指示

Ce 异常的产生主要与其在氧化环境下以 Ce^{4+} 形式出现有关。丁振举等(2003)认为矿石中 Ce 的相对亏损,是成矿热液 Ce 相对亏损的反映,成矿热液的 Ce 相对亏损应与海水的加入有关,同时从海水正常沉淀出的物质也不会发育 Eu 的正异常。蒙库铁矿除少数矿石具有弱负铈异常外,其它矿石、绿帘石和石榴石无铈异常,而具有明显的正铕异常,表明形成它们的流体不可能以海水为主。前文已分析,矽卡岩矿物和矿石的稀土特征及矽卡岩矿物中发现大量熔融包裹体、熔流包裹体和气液包裹体,表明形成矽卡岩和矿石的流体主要来自岩浆,少数来自岩浆热液。

石英方解石脉是成矿最晚阶段的产物,徐林刚等(2007)对石英和方解石进行了氢和氧同位素测定, $\delta\text{D} = -110\text{‰} \sim -84\text{‰}$, $\delta\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = -4.3\text{‰} \sim -2.18\text{‰}$,在 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 图解中,投点落在岩浆水与大气降水之间,表明成矿最晚期成矿流体中有较多的大气降水参与。从石榴石矽卡岩、绿帘石矽卡岩、矿石到成矿最晚期的石英方解石脉,成矿流体来源由岩浆,到岩浆热液再到大气降水。

蒙库铁矿呈似层状或透镜状赋存于下泥盆统康布铁堡组变质火山-沉积岩系中,矿体附近发育矽卡岩,但矿体并不产在侵入岩接触带,其矿床成因机制一直存在很大争论。有海相火山岩型、火山喷流沉积型(VMS)、火山喷流沉积+热液改造型等(张建中等,1987;王京彬等,1998;王登红等,2002;李嘉兴等,2003; Wang et al., 2003; 仇仲学,2003; 胡兴平,2004; 闫升好等,2005)。本次系统研究了岩体、围岩、矽卡岩矿物和矿石的稀土元素特征,不同矿体、不同类型的矿石样品显示出十分相似的稀土配分模式,表明它们具有相同的成因,不同成矿作用叠加成矿现象并不明显。矿石与绿帘石的稀土配分模式相似,它们继承了石榴石正铕异常的特

征。通过上文分析,石榴石具有明显的岩浆成因和岩浆热液成因的特征,因此蒙库铁矿床的类型应属矽卡岩型矿床。

7 结论

(1) 斜长透辉角闪岩、绿帘石、石榴石和矿石的稀土配分模式具有相似性,均为右倾,正铕异常,基本上无铈异常(部分矿石具有很弱的负铕异常, $\delta Ce = 0.81 \sim 0.86$),差别在于轻、重稀土元素组内部分馏程度不同,暗示它们之间存在成因联系。

(2) 采自不同矿体、不同类型的矿石样品显示出十分相似的稀土配分模式,为轻稀土相对富集,重稀土相对亏损的右倾型,具有强的正铕异常,表明它们具有相同的成因,不具有多期成矿作用叠加成矿特征。

(3) 石榴石稀土和流体包裹体特征表明,石榴石矽卡岩具有明显的岩浆成因和岩浆热液成因的双重特征,形成于晶体+熔体+流体三相共存的岩浆-热液过渡阶段。从石榴石矽卡岩、绿帘石矽卡岩、矿石到成矿最晚期的石英方解石脉,成矿流体来源由岩浆,到岩浆热液再到大气降水。矽卡岩和矿石是由一种高温,铕强烈富集的流体在氧化环境下形成的。

致谢 参加野外工作的还有矿产资源研究所闫升好研究员,野外工作中得到新疆地质矿产勘探开发局第四地质大队杨文平总工、李建国工程师、查小玲工程师的大力支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

References

Anders E and Greves N. 1989. Abundances of the elements; Meteoritic and solar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53:197–214

Bau M. 1991. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and significance of the oxidation state of europium. *Chemical Geology*, 93: 219–230

Bau M and Dulski P. 1995. Comparative study of yttrium and rare earth-element behaviors in fluorine-rich hydrothermal fluids. *Contrib Mineral Petrol*, 119:213–223

Bau M and Dulski P. 1996. Anthropogenic origin of positive gadolinium anomalies in river waters. *Earth Planet. Sci. Lett.* 143: 245–255

Bau M and Müller P. 1993. Rare earth element systematics of the chemically precipitated component in early Precambrian iron-formations and the evolution of the terrestrial atmosphere-hydrosphere-lithosphere system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57: 2239–2249

Chen J, Halls C and Stanley CJ. 1992. Rare earth elements and patterns in major skarn minerals from Shizhuyuan W, Sn, Bi and Mo deposit, South China. *Geoch. J.*, 26:147–158

Ding ZJ, Liu CQ, Yao SZ, Zhou ZG and Yang MG. 2003. The REE constraints on ore sources of the Donggouba polymetallic deposit. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 33(4): 437–442

Frietsch R and Perdahl JA. 1995. Rare earth elements in apatite and magnetite in Kiruna-type iron ores and some other iron ore types. *Ore*

Geology Reviews, 9:489–510

Han S, Huang ZX and Jia XQ. 1993. The geochemistry feature of REE elements of calcareous skarn and garnet from GejiuDamoshan, Yunnan. *Acta Petrologica Sinica*, 9(2): 192–197 (in Chinese with English abstract)

Hass JR, Shock EL and Sassani DC. 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. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 59(21):4329–4350

Hu XP. 2004. Geological features and genesis of the Mengku iron deposit in the Fuyun, Xinjiang. *Xinjiang Non-Ferrous Metals*, 1:2–5, 8 (in Chinese with English abstract)

Ji HB, Wang SJ, Li CY and Wen JM. 1997. REE and isotope (Sr, O) data for the evolution of ore-forming hydrothermal system; Evidence from the Baxi gold-skarn deposit in Songpan-Ganzi orogenic belt, Sichuan, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 17(4): 412–421 (in Chinese with English abstract)

Klein C and Ladeira EA. 2002. Petrography and geochemistry of the least altered banded iron-formation of the Archean Carajas formation, northern Brazil. *Economic Geology*, 97:643–651

Klinkhammer GP, Elderfield, Edmond JM *et al.* 1994. Geochemical implications of rare earth element patterns in hydrothermal fluid from mid-ocean ridges. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58(23): 5105–5113

Li JX, Jiang J, Hu XP, Kang JC and Yin YQ. 2003. Geological features and genesis of the Mengku iron deposit in the Fuyun, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 21(3): 307–311 (in Chinese with English abstract)

Li JY and Xu X. 2004. Major problems on geologic structures and metallogenesis of northern Xinjiang, northwest China. *Xinjiang Geology*, 22(3):119–124 (in Chinese with English abstract)

Li JY, Xiao WJ, Wang KZ, Sun GH and Gao LM. 2003. Neoproterozoic Palaeozoic tectonostratigraphy, magmatic activities and tectonic evolution of eastern Xinjiang, China. In: Mao JW, Goldfarb RJ, Seltmann R, Wang DH, Xiao WJ and Hart CJ. (eds), *Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan*, IAGOD Guidebook Series 10. London: Centre for Russian and Central Asian Mineral Studies, Natural History Museum, 31–74

Li TD, Qi ZM, Wu BQ *et al.* 1996. New progresses of comparative study of geology and mineralization of Altai between China and Kazakhstan. In: Chinese Geological Society (ed). *These Volume of the Symposium of the 8th Five-Year Plan of Geoscience for Contribution to 30th IGC*. Beijing: Metallurgical Industrial Press, 256–259 (in Chinese with English abstract)

Liang T, Wang DH, Qu WJ, Cai MH, Wei KL, Huang HM and Wu DC. 2007. REE geochemistry of calcites in the Dachang tin-polymetallic deposit, Guangxi. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10):2493–2503

Lin XD. 1999. Magmatic-hydrothermal transitional type deposit. Wuhan: China University of Geoscience Press, 33–78 (in Chinese)

Ling QC and Liu CQ. 2003. REE behavior during formation of strata-bound skarn and related deposit: A case study of Donguashan skarn deposit in Anhui province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 192–200 (in Chinese with English abstract)

Lottermoser BG. 1989. Rare earth element study of exhalites within the Willyama Supergroup, Broken Hill Block, Australia. *Mineral Deposita*, 24:92–99

Ma GL, Beaudoin G, Qi SJ and Li Y. 2004. Geology and geochemistry of the Changba SEDEX Pb-Zn deposit, Qinling orogenic belt, China. *Mineralium Deposita*, 39:380–395

Niu HC, Yu XY, Xu JF, Shan Q, Chen FR, Zhang HX and Zheng ZP. 2006. Late Paleozoic volcanism and associated metallogenesis in the Altay area, Xinjiang, China. Beijing: Geological Publishing House, 1–184 (in Chinese with English abstract)

- Qiu ZX. 2003. Analysis on genesis and geological characteristics of Mengku iron deposit in fuyun county, Xinjiang autonomous region. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 18 (Sup): 110 - 114 (in Chinese with English abstract)
- Sengör AMC, Natal'in BA and Burtman VS. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364(22): 299 - 307
- Tong Y, Wang T, Kovach VP, Hong DW and Han BF. 2006. Age and origin of the Takeashiken postorogenic alkali-rich intrusive rocks in southern Altai, near the Mongolian border in China and its implications for continental growth. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1267 - 1278
- Wan B and Zhang LC. 2006. Sr-Nd-Pb isotope geochemistry and tectonic setting of Devonian polymetallic metallogenic belt on the Southern margin of Altaid, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 145 - 152
- Wang DH, Chen YC, Xu ZG, Li TD and Fu XJ. 2002. Minerogenetic series and regularity of mineralization in the Altai metallogenetic Province, China. Beijing: Atomic Press, 1 - 493 (in Chinese)
- Wang JB, Qin KZ, Wu ZL, Hu JH and Ding JN. 1998. Volcanic exhalative sedimentary lead-zinc deposits in the South Margin of Altay Mountains, Xinjiang. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 210 (in Chinese)
- Wang LJ, Wang JB, Wang YW and Shimazaki H. 2002. REE geochemistry of the Huangguangliang skarn Fe-Sn deposit, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 575 - 584 (in Chinese with English abstract)
- Wang YW, Wang JB, Wang SL, Ding RF and Wang LJ. 2003. Geology of the Mengku iron deposit, Xinjiang, China—a metamorphosed VMS? In: Mao J W, Goldfarb R J, Seltmann R, Wang D H, Xiao W J, Hart C (Eds). *Tectonic evolution and metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan*. Proceedings volume of the International Symposium of the IGCP-473 project in Urumqi and guidebook of the field excursion in Xinjiang, China; August 9 - 21, 2003. London: Centre for Russian and Central Asian Mineral Studies, Natural History Museum, 181 - 200
- Xiao CD and Liu XW. 2002. REE geochemistry and origin of skarn garnets from eastern Inner Mongolia. *Geology in China*, 29(3): 311 - 316 (in Chinese with English abstract)
- Xiao WJ, Windley BF, Badarch G, Sun S, Li JL, Qin KZ and Wang ZH. 2004. Paleozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaid; Implications for the lateral growth of Central Asia. *Journal of the Geological Society*, 161: 339 - 342
- Xu JH, Xie YL, Yang ZS, Meng YF and Zeng PS. 2004. Trace elements in fluid inclusions of submarine exhalation sedimentation system in Tongling metallogenic province. *Mineral Deposits*, 23(3): 344 - 352 (in Chinese with English abstract)
- Xu LG, Mao JW, Yang FQ, Ye HS, Zheng JM, Li JG, Cai YB, Zha XL and Gao JJ. 2007. Skarn characteristics of Mengku iron deposits in Xinjiang, and its geological significance. *Mineral Deposits*, 26(4): 455 - 463
- Xu LG, Yang FQ, Li JG, Cai YB, Zheng JM and Huang CL. 2007. Geology and geochemistry of the Mengku iron deposit, Fuyun County, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2653 - 2664
- Yan SH, Zhang ZC, Wang YT, Chen BL, Zhou Gand and He LX. 2005. REE geochemistry of Qiaoxiahala type Fe-Cu deposits in southern margin of Altay Mountains, Xinjiang, and its geological implications. *Mineral Deposits*, 24(1): 25 - 32 (in Chinese with English abstract)
- Yan SH, Wang YT, Zhang ZC, Chen BL and Chen W. 2006. Metallogenic type, tectonic setting, and resource potential of Ertix gold ore belt in northern Yinjiang. *Mineral Deposits*, 25(6): 693 - 704 (in Chinese with English abstract)
- Yang FQ, Wu H, Pirajno F, Ma BY, Xia HD, Deng HJ, Liu XW, Xu G and Zhao Y. 2007. The Jiashan syenite in northern Hebei: A record of lithospheric thinning in the Yanshan intracontinental orogenic belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29: 619 - 636
- Yang YM, Tu GZ and Hu RZ. 2004. REE geochemistry of Yinachang Fe-Cu-REE deposit in Yunnan province. *Acta Mineralogica Sinica*, 24(3): 301 - 308 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZF. 2003. Analysis of characteristics of typical Fe deposit in Altai region, Xinjiang and their genesis and potential. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 18 (Sup): 80 - 83 (in Chinese with English abstract)
- Zhao B, Zhao JS and Liu HC. 1999. REE geochemistry for vein calcareous skarns from some iron-copper (gold) deposits along the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River. *Geochimica*, 28(2): 113 - 125 (in Chinese with English abstract)
- Zhao YM, Lin WW, Bi CS, Li DX and Jiang CJ. 1990. Skarn deposits in China. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 354 (in Chinese)

附中文参考文献

- 仇仲学. 2003. 新疆富蕴县蒙库铁矿床地质特征与成因分析. *地质找矿论丛*, 18(增刊): 110 - 114
- 丁振举, 刘丛强, 姚书振, 周宗桂, 杨明国. 2003. 东沟坝多金属矿床矿质来源的稀土元素地球化学限制. *吉林大学学报(地球科学版)*, 33(4): 437 - 442
- 韩松, 黄忠祥, 贾秀勤. 1993. 云南个旧打磨山钙质矽卡岩及石榴石的稀土元素地球化学特征. *岩石学报*, 9(2): 192 - 197
- 胡兴平. 2004. 新疆富蕴县蒙库铁矿床地质特征及成因浅析. *新疆有色金属*, 1: 2 - 5, 8.
- 季宏兵, 王世杰, 李朝阳, 文锦明. 1997. 松潘-甘孜造山带中巴西金矽卡岩矿床成矿热液系统演化的(REE、Sr、O)证据. *矿物学报*, 17(4): 412 - 421
- 李嘉兴, 姜俊, 胡兴平, 康吉昌, 尹意求. 2003. 新疆富蕴县蒙库铁矿床地质特征及成因分析. *新疆地质*, 21(3): 307 - 311.
- 李锦轶, 徐新. 2004. 新疆北部地质构造和成矿作用的主要问题. *新疆地质*, 22(3): 119 - 124
- 李天德, 祁志明, 吴柏青等. 1996. 中国和哈萨克斯坦阿尔泰地质及成矿研究的新进展. 见: 中国地质学会编, 献给三十届国际地质大会“八五”地质科技重要成果学术交流会议论文集. 北京: 冶金工业出版社, 256 - 259
- 梁婷, 王登红, 屈文俊, 蔡明海, 韦可利, 黄惠民, 吴德成. 2007. 广西大厂锡多金属矿床方解石的REE地球化学特征. *岩石学报*, 23(10): 2493 - 2503
- 林新多编著. 1999. 岩浆-热液过渡型矿床. 武汉: 中国地质大学出版社. 33 - 78
- 凌其聪, 刘丛强. 2003. 层控夕卡岩及有关矿床形成过程的稀土元素行为以安徽冬瓜山矿床为例. *岩石学报*, 19(1): 192 - 200
- 牛贺才, 于学元, 许继峰, 单强, 陈繁荣, 张海祥, 郑作平. 2006. 中国新疆阿尔泰晚古生代火山作用及成矿. 北京: 地质出版社, 1 - 184
- 童英, 王涛, Kovach VP, 洪大卫, 韩宝福. 2006. 阿尔泰中蒙边界塔克什肯口岸后造山富碱侵入岩体的形成时代、成因及其地壳生长意义. *岩石学报*, 22(5): 1267 - 1278
- 万博, 张连昌. 2006. 新疆阿尔泰南缘泥盆纪多金属成矿带Sr-Nd-Pb同位素地球化学与构造背景探讨. *岩石学报*, 22(1): 145 - 152
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 李天德, 傅旭杰. 2002. 阿尔泰成矿省的成矿系列及成矿规律. 北京: 原子能出版社, 1 - 493

- 王京彬,秦克章,吴志亮,胡剑辉,邓吉牛. 1998. 阿尔泰山南缘火山喷流沉积型铅锌矿床. 北京: 地质出版社, 1-210
- 王莉娟,王京彬,王玉往,岛崎英彦. 2002. 内蒙黄岗梁矽卡岩型铁锡矿床稀土元素地球化学. 岩石学报, 18(4): 575-584
- 肖成东,刘学武. 2002. 东蒙地区夕卡岩石榴石稀土元素地球化学及其成因. 中国地质, 29(3): 311-316
- 徐九华,谢玉玲,杨竹森,蒙义峰,曾普胜. 2004. 安徽铜陵矿集区海底喷流沉积体系的流体包裹体微量元素对比. 矿床地质, 23(3): 344-352
- 徐林刚,毛景文,杨富全,叶会寿,郑建民,李建国,蔡永彪,查小玲,高建京. 2007. 新疆蒙库铁矿床矽卡岩矿物学特征及其意义. 矿床地质, 26(4): 455-463
- 徐林刚,杨富全,李建国,蔡永彪,郑建民,黄成林. 2007. 新疆富蕴县蒙库铁矿地质地球化学特征. 岩石学报, 23(10): 2653-2664
- 闫升好,王义天,张招崇,陈柏林,陈文. 2006. 新疆额尔齐斯金矿带的成矿类型、地球动力学背景及资源潜力. 矿床地质, 25(6): 693-704
- 闫升好,张招崇,王义天,陈柏林,周刚,何立新. 2005. 新疆阿尔泰山南缘乔夏哈拉式铁铜矿床稀土元素地球化学特征及其地质意义. 矿床地质, 24(1): 25-32
- 杨耀民,涂光炽,胡瑞忠. 2004. 迪纳厂稀土铁铜矿床稀土元素地球化学. 矿物学报, 24(3): 301-308
- 张建中,冯秉寰. 1987. 新疆阿尔泰阿巴宫-蒙库海相火山岩与铁矿的成生关系及成矿地质特征. 中国地质科学院西安地质研究所所刊, 20: 89-180
- 张振福. 2003. 新疆阿尔泰一带典型铁矿床特征、成因及找矿前景分析. 地质找矿论丛, 18(增刊): 80-83
- 赵斌,赵劲松,刘海臣. 1999. 长江中下游地区若干 Cu(Au)、CuFe(Au)和 Fe 矿床中钙质矽卡岩的稀土元素地球化学. 地球化学, 28(2): 113-125
- 赵一鸣,林文蔚,毕承思,李大新,蒋崇俊. 1990. 中国矽卡岩矿床. 北京: 地质出版社, 1-351