

新疆阿尔泰巴特巴克布拉克铁矿床硫同位素和 稀土元素地球化学特征及其意义*

杨俊杰¹, 张志欣², 杨富全^{3**}, 柴凤梅⁴

(1 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2 中国科学院新疆生态与地理研究所 新疆矿产资源研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830011; 3 中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 4 新疆大学 新疆中亚造山带大陆动力学与成矿预测实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要 新疆阿尔泰巴特巴克布拉克铁矿床赋存于上志留统一下泥盆统康布铁堡组变质火山-沉积岩的矽卡岩中, 矿体形态复杂, 呈似层状、透镜状及不规则状分布。围岩斜长角闪岩、变粒岩和浅粒岩稀土元素配分模式为轻稀土元素相对富集的右倾型, 与矿区英云闪长岩稀土元素配分模式相似; 矿石和矽卡岩稀土元素配分模式多表现为重稀土元素相对富集的左倾型, 综合了围岩和英云闪长岩二者的特征, 表明它们之间有明显的成因联系。结合硫同位素特征(1.4‰~4.8‰)表明, 成矿物质来源于基性火山岩(围岩)。矽卡岩为花岗质岩浆期后热液交代火山岩的产物, 铁矿化是矽卡岩退化蚀变的产物, 矿床形成于弱还原-氧化环境。

关键词 地球化学; 铁矿床; 矽卡岩; 硫同位素; 稀土元素; 巴特巴克布拉克; 阿尔泰

中图分类号: P618.31

文献标志码: A

A study of S isotope and REE geochemistry of Batebakebulake iron deposit in Altay, Xinjiang, and their geological significance

YANG JunJie¹, ZHANG ZhiXin², YANG FuQuan³ and CHAI FengMei⁴

(1 School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2 Xinjiang Research Center for Mineral Resources, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 3 Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Natural Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4 Xinjiang Key Laboratory for Geodynamic Processes and Metallogenic Prognosis of the Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China)

Abstract

The Batebakebulake iron deposit in the Altay Orogenic Belt of Xinjiang is hosted in the metamorphosed volcano-sedimentary sequence of the Upper Silurian-Lower Devonian Kangbutiebao Formation. Orebodies occur as stratoid, lenticular and irregular forms, and their distribution is spatially associated with skarns. The REE geochemical characteristics show that the wall rocks (amphibolite, leptynite, leucoplexite) in the ore district have similar chondrite-normalized REE patterns which show enrichment of LREE, similar to those of the tonalite, suggesting that wall rocks have a clear genetic link with the tonalite. In addition, most of the ores and skarns have similar chondrite-normalized REE patterns which show enrichment of HREE. The $\delta^{34}\text{S}$ values of sulfides range from 1.4‰ to 4.8‰, with an average of 3.57‰. The S isotopic data, together with REE geochemical characteristics,

* 本文得到国家重点研发计划(编号:2017YFC0601201)和国土资源部公益性行业科研专项经费项目(编号:201211073)共同资助

第一作者简介 杨俊杰,男,1990生,博士研究生,矿产普查与勘探专业。Email: yangjunjie90@163.com

** 通讯作者 杨富全,男,1968生,研究员,博士生导师,矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: fuquanyang@163.com

收稿日期 2018-11-01; 改回日期 2019-04-24。秦思婷编辑。

indicate that the metallogenic material was derived from the basic volcanic rocks. The skarn probably resulted from the interaction of post-magmatic hydrothermal fluids with volcanic rocks, and the formation of magnetite was associated with the retrogressive metamorphism of the skarn. The deposit was formed in a weak reducing-oxidizing environment.

Key words: geology, iron deposit, skarn, sulfur isotope, REE, Batebakebulake, Altay

新疆阿尔泰山南缘是中国重要的有色金属和稀有金属成矿带,同时也是新疆铁矿的重要产地。蒙库大型铁矿床是该成矿带中最大的矿床,其次有巴特巴克布拉克铁矿、乌吐布拉克铁矿、巴利尔斯铁矿等(图1)。前人对蒙库铁矿、乌吐布拉克铁矿和巴利尔斯铁矿开展过大量的研究工作,获得了丰富的成果(张建中等,1987;Wang et al., 2003;万博等,2006;徐林刚等,2007a;2007b;杨富全等,2008a, 2011; Xu et al., 2010; 张志欣等, 2011a; 2011b; 2012; 藏梅等, 2013; 张同良等, 2013)。巴特巴克布拉克铁矿床为近年来新发现的矿床,2008年矿区累计查明磁铁矿资源储量2205.43万吨(张立武等, 2010),后期开采过程中储量进一步增大,具有较大的经济价值。对该矿床的成矿流体(杨俊杰等, 2015)和矽卡岩矿物学特征方面(杨俊杰等, 2016)已进行过研究,但对于其成矿物质来源、矽卡岩与火山岩和英云闪长岩关系、成矿环境等科学问题仍然不清楚,研究尚处于空白,制约了成矿机制研究和矿床模型的构建,同时也会影响到矿床的进一步找矿勘查工作,因此本文选取巴特巴克布拉克铁矿床为研究对象。

稀土元素间具有类似的性质和地球化学行为,作为整体在水/岩作用、岩浆结晶分异等地质地球化学过程及其环境条件研究等方面显示出独特作用,因此,可利用稀土元素地球化学特征探讨成矿物质来源和成矿地球化学环境(Michard et al., 1983; Klinhammer et al., 1994; Mills et al., 1995; 丁振举等, 2003; 杨富全等, 2007; 洪为等, 2012; 张智宇等, 2012)。硫同位素组成作为成矿物质来源的重要依据,在矿床学研究中得到了广泛的应用(张志欣, 2011; 龙灵利等, 2015)。本文在野外调查和室内研究基础上,将通过巴特巴克布拉克铁矿床中地层、矽卡岩、矿石和矽卡岩矿物的稀土元素地球化学特征和黄铁矿硫同位素组成,探讨成矿物质来源和成矿地球化学环境,以期为研究成矿作用和构建矿床模型提供依据。

1 成矿地质背景

巴特巴克布拉克铁矿床位于南阿尔泰山麦兹火山

沉积盆地(图1),所处的大地构造位置为西伯利亚板块南阿尔泰山晚古生代活动陆缘(何国琦等, 2004)。麦兹火山-沉积盆地出露地层主要有中-上志留统库鲁姆提群、上志留统一下泥盆统康布铁堡组和中-上泥盆统阿勒泰镇组。库鲁姆提群为一套中深变质浅海-滨海相碎屑沉积建造,主要由黑云母片麻岩、黑云石英片岩夹斜长角闪岩组成,原岩为砂岩、砂页岩和泥岩等(张建中等, 1987)。与上覆康布铁堡组下亚组呈断层接触。康布铁堡组主要由中等变质海相火山熔岩、火山碎屑岩、夹陆源碎屑岩和碳酸盐岩组成,与上覆阿勒泰镇组呈整合接触,柴凤梅等(2012)测得麦兹盆地康布铁堡组上亚组变质流纹岩的LA-ICP-MS (Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) 锆石 U-Pb 年龄为 410~400 Ma。阿勒泰镇组为一套中浅变质浅海相复理石建造,主要由变质含砾砂岩、变质钙质砂岩、变质凝灰质砂岩和大理岩组成。

区域内构造活动较强烈,以麦兹复式向斜和巴寨断裂为主。麦兹复式向斜呈舒缓波状延伸,轴迹线长 50 km,核部为阿勒泰镇组,两翼为康布铁堡组,两翼幅宽 10~15 km,轴面倾向北东,倾角 65°~82°。次级褶皱主要有蒙克木背斜、铁热克萨依向斜、巴特巴克布拉克向斜、铁木下尔衮向斜等,巴特巴克布拉克铁矿床处于巴特巴克布拉克向斜内。巴寨断裂属逆断层,具有大型平移特征,全长 200 km,走向为 310°~320°,倾角为 70°~80°。次级断裂主要有沙尔布拉克、巴特巴克布拉克、可依洛甫 3 条断裂。

区内侵入岩分布于麦兹向斜两翼外侧,以中酸性岩为主,岩性为黑云母花岗岩、英云闪长岩及花岗斑岩等,如蒙库矿区英云闪长岩和黑云母花岗岩体((400±6)Ma、(404±8)Ma,杨富全等, 2008b; (378±7)Ma、(404±8)Ma, Xu et al., 2010)、琼库尔黑云母花岗岩体((399±4)Ma, 童英等, 2007)、乌吐布拉克矿区英云闪长岩和黑云母英云闪长岩体((385.6±2.3)Ma、(387.7±2.1)Ma, 张志欣, 2011),另见少量中基性岩脉分布于麦兹向斜内部,岩性为角闪石岩、辉长苏长岩及辉长辉绿岩等。

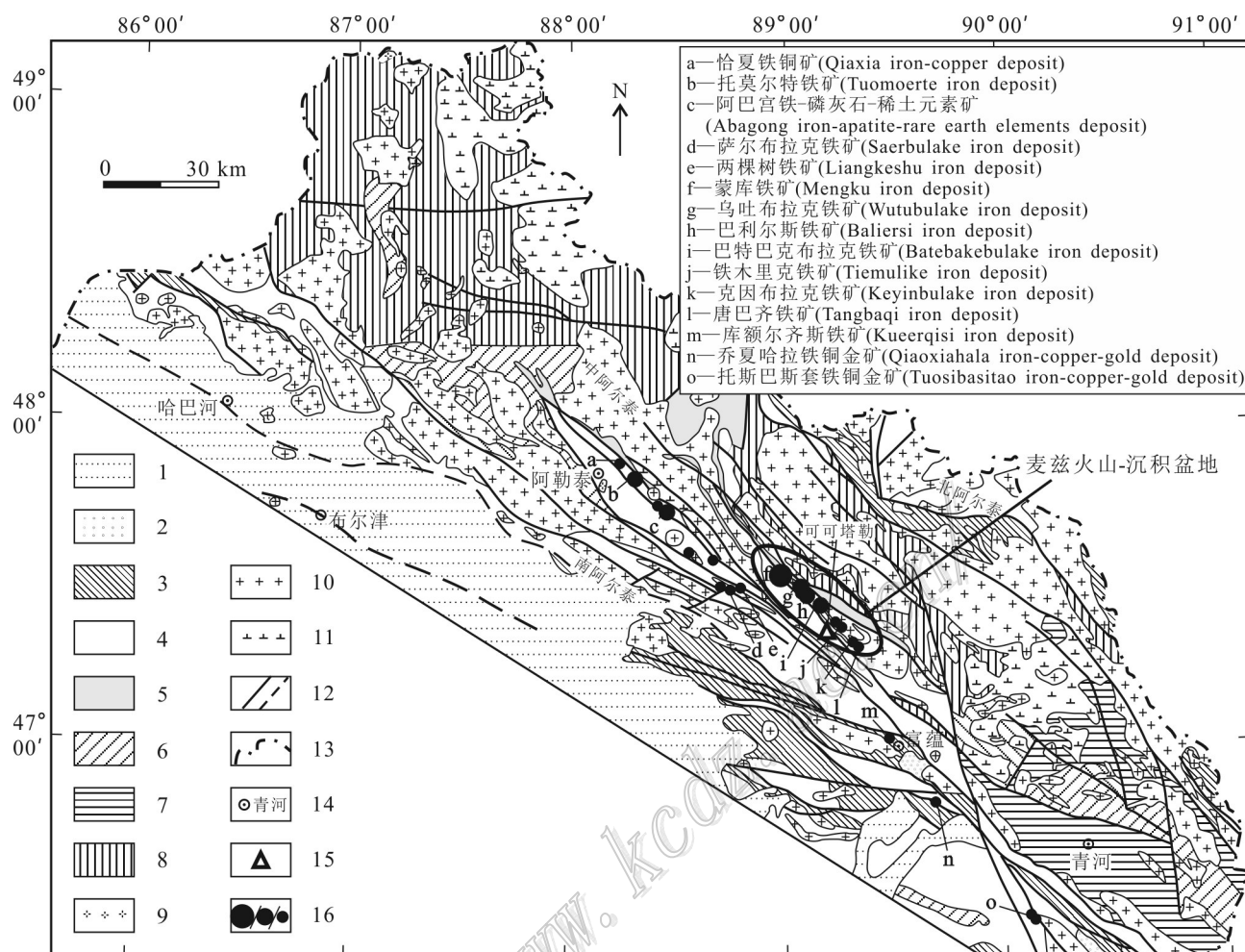


图1 阿尔泰造山带区域地质及铁矿分布略图(据杨富全等,2011修改)

1—第四系沉积物;2—侏罗纪含煤层系;3—石炭纪火山-沉积岩;4—泥盆纪(变质)火山-沉积岩;5—中-晚志留世变沉积岩夹火山岩;6—中-晚奥陶世变火山-沉积岩;7—中寒武世—早奥陶世变沉积岩;8—震旦纪—寒武纪变沉积岩、变火山岩;9—三叠纪—侏罗纪花岗岩;10—泥盆纪—二叠纪花岗岩;11—奥陶纪—志留纪花岗岩;12—断裂、推测断裂;13—国界线;14—地名;15—铅锌矿;16—大/中/小型铁矿

Fig. 1 Simplified regional geological map of Altay orogenic belt and iron deposits distribution (modified after Yang et al., 2011)

1—Quaternary sediments; 2—Jurassic coal-bearing rock series; 3—Carboniferous volcanoclastic-sedimentary rocks; 4—Devonian (metamorphosed) volcanoclastic-sedimentary rocks; 5—Middle—Late Silurian meta-sedimentary rock intercalated with volcanic rocks; 6—Middle—Late Ordovician metamorphosed volcanoclastic-sedimentary rocks; 7—Middle-Cambrian—Early-Ordovician metamorphosed sedimentary rocks;

8—Sinian-Cambrian meta-sedimentary, meta-volcanic rocks; 9—Triassic—Jurassic granites; 10—Devonian—Permian granites;

11—Ordovician—Silurian granites; 12—Fracture, inferred fracture; 13—National boundaries; 14—Geographic name;

15—Lead-zinc deposit; 16—Large/medium/small iron deposits

2 矿床地质特征

2.1 矿区地层及侵入岩

矿区出露地层为中等变质康布铁堡组下亚组(图2),可分为2个岩性段:第一岩性段为黑云斜长变粒岩、浅粒岩夹磁铁变粒岩;第二岩性段进一步分为2层,第一层岩性为角闪斜长变粒岩、透闪变粒岩

和浅粒岩,第二层岩性为斜长角闪岩、角闪斜长变粒岩和浅粒岩,为主要赋矿层位,推测矿区出露的康布铁堡组原岩为基性火山岩,可能为玄武岩。侵入岩为花岗岩类,分布于矿区的南部和北部,为乌吐布拉克矿区南侧岩体的南东向延伸部分(图1),岩性为英云闪长岩,花岗结构,似片麻状构造,锆石 LA-ICP-MS U-Pb 谐和年龄为 (385.6 ± 2.3) Ma,为中泥盆世早期岩浆侵入体(张志欣等,2011)。

2.2 矿体及矿石特征

矿区内矿化带呈NW—SE向带状展布,分布范围长2300 m,宽100~240 m,已圈定12个铁矿体。赋矿围岩为石榴子石矽卡岩、变粒岩和浅粒岩。矿体总体顺层分布,但形态复杂,多呈似层状、透镜状及不规则状产出(图2),见有膨大收缩、分支复合、尖灭等现象。矿体TFe平均品位为26.7%~50.4%,多数在30.9%~38.4%(张立武等,2010)。

矿石构造主要为块状、浸染状,其次为条带状、脉状构造。矿石结构主要为他形粒状变晶结构、不等粒结构和交代结构。矿石中主要金属矿物为磁铁矿,其次为黄铁矿,偶见黄铜矿。非金属矿物主要为石榴子石、透辉石、绿帘石,其次为石英、方解石、角闪石、绿泥石、阳起石等(图3a~o)。

2.3 围岩蚀变及成矿期次划分

矿区围岩蚀变发育,主要为矽卡岩化(石榴子石化、透辉石化、绿帘石化等),次为碳酸盐化、硅化,其中矽卡岩化与铁矿关系密切。矽卡岩常呈透镜状、似层状产于矿体内部及旁侧,近矿围岩蚀变较强,且愈近矿体蚀变愈强,远离矿体蚀变渐弱。空间上,从地层→矽卡岩→矿体,三者呈渐变过渡关系,磁铁矿在含量上表现出从无到含量逐渐增加的特点(图4)。

根据野外及室内镜下观察到的矿物组合与穿插关系,将矿床的成矿过程划分为矽卡岩期、区域变质期和表生氧化期。其中,矽卡岩期进一步划分为3个阶段:早期矽卡岩阶段,主要形成石榴子石和透辉石;退化蚀变阶段,铁的主要成矿阶段,镜下见磁铁矿交代石榴子石和透辉石(图3k),另外还有角闪石、绿帘石、绿泥石、阳起石等矿物形成(图3j,l);石英硫化物阶段,主要形成黄铁矿(图3m,n)、黄铜矿(少量)、石英、方解石等。区域变质期,含矿火山岩系受区域变质作用影响,矿体、矽卡岩和围岩整体发生变形,围岩原有的层理因变质作用而被强烈改造,变质条带围绕含矿矽卡岩分布,形成少量石英和方解石脉。表生氧化期,早期形成的矿物在地表或近地表发生氧化作用,形成氧化物,如褐铁矿和孔雀石。

3 样品及分析方法

本次共计采集31件样品进行稀土元素分析,主要采自1~3号矿体及其周边围岩。矽卡岩、矽卡岩矿物和矿石来自早期矽卡岩阶段和退化蚀变阶段。根据薄片鉴定结果选取新鲜且具代表性的样品进行稀土元素地球化学分析。其中,3件斜长角闪岩(1

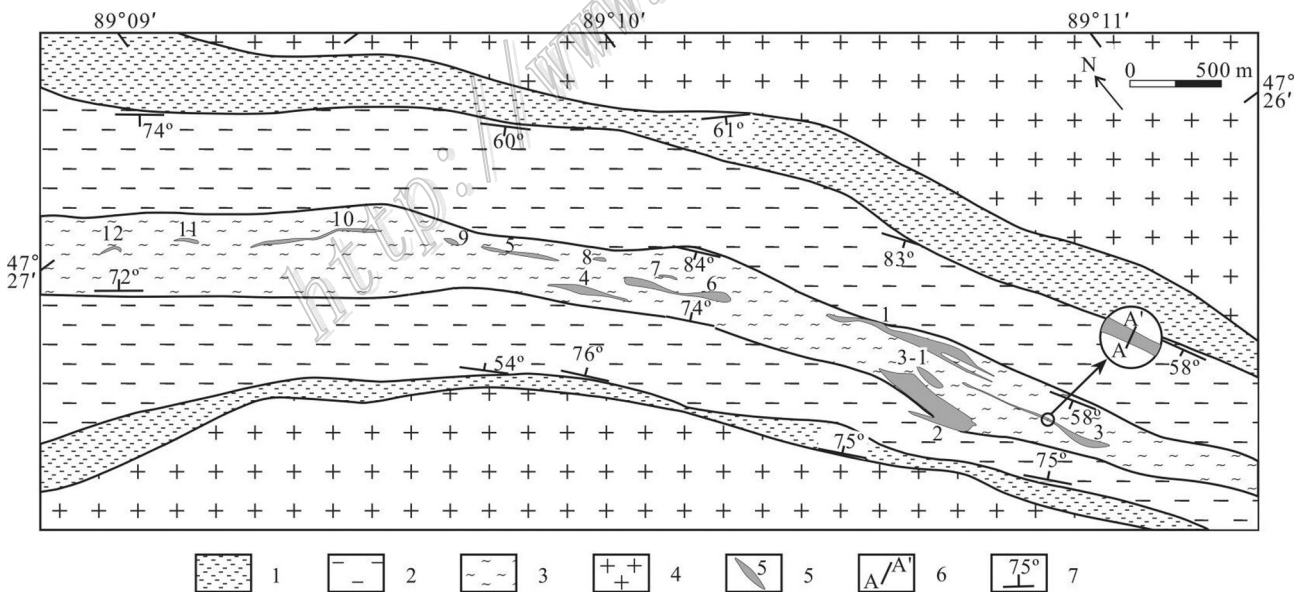


图2 巴特巴克布拉克铁矿区地质图(据张立武等,2010修改)

1—第一岩性段;2—第二岩性段第一层;3—第二岩性段第二层;4—英云闪长岩;5—铁矿体及编号;6—剖面位置及编号;7—产状

Fig. 2 Geological map of the Batebakebulake iron ore district (modified after Zhang et al., 2010)

1—The first lithologic section; 2—The first layer of the second lithologic section; 3—The second layer of the second lithologic section; 4—Tonalite; 5—The iron orebody and its serial number; 6—The location and serial number of geological section; 7—Attitude of strata

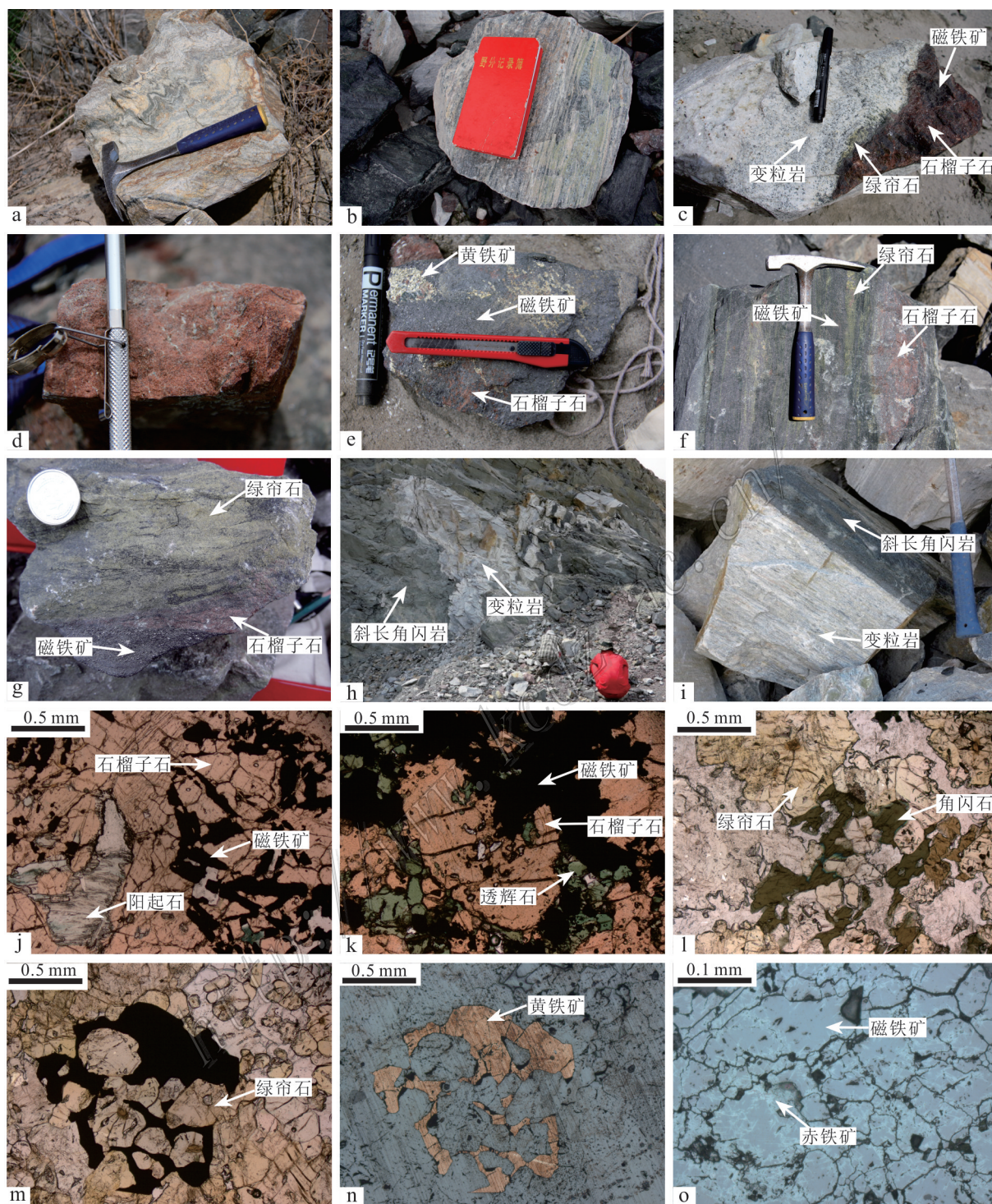


图 3 巴特巴克布拉克铁矿床围岩、矿石及矽卡岩特征

- a. 斜长角闪变粒岩; b. 绿帘石化斜长角闪变粒岩; c. 变粒岩与矽卡岩接触带; d. 石榴子石矽卡岩; e. 含石榴子石黄铁矿磁铁矿矿石;
f. 含磁铁矿矽卡岩; g. 含石榴子石磁铁矿绿帘石矽卡岩; h. 地层; i. 斜长角闪岩与变粒岩接触带; j. 石榴子石矽卡岩;
k. 磁铁矿交代石榴子石和透辉石; l-n. 绿帘石矽卡岩; o. 磁铁矿中的赤铁矿

Fig. 3 Features of wall rocks, ores and skarn from the Batebakebulake iron deposit

- a. Hornblende-plagioclase leptynite; b. Epidotized hornblende-plagioclase leptynite; c. Contact zone of leptynite and skarn; d. Garnet skarn; e. Magnetite ore containing garnet and pyrite; f. Skarn containing magnetite; g. Epidote skarn containing garnet and magnetite; h. Strata; i. Contact zone of amphibolite and leptynite; j. Garnet skarn; k. Magnetite metasomatic garnet and diopside; l-n. Epidote skarn; o. Hematite in the magnetite

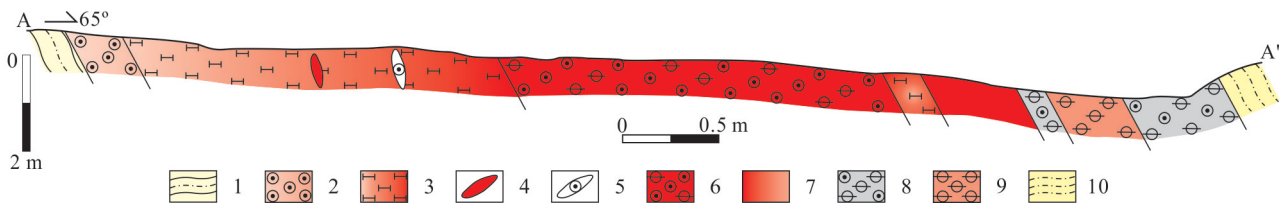


图4 巴特巴克布拉克铁矿典型剖面图(据杨俊杰等, 2016修改)

1—浅粒岩; 2—含磁铁矿石榴子石矽卡岩; 3—含磁铁矿透辉石矽卡岩; 4—透镜状磁铁矿矿体; 5—透镜状石榴子石矽卡岩; 6—含绿帘石榴子石磁铁矿矿石; 7—细粒磁铁矿矿体; 8—石榴子石绿帘石矽卡岩; 9—含磁铁矿绿帘石矽卡岩; 10—角闪斜长变粒岩

Fig.4 The typical section of Batebakebulake iron deposit (modified after Yang et al., 2016)

1—Leucopelite; 2—Garnet skarn containing magnetite; 3—Diopside skarn containing magnetite; 4—Lenticular magnetite orebody; 5—Lenticular garnet skarn; 6—The magnetite orebody containing epidote and garnet; 7—Fine particle magnetite orebody; 8—Epidote skarn containing garnet; 9—Epidote skarn containing magnetite; 10—Hornblende-plagioclase leptynite

件为绿帘石化斜长角闪岩)、2件变粒岩(1件斜长角闪变粒岩, 1件条带状变粒岩)、3件浅粒岩、7件矽卡岩(石榴子石绿帘石矽卡岩、含磁铁矿绿帘石石榴子石矽卡岩、含石榴子石绿帘石矽卡岩、含稀疏浸染状磁铁矿石石榴子石矽卡岩、石榴子石矽卡岩、含稀疏浸染状磁铁矿石石榴子石矽卡岩、含稀疏浸染状磁铁矿绿帘石矽卡岩)、8件矿石(稠密浸染状石榴子石磁铁矿矿石、稠密浸染状透辉石磁铁矿矿石、稠密浸染状透辉石磁铁矿矿石、块状磁铁矿矿石、稠密浸染状石榴子石透辉石磁铁矿矿石、块状磁铁矿矿石(含少量透辉石)、块状磁铁矿矿石、稠密浸染状石榴子石磁铁矿矿石), 从矽卡岩中挑选出6件石榴子石和2件绿帘石样品。

石榴子石和绿帘石单矿物样品由河北省区域地质矿产调查研究所实验室清洗、粉碎、双目镜下人工挑选, 纯度达99%以上。单矿物样品在玛瑙研钵中研至200目以下。将待测全岩样品清洗、粉碎、缩分。稀土元素分析在国家地质实验测试中心测定, 选用等离子质谱法(ICP-MS), 误差小于5%。全岩分析仪器为等离子质谱(X-series), 单矿物分析仪器为等离子质谱仪(PE300D), 执行标准DZ/T0223-2001。

硫同位素样品采自Fe1、Fe2矿体的矽卡岩及矿石, 黄铁矿半自形-他形, 呈浸染状分布, 形成于石英硫化物阶段。将其研磨、碾碎、筛选, 在双目镜下挑选纯度达99%以上的黄铁矿单矿物颗粒。测试工作由核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成, 所用仪器型号为Delta v plus, 检测方法依据参照DZ/T 0184.14-1997《硫化物中硫同位素组成的测定》。

4 结 果

4.1 稀土元素分析结果

31件矿物、岩石和矿石的稀土元素分析结果见表1, REE球粒陨石标准选用Sun等(1989)的数据, 铕异常和铈异常分别采用 $\delta\text{Eu} = \text{Eu}_N / [(\text{Sm}_N + \text{Gd}_N) \times 0.5]$, $\delta\text{Ce} = \text{Ce}_N / [(\text{La}_N + \text{Pr}_N) \times 0.5]$ 计算, 稀土元素地球化学特征如下:

3件斜长角闪岩样品的总稀土元素变化于 $76.44 \times 10^{-6} \sim 117.22 \times 10^{-6}$ 。稀土元素配分模式相似, $\text{LREE}/\text{HREE} = 3.30 \sim 4.44$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 2.45 \sim 4.12$, 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。 $(\text{La}/\text{Sm})_N = 1.34 \sim 2.02$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 1.53 \sim 1.78$, 显示轻、重稀土元素组内部均发生分异作用。 $\delta\text{Eu} = 0.91 \sim 1.01$, $\delta\text{Ce} = 1.01 \sim 1.06$, 基本无铕、铈异常。稀土元素配分模式(图5a)为轻稀土元素富集, 重稀土元素相对亏损的右倾型, 具有左陡右缓, 无明显铕、铈异常的特征。

1件斜长角闪变粒岩和1件条带状变粒岩总稀土元素变化于 $117.86 \times 10^{-6} \sim 177.25 \times 10^{-6}$ 。稀土元素配分模式(图5b)显示为轻稀土元素相对富集的右倾型, $(\text{LREE}/\text{HREE}) = 5.59 \sim 5.91$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 3.19 \sim 3.89$, 左陡倾 $(\text{La}/\text{Sm})_N = 2.65 \sim 3.11$, 右平缓 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 0.66 \sim 1.03$, 具铕负异常 $\delta\text{Eu} = 0.43 \sim 0.50$, 微弱铈正异常 $\delta\text{Ce} = 1.06 \sim 1.17$ 。

3件浅粒岩样品的总稀土元素含量变化较大($120.59 \times 10^{-6} \sim 204.71 \times 10^{-6}$)。LREE/HREE=4.80~5.16, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 3.33 \sim 5.37$, 表明轻、重稀土元素间发生了分异作用, 轻稀土元素相对富集。 $(\text{La}/\text{Sm})_N =$

表 1 巴特巴克布拉克铁矿床矿物、岩石、矿石稀土元素成分分析结果

Table 1 REE contents of minerals, rocks and ores from Batebakebulake iron deposit

组分	Bbbk12-06 绿帘石	Bbbk12-33 石榴子石	Bbbk12-35 石榴子石	Bbbk12-36 绿帘石	Bbbk12-46 石榴子石	Bbbk12-47-1 石榴子石	Bbbk12-68 石榴子石	Bbbk12-69-1 石榴子石	bbbk12-48 斜长角闪变粒岩	bbbk12-50 石榴子石绿帘石砂卡岩	bbbk12-52 含磁铁矿绿帘石石榴子石砂卡岩
	$w(B)/10^{-6}$										
La	195.00	0.72	0.40	4.60	0.69	0.14	0.10	0.32	19.50	56.30	6.93
Ce	371.00	3.36	2.22	28.10	2.63	1.09	0.68	1.29	49.70	117.00	13.20
Pr	43.60	0.79	0.47	7.63	0.52	0.27	0.28	0.39	5.33	14.30	1.66
Nd	158.00	4.86	2.44	43.40	2.82	1.73	2.58	3.38	21.60	61.50	6.94
Sm	33.00	2.25	0.86	14.70	1.14	1.21	2.29	3.02	4.05	16.10	1.92
Eu	17.60	0.54	0.41	4.75	0.47	0.48	1.06	1.35	0.63	11.60	2.41
Gd	25.40	4.47	1.59	19.30	2.20	2.85	5.75	7.89	3.52	21.40	3.03
Tb	2.78	1.12	0.35	3.08	0.52	0.70	1.60	2.14	0.61	3.74	0.84
Dy	11.40	8.74	2.63	14.40	3.98	5.00	13.60	17.20	3.19	20.30	8.56
Ho	1.90	2.29	0.73	2.04	1.08	1.12	3.99	4.70	0.84	3.84	3.00
Er	4.74	7.62	2.42	3.39	3.54	3.08	15.10	16.30	3.26	10.50	12.80
Tm	0.56	1.13	0.35	0.29	0.51	0.38	2.65	2.61	0.53	1.20	1.96
Yb	3.32	7.24	2.06	1.41	3.16	2.31	19.30	17.40	4.38	8.15	13.40
Lu	0.44	0.93	0.24	0.17	0.39	0.28	2.71	2.34	0.72	1.11	1.83
Y	50.70	63.70	22.50	53.50	34.40	30.50	129.00	143.00	22.50	105.00	90.60
Σ REE	868.74	46.06	17.17	147.26	23.65	20.64	71.69	80.33	117.86	347.04	78.48
LR/HR	16.19	0.37	0.66	2.34	0.54	0.31	0.11	0.14	5.91	3.94	0.73
(La/Sm) _N	3.81	0.21	0.30	0.20	0.39	0.07	0.03	0.07	3.11	2.26	2.33
(Gd/Yb) _N	6.33	0.51	0.64	11.32	0.58	1.02	0.25	0.38	0.66	2.17	0.19
(La/Yb) _N	42.13	0.07	0.14	2.34	0.16	0.04	0.00	0.01	3.19	4.96	0.37
δ Eu	1.79	0.51	1.06	0.86	0.89	0.76	0.85	0.80	0.50	1.91	3.04
δ Ce	0.95	0.97	1.09	0.92	1.03	1.04	0.66	0.77	1.17	0.99	0.92

注:比值单位为1。

续表 1-1
Continued Table 1-1

组分	btbk12-54 含石榴子石绿帘石矽卡岩	btbk12-61 浅粒岩	btbk12-62 浅粒岩	btbk12-63 斜长角闪岩	btbk12-64 绿帘石化的斜长角闪岩	btbk12-65 浅粒岩	btbk12-66 斜长角闪岩	btbk12-67 条带状变粒岩	BTB13-01 含稀疏浸染状磁铁矿 石榴子石矽卡岩	BTB13-02 石榴子石矽卡岩 (不含磁铁矿)
					$w(B)/10^{-6}$					
La	39.60	18.50	37.20	13.60	12.10	37.70	11.50	30.00	1.23	0.55
Ce	86.10	43.60	67.70	36.80	28.10	70.80	26.60	69.50	3.68	2.22
Pr	10.80	6.02	9.97	5.36	3.82	10.30	3.43	8.34	0.72	0.48
Nd	47.50	25.60	40.90	25.30	17.80	42.50	15.90	34.20	3.45	3.22
Sm	12.60	5.54	8.39	6.57	4.19	9.10	3.67	7.31	1.04	1.81
Eu	12.20	0.55	1.00	2.30	1.33	1.06	1.29	1.01	0.70	0.77
Gd	16.70	5.50	9.22	7.36	4.72	9.50	4.30	6.90	1.49	2.97
Tb	3.12	0.89	1.55	1.28	0.75	1.62	0.67	1.09	0.49	1.00
Dy	17.40	4.46	8.03	7.32	4.12	8.19	3.49	5.57	4.39	8.93
Ho	3.32	1.01	1.68	1.52	0.89	1.73	0.72	1.25	1.32	2.87
Er	9.02	3.73	5.45	4.70	2.76	5.61	2.28	4.95	4.32	10.80
Tm	1.03	0.54	0.70	0.55	0.35	0.74	0.30	0.73	0.71	2.02
Yb	6.87	3.99	4.97	3.98	2.54	5.10	2.00	5.53	3.88	12.00
Lu	0.99	0.66	0.73	0.58	0.38	0.76	0.29	0.87	0.39	1.36
Y	87.70	29.00	44.40	39.60	21.80	44.80	19.50	36.60	42.20	95.30
ΣREE	267.25	120.59	197.49	117.22	83.85	204.71	76.44	177.25	27.81	51.01
LR/HR	3.57	4.80	5.11	3.30	4.08	5.16	4.44	5.59	0.64	0.22
(La/Sm) _N	2.03	2.16	2.86	1.34	1.86	2.67	2.02	2.65	0.76	0.20
(Gd/Yb) _N	2.01	1.14	1.53	1.53	1.54	1.54	1.78	1.03	0.32	0.20
(La/Yb) _N	4.13	3.33	5.37	2.45	3.42	5.30	4.12	3.89	0.23	0.03
δEu	2.57	0.30	0.35	1.01	0.91	0.35	0.99	0.43	1.72	1.02
δCe	1.00	1.01	0.84	1.06	1.01	0.86	1.03	1.06	0.95	0.98

注:比值单位为1。

续表 1-2
Continued Table 1-2

组分	BTB13-03 含稀疏浸染状磁铁矿 石榴子石砂卡岩	BTB13-04 稠密浸染状石榴 子石磁铁矿矿石	BTB13-05 稠密浸染状透辉 石磁铁矿矿石	BTB13-06 稠密浸染状透辉 石磁铁矿矿石	BTB13-07 块状磁铁 矿矿石	BTB13-08 稠密浸染状石榴子石 透辉石磁铁矿矿石	BTB13-09 块状磁铁矿矿石 (含少量透辉石)	BTB13-10 块状磁铁 矿矿石	BTB13-11 稠密浸染状石榴 子石磁铁矿矿石	BTB13-12 含稀疏浸染状磁铁 矿绿帘石砂卡岩
	$w(B)/10^{-6}$									
La	0.41	1.91	0.66	0.17	0.38	1.53	0.22	1.13	0.39	3.05
Ce	1.56	2.47	1.15	0.38	0.81	2.80	0.63	2.26	1.29	5.97
Pr	0.35	0.35	0.15	0.06	0.13	0.38	0.13	0.31	0.23	0.83
Nd	2.20	1.43	0.53	0.35	0.71	1.66	0.75	1.36	1.20	3.63
Sm	0.94	0.46	0.11	0.14	0.18	0.61	0.21	0.48	0.50	0.93
Eu	0.43	0.27	0.03	0.08	0.04	0.30	0.04	0.22	0.14	0.34
Gd	1.22	1.09	0.16	0.27	0.21	1.61	0.22	0.60	0.85	1.47
Tb	0.36	0.50	0.05	0.11	0.06	0.75	0.06	0.15	0.28	0.52
Dy	2.49	5.20	0.34	1.02	0.47	7.08	0.40	1.00	2.23	4.12
Ho	0.66	1.66	0.08	0.29	0.13	2.14	0.10	0.24	0.64	1.07
Er	2.13	5.81	0.26	0.99	0.39	6.73	0.31	0.67	2.13	3.27
Tm	0.36	1.04	0.04	0.18	0.07	1.17	0.06	0.11	0.38	0.53
Yb	1.99	5.93	0.35	1.10	0.43	7.08	0.35	0.60	2.26	3.23
Lu	0.25	0.68	0.06	0.14	0.06	0.95	0.06	0.08	0.28	0.41
Y	21.80	46.50	2.36	7.80	3.62	59.70	2.95	6.77	19.10	31.90
ΣREE	15.34	28.80	3.97	5.27	4.07	34.79	3.55	9.20	12.81	29.36
LR/HR	0.62	0.31	1.96	0.29	1.24	0.26	1.27	1.68	0.42	1.01
(La/Sm) _N	0.28	2.68	3.82	0.80	1.37	1.62	0.68	1.51	0.50	2.11
(Gd/Yb) _N	0.51	0.15	0.38	0.20	0.41	0.19	0.51	0.83	0.31	0.38
(La/Yb) _N	0.15	0.23	1.35	0.11	0.63	0.16	0.45	1.36	0.12	0.68
δEu	1.22	1.12	0.73	1.22	0.66	0.88	0.58	1.24	0.65	0.87
δCe	0.94	0.69	0.87	0.89	0.91	0.87	0.90	0.92	1.03	0.90

注:比值单位为1。

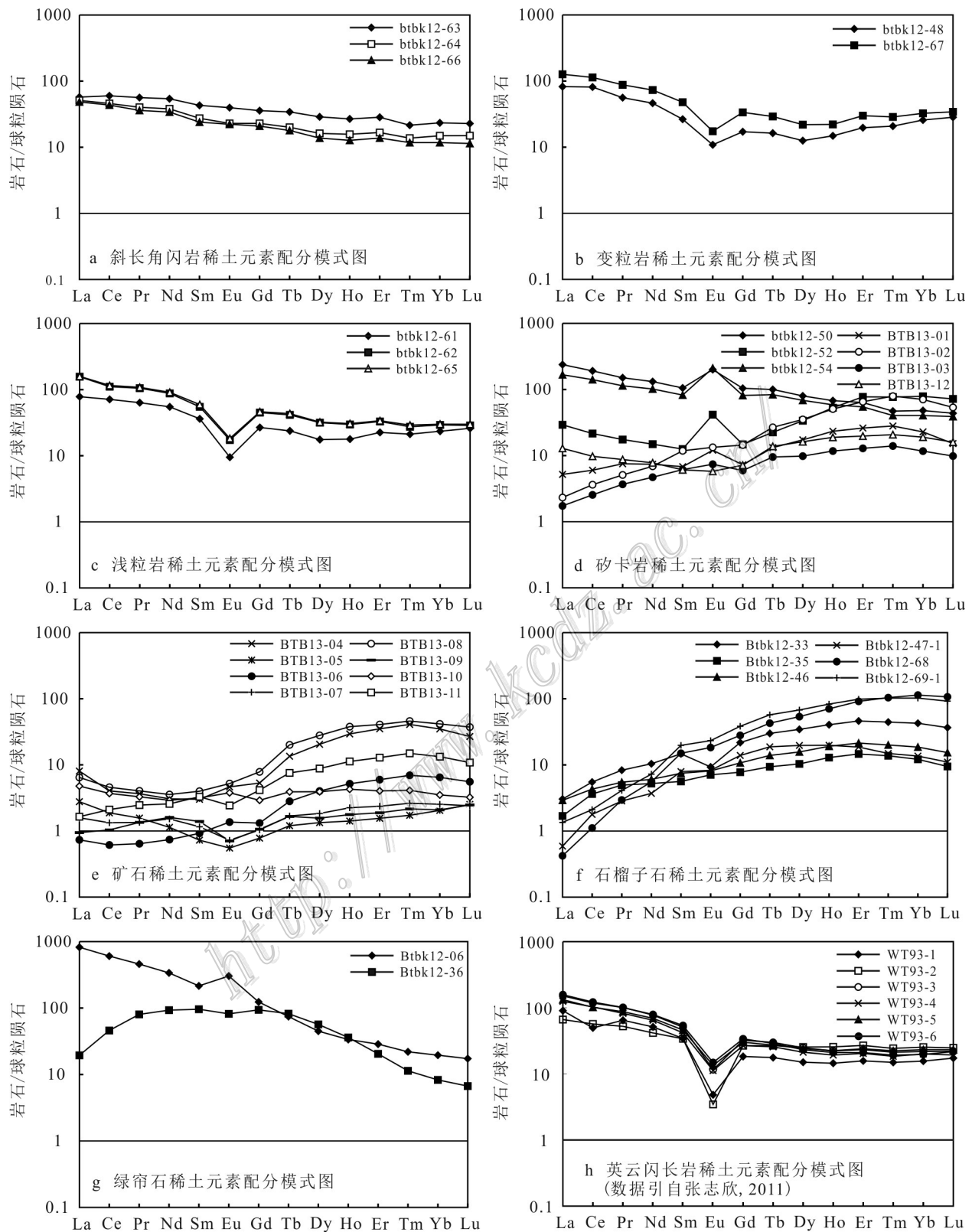


图5 巴特巴克布拉克铁矿床斜长角闪岩(a)、变粒岩(b)、浅粒岩(c)、矽卡岩(d)、矿石(e)、石榴子石(f)、绿帘石(g)及英云闪长岩(h)稀土元素配分模式图(球粒陨石数据取自Sun et al., 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of amphibolite (a), leptynite (b), leucoplexite (c), skarn (d), ore (e), garnet (f), epidote (g) and tonalite (h) from the Batebakebulake iron deposit (chondrite content after Sun et al., 1989)

2.16~2.86, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N=1.14\sim1.54$, 显示轻稀土元素组内部的分异作用相对于重稀土元素组更强。 $\delta\text{Eu}=0.30\sim0.35$, $\delta\text{Ce}=0.84\sim1.01$, 具强铈负异常, 微弱铈异常, 稀土元素配分曲线成V字形(图5c)。

7件矽卡岩总稀土元素质量分数变化于 $15.34\times10^{-6}\sim347.04\times10^{-6}$, 变化范围较大。 $\text{LREE}/\text{HREE}=0.22\sim3.94$, $(\text{La}/\text{Yb})_N=0.03\sim4.96$, 轻、重稀土元素间均发生了分异作用, $(\text{La}/\text{Sm})_N=0.20\sim2.33$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N=0.20\sim2.17$, 表明轻、重稀土元素组内部也发生了分异作用, $\delta\text{Eu}=0.87\sim3.04$, 多数样品具正铈异常或弱负铈异常。 $\delta\text{Ce}=0.94\sim1.00$, 样品弱铈异常或无铈异常(图5d)。

8件矿石样品稀土元素总量介于 $3.55\times10^{-6}\sim34.79\times10^{-6}$ 。 $\text{LREE}/\text{HREE}=0.26\sim1.96$, $(\text{La}/\text{Yb})_N=0.11\sim1.36$, 在稀土元素配分模式图(图5e)中具有十分相似的稀土元素配分模式, 表现为重稀土元素相对富集, 轻稀土元素相对亏损的左倾型。 $(\text{La}/\text{Sm})_N=0.50\sim3.82$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N=0.15\sim0.83$, 轻、重稀土元素组内部有明显的分异作用。3件为正铈异常($\delta\text{Eu}=1.12\sim1.24$), 5件具负铈异常($\delta\text{Eu}=0.58\sim0.88$), 多数样品具有弱负铈异常($\delta\text{Ce}=0.69\sim0.92$, 除BTB13-11样品 $\delta\text{Ce}=1.03$)。

6件石榴子石样品的稀土元素总量变化于 $17.17\times10^{-6}\sim80.33\times10^{-6}$ 。 $\text{LREE}/\text{HREE}=0.11\sim0.66$, $(\text{La}/\text{Yb})_N=0.00\sim0.16$, 表明轻、重稀土元素之间发生了较明显的分异作用, 重稀土元素相对富集, 稀土元素配分模式(图5f), 表现为重稀土元素相对富集, 轻稀土元素相对亏损的左倾型。 $(\text{La}/\text{Sm})_N=0.03\sim0.39$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N=0.25\sim1.02$, 轻、重稀土元素组内部发生分

异作用, $\delta\text{Eu}=0.51\sim1.06$, $\delta\text{Ce}=0.66\sim1.09$, 大多数为弱负铈异常和弱负铈异常。

2件绿帘石样品稀土元素总量变化较大(147.26×10^{-6} 和 868.74×10^{-6})。 LREE/HREE 为2.34和16.19, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为2.34和42.13, 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, 稀土元素配分模式为重稀土元素相对亏损的右倾型(图5g)。 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 为0.20和3.81, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 为6.33和11.32, 轻、重稀土元素组内部发生分异作用。 δEu 为0.86和1.79, δCe 为0.92和0.95, 弱负铈异常到正铈异常, 微弱铈负异常。

6件英云闪长岩样品稀土元素总量变化于 $102.52\times10^{-6}\sim190.20\times10^{-6}$ 之间, $\text{LREE}/\text{HREE}=3.29\sim7.12$, $(\text{La}/\text{Yb})_N=2.46\sim7.24$, $(\text{La}/\text{Sm})_N=1.90\sim3.03$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N=1.03\sim1.68$, $\delta\text{Eu}=0.11\sim0.35$, $\delta\text{Ce}=0.61\sim0.95$, 表明轻、重稀土元素之间分异作用相对较弱, 稀土元素配分模式为轻稀土元素相对富集的右倾型(图5h), 强负铈异常, 弱负铈异常(张志欣等, 2011)。

4.2 硫同位素分析结果

10件样品中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于1.4‰~4.8‰(表2), 平均为3.57‰。

5 讨论

5.1 铁矿形成与矽卡岩成因联系

阿尔泰造山带造山作用主要发生在晚古生代(Bibikova et al., 1992; 庄育勋, 1994; Jahn, 1998; Wang et al., 2006), 古生代地层均发生了绿片岩相到角闪岩相的变质作用(郑常青等, 2007)。一般认为

表2 巴特巴克布拉克铁矿床硫同位素组成

Table2 Sulfur isotopic data of the Batebakebulake iron deposit

序号	样号	岩性	测试矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}/\text{‰}$
1	BTBK14-1	含石英方解石黄铁矿石石榴子石磁铁矿矿石	黄铁矿	4.2
2	BTBK14-4	含方解石黄铁矿石石榴子石磁铁矿矿石	黄铁矿	4.8
3	BTBK14-5	含方解石黄铁矿石石榴子石磁铁矿矿石	黄铁矿	3.6
4	BTBK14-6	含石榴子石方解石黄铁矿磁铁矿矿石	黄铁矿	4.7
5	BTBK14-7	含方解石黄铁矿石石榴子石磁铁矿矿石	黄铁矿	2.8
6	BTBK14-8	含磁铁矿石石英黄铁矿脉石榴子石矽卡岩	黄铁矿	1.4
7	BTBK14-9	含方解石黄铁矿石石榴子石磁铁矿矿石	黄铁矿	4.0
8	BTBK14-10	含方解石黄铁矿磁铁矿绿泥石石榴子石矽卡岩	黄铁矿	3.6
9	BTBK14-11	含黄铁矿石石榴子石磁铁矿矿石	黄铁矿	3.0
10	BTBK14-12	含方解石磁铁矿黄铁矿石石榴子石矽卡岩	黄铁矿	3.6

在低于角闪岩相的变质作用过程中,稀土元素不会发生明显的迁移(王中刚等,1989),因其分布的特殊性和地球化学稳定性,故可用于研究矿床的物质来源和成矿过程氧化还原化学环境的演变。

巴特巴克布拉克铁矿床石榴子石单矿物的稀土元素配分模式为重稀土元素相对富集的左倾型,绿帘石单矿物的稀土元素配分模式为轻稀土元素相对富集的右倾型,而矽卡岩的全岩稀土元素配分模式介于二者之间,主要原因是矽卡岩由石榴子石和绿帘石组成,其稀土元素特征具有石榴子石和绿帘石单矿物的综合特征。多数矽卡岩表现为重稀土元素相对富集的左倾型,与石榴子石的配分模式相似,少数表现为轻稀土元素相对富集的右倾型,与绿帘石的配分模式相似。矿石稀土元素配分模式表现为重稀土元素相对富集的左倾型,与石榴子石和多数矽卡岩的配分模式相似,表明它们形成具有相关性。

Bau 等(1995)通过对德国 Tannenboden 和 Beihilfe 矿床中萤石和方解石的稀土元素研究,认为同源脉石矿物的 Y/Ho-La/Ho 大体呈水平分布,因为二者的离子半径非常接近,会表现出极为相似的地球化学行为,所以 Y/Ho 值应比较稳定。Bau 等(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 值为 28(Anders et al., 1989),但其化学行为在水溶液体系中则会发生分异。巴特巴克布拉克铁矿床的矽

卡岩、矿石和矽卡岩矿物的 Y/Ho 值分布于 26.2~33.2,接近球粒陨石中 Y/Ho 的值,表明矽卡岩和磁铁矿的形成与岩浆活动有关。在 $(La/Yb)_N-(La/Sm)_N$ 图解(图 6)中,斜长角闪岩、变粒岩、浅粒岩、矽卡岩、矿石和英云闪长岩表现出正相关性,表明它们的稀土元素组成具有成因联系,暗示矽卡岩和矿石的形成与围岩和英云闪长岩有关。

一般认为接触交代成因的矽卡岩稀土元素配分模式主要决定于岩浆岩(Michard, 1986; Bau, 1991; Boulvais et al., 2000; 赵劲松等, 2007)。矿区英云闪长岩稀土元素配分模式为轻稀土元素相对富集的右倾型,与赋矿围岩的稀土元素配分模式表现一致,矽卡岩和矿石的配分模式多表现为重稀土元素相对富集的左倾型,与英云闪长岩稀土元素配分模式不同,表明矽卡岩和矿石的稀土元素配分模式并非完全承袭侵入岩,其稀土元素配分模式是综合了围岩和岩浆热液稀土元素特征的结果。在 Y/Ho-La/Ho 图解(图 7)中,地层、矽卡岩矿物、矽卡岩、矿石和英云闪长岩呈现水平分布,表明它们具有同源性,有明显的成因联系。

5.2 成矿物质来源

10 件样品中黄铁矿硫同位素 $\delta^{34}S$ 变化于 1.4‰~4.8‰(表 2),平均为 3.57‰,接近幔源硫($0 \pm 3\%$, Hoefs, 1997)。在硫同位素直方图(图 8)中,大多数样品的 $\delta^{34}S$ 集中于 3‰~5‰之间,表明硫分馏程度比

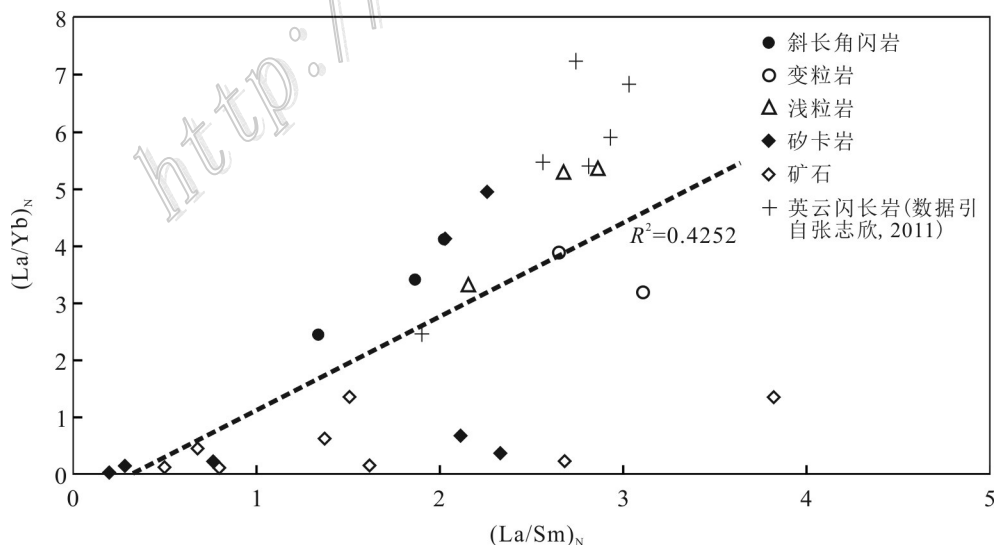


图 6 巴特巴克布拉克铁矿床斜长角闪岩、变粒岩、浅粒岩、矽卡岩、矿石和英云闪长岩 $(La/Yb)_N-(La/Sm)_N$ 图解

Fig. 6 $(La/Yb)_N-(La/Sm)_N$ diagram of amphibolites, leptynite, leucoleptite, skarns, ores and tonalite from the Batebakebulake iron deposit

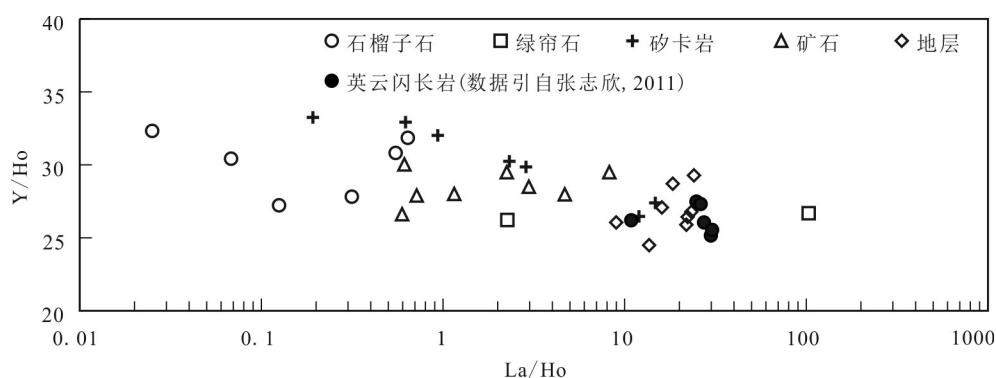


图7 巴特巴克布拉克铁矿床岩石、矿石及矿物的Y/Ho-La/Ho图

Fig. 7 Y/Ho-La/Ho diagram of rocks, ores and minerals from the Batebakebulake iron deposit

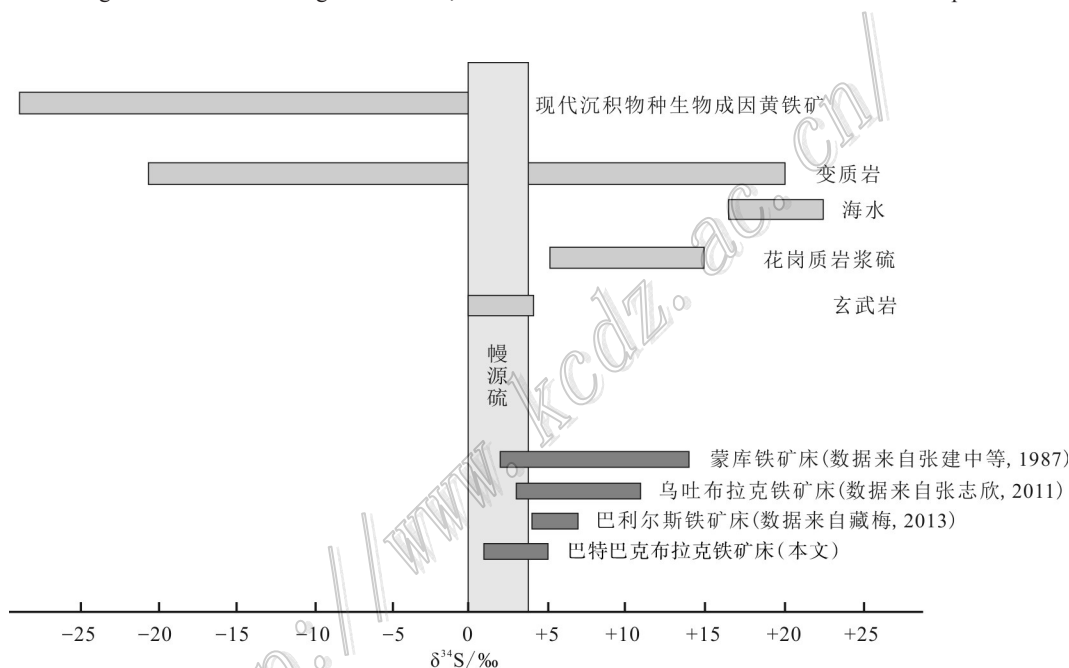


图8 巴特巴克布拉克铁矿床硫同位素直方图

Fig. 8 Histogram of sulfur isotope composition of sulfides from the Batebakebulake iron deposit

较低,也反映出硫源单一。Ohmoto等(1979)认为在矿物组合简单的情况下,矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值可代表热液的总硫值。巴特巴克布拉克铁矿的含硫矿物主要是黄铁矿,因此,黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 的平均值3.57‰可代表成矿热液 $\delta^{34}\text{S}$ 的值。蒙库铁矿、乌吐布拉克铁矿、巴利尔铁矿和巴特巴克布拉克铁矿的硫同位素分布如图8,这些矿床的硫同位素均发生了较大程度的分馏,表现出玄武岩硫、花岗质岩浆硫和变质岩硫同位素特征,且比较靠近幔源硫范围,因矿床均产于火山岩地层中,故硫不太可能来源于变质岩。巴特巴克布拉克铁矿床产于火山岩地层中,硫同位素主要

表现为玄武岩硫同位素特征,较接近幔源硫范围,因此认为矿床中的硫主要来源于岩浆,成矿物质来源于基性火山岩。

5.3 成矿热液地球化学环境

Eu属于变价元素,有 Eu^{2+} 、 Eu^{3+} 两种价态,通常以 Eu^{3+} 存在。当Eu在还原条件下主要以 Eu^{2+} 存在时,由于电荷数的减少和离子半径的相对增大,使Eu表现出不同于其他三价稀土元素的地球化学行为,在地质地球化学作用过程中与其他稀土元素发生分离,形成Eu的正异常或负异常(丁振举等,2003)。

矿区斜长角闪岩、变粒岩、浅粒岩稀土元素配分模式相似,均表现为轻稀土元素相对富集的右倾型,与英云闪长岩表现一致,区别在于斜长角闪岩没有强负铈异常,表明成矿热液为高温、还原环境,火山岩地层提供了部分铈元素,因为由比较基性的岩浆形成的岩石容易形成Eu正异常(赵劲松等,2007)。石榴子石、矿石和多数矽卡岩稀土元素配分模式表现为重稀土元素相对富集的左倾型,与围岩不同,铈表现出弱负-正异常,说明在其形成时铈元素以Eu³⁺存在,相对于Eu²⁺更容易保存下来,热液为弱还原-氧化环境,并且提供了部分铈元素。绿帘石的稀土元素配分模式为轻稀土元素相对富集的右倾型,与围岩类似,可能是继承了围岩的稀土元素特征。

Ce同样属于变价元素,分别是Ce⁴⁺和Ce³⁺两种价态。Ce⁴⁺的溶解度很小,易被氢氧化物吸附而脱离溶液体系,导致整个溶液体系亏损Ce,从而形成的矿物显示Ce负异常(刘淑文等,2013)。研究区中,多数矿石和矽卡岩中铈元素表现出微弱的负异常,铈出现了微弱的相对亏损,说明其应形成于氧化环境,铈以Ce⁴⁺赋存于成矿热液中,与其他三价稀土元素发生分离,形成微弱负异常。

综上所述,巴特巴克布拉克铁矿床应为矿区周边花岗质岩浆上侵,分异出岩浆热液交代火山岩地层所形成早期矽卡岩,随着矽卡岩的退化蚀变作用形成铁矿。矽卡岩和矿石形成于弱还原-氧化环境。

6 结 论

(1) 斜长角闪岩、变粒岩、浅粒岩和英云闪长岩稀土元素配分模式相似,表现为轻稀土元素相对富集的右倾型,矿石、矽卡岩稀土元素配分模式与它们不同,表现为重稀土元素相对富集的左倾型,稀土元素地球化学特征表明它们之间有明显的成因联系。

(2) $\delta^{34}\text{S}$ 变化于1.4‰~4.8‰,结合稀土元素地球化学特征,表明巴特巴克布拉克铁矿床的成矿物质来源于基性火山岩。

(3) 巴特巴克布拉克铁矿床为花岗质岩浆分异的岩浆热液交代火山岩形成的矽卡岩型矿床,矿床形成于弱还原-氧化环境。

致 谢 对审稿老师提出的宝贵修改建议,以及李强博士、任宇晨硕士、王雯硕士等在野外工作期

间的帮助,在此一并致以衷心的感谢。

References

- Anders E and Greves N. 1989. Abundances of the elements: Meteoritic and solar[J]. *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[J]. *Chemical Geology*, 93: 219-230.
- Bau M and Dulski P. 1995. Comparative study of yttrium and rare earth-element behaviours in fluorine-rich hydrothermal fluid[J]. *Contributions Mineralogy Petrology*, 119: 213-223.
- Bau M and Dulski P. 1996. Anthropogenic origin of positive gadolinium anomalies in river waters[J]. *Earth and Planetary, Science, Letters*, 143: 245-255.
- Bibikova Y E V, Kirnozova T I, Kozakov I K, Ktov A B, Neymark L A, Gorokhovskiy B M and Shshko I K. 1992. U-Pb ages for polymetamorphic complexes on the southern Flank of the Mongolian and Gobi Altai[J]. *Geotectonics*, 26(2): 166-172.
- Boulvais P, Fourcade S, Moine B, Gruau G and Cuney M. 2000. Rare-earth elements distribution in granulite-facies marbles: A witness of fluid-rock interaction[J]. *Lithos*, 53(2): 117-126.
- Chai F M, Yang F Q, Liu F, Geng X X, Zhang Z X and Chen B. 2012. Geochronology and genesis of meta-felsic volcanic rocks in the Kangbutiebao Formation from the Maizi Basin at the southern margin of the Altay, Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Geology*, 47 (1): 221-239(in Chinese with English abstract).
- Ding Z J, Yao S Z, Liu C Q, Zhou Z G and Yang M G. 2003. The characteristics of exhalation-dedimentary deposit of Donggouba polymetal deposit: Evidence from ore's REE composition[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 792-798(in Chinese with English abstract).
- He G Q, Cheng S D, Xu X, Li J Y and Hao J. 2004. An introduction to the explanatory text of the map of tectonics of Xinjiang and its neighbouring areas[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-65(in Chinese with English abstract).
- Hoefs J. 1997. Stable isotope geochemistry[M]. 4th Edition. Berlin: Springer Verlag. 1-250.
- Hong W, Zhang Z H, Jiang Z S, Li F M and Liu X Z. 2012. Magnetite and garnet trace element characteristics from the Chagangnuoer iron deposit in the western Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China: Constrain for ore genesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (7): 2089-2102(in Chinese with English abstract).
- Jahn B M. 1998. Continental growth in the Phanerozoic: Evidence from the East-Central Asia orogenic belt[C]. Urumqi: Abstracts of IGCP-420 First Workshop. 1-2.
- Klinkhammer G P, Elderfield H, Edmond J M and Mitra A. 1994. Geochemical implications of rare earth element patterns in hydrothermal fluid from mid-ocean ridges[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(23): 5105-5113.

- Liu S W, Shi S, Li R X, Gao Y B, Liu L F, Duan L Z, Chen B Y and Zhang S N. 2013. REE geochemistry of Mayuan Pb-Zn deposit on northern margin of Yangtze Plate[J]. *Mineral Deposits*, 32(5): 979-988(in Chinese with English abstract).
- Long L L, Wang J B, Wang Y W, Wang L J, Liao Z, Zhao L T, Sun Z Y and Gao L M. 2015. Sulfur-isotope characteristics and discussion on the source of ore-forming material of the Xilekuduke Cu-Mo deposit, Xinjiang Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(2): 545-554(in Chinese with English abstract).
- Michard A, Albarède F, Michard G, Minster J F and Charlou J L. 1983. Rare-earth elements and uranium in high-temperature solutions from East Pacific Rise hydrothermal vent field(13°N) [J]. *Nature*, 303: 795-797.
- Michard A and Albarède F. 1986. The REE content of some hydrothermal fluid[J]. *Chemical Geology*, 55: 51-60.
- Mills R A and Elderfield H. 1995. Rare earth element geochemistry of hydrothermal deposits from the active TAC Mound, 26°N mid-Atlantic Ridge[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(17): 3511-3524.
- Ohmoto H and Rye R O. 1979. Isotopes of sulfur and carbon[A]. In: Barnes H L, ed. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*[C]. New York: John Wiley and Sons. 509-567.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society London Special Publications*, 42: 313-345.
- Tong Y, Wang T, Hong D W, Dai Y J, Han B F and Liu X M. 2007. Ages and origin of the early Devonian granites from the north part of Chinese Altai mountains and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1933-1944(in Chinese with English abstract).
- Wan B and Zhang L C. 2006. Sr-Nd-Pb isotope geochemistry and tectonic setting of Devonian polymetallogenic belt on the southern margin of Altaid, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 145-152(in Chinese with English abstract).
- Wang T, Hong D W, Jahn B M, Tong Y, Wang Y B, Han B F and Wang X X. 2006. Timing, petrogenesis, and setting of Paleozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountains, northwest China: Implications for the tectonic evolution of an accretionary orogen[J]. *The Journal of Geology*, 114(6): 735-751.
- Wang Y W, Wang J B, Wang S L, Ding R F and Wang L J. 2003. Geology of the Mengku iron deposit, Xinjiang, China: A metamorphosed VMS[A]? In: Mao J W, Goldfarb R J, Seltmann R, Wang D H, Xiao W J and Hart C, eds. *Tectonic evolution and metallogeny of the Chinese Altai and Tianshan*[C]. Centre for Russian and Central Asian Mineral Studies, Natural History Museum, London. 181-200.
- Wang Z G, Yu X Y and Zhao Z H et al. 1989. Geochemistry of rare earth elements[M]. Beijing: Science Press. 1-535(in Chinese).
- Xu L G, Mao J W, Yang F Q, Ye H S, Zheng J M, Li J G, Cai Y B, Zha X L and Gao J J. 2007a. Skarn mineral characteristics of Mengku iron deposit in Xinjiang and their geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 26(4): 455-463(in Chinese with English abstract).
- Xu L G, Yang F Q, Li J G, Cai Y B, Zheng J M and Huang C L. 2007b. Geology and geochemistry of the Mengku iron deposit, Fuyun County, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2653-2664 (in Chinese with English abstract).
- Xu L G, Mao J W, Yang F Q, Daniel H and Zheng J M. 2010. Geology, geochemistry and age constraints on the Mengku skarn iron deposit in Xinjiang Altai, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(5): 423-440.
- Yang F Q, Mao J W, Xu L G, Zhang Y, Liu F, Huang C L, Zhou G, Liu G R and Dai J Z. 2007. REE geochemistry of the Mengku iron deposit, Xinjiang, and its indication for iron mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2443-2456(in Chinese with English abstract).
- Yang F Q, Mao J W, Chai F M, Liu F, Zhou G, Geng X X, Liu G R and Xu L G. 2008a. Ore-forming fluids and metallogenesis of Mengku iron deposit in Altai, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 27(6): 659-680(in Chinese with English abstract).
- Yang F Q, Mao J W, Yan S H, Liu F, Chai F M, Zhou G, Liu G R, He L X, Geng X X and Dai J Z. 2008b. Geochronology, geochemistry and geological implications of the Mengku synorogenic plagiogranite pluton in Altai, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 485-499(in Chinese with English abstract).
- Yang F Q, Liu F, Chai F M, Zhang Z X, Geng X X, Lu S J, Jiang L P and Ouyang L J. 2011. Iron deposit in Altai, Xinjiang: Geological characteristics, time-space distribution and metallogenesis[J]. *Mineral Deposits*, 30(4): 575-598(in Chinese with English abstract).
- Yang J J, Chai F M, Yang F Q and Zhang Z X. 2015. Metallogenesis of Batebakebulake iron deposit in Altai, Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Geology*, 50(3): 879-897(in Chinese with English abstract).
- Yang J J, Yang F Q, Chai F M and Baletabieke Bahedaer. 2016. Skarn mineral characteristics of Batebakebulake iron deposit in Altai, Xinjiang, and their geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 35(4): 758-774(in Chinese with English abstract).
- Zang M. 2013. The study on mineralization mechanism of the Baliersi iron deposit in the southern of Altai, Xinjiang(dissertation for master degree)[D]. Supervisor: Dong L H. Xinjiang: Xinjiang University. 1-75(in Chinese with English abstract).
- Zang M, Dong L H, Chai F M, Yang F Q, Liu F, Li Q and Ouyang L J. 2013. Research on REE geochemistry of the Baliersi iron deposit in Altai, Xinjiang[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(2): 203-212(in Chinese with English abstract).
- Zhang J Z, Feng B H, Jin H J, Liu B, Luo Y P, Jin Z M, Zhu M Z and Chen S Z. 1987. The genetic relationship between marine volcanic rocks and iron deposits at Abagong-mengku area, Altai district, Xinjiang and ore-forming geological features[J]. *Bulletin of the Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, the Chinese Academy of Geological Sciences*, 20: 89-180(in Chinese with English abstract).

- Zhang L W, Liu Z J, Wu J X, Qiao C G, Fu S, Guo M X and Zhi Y W. 2010. Report on the verification of mineral resources in the Batebakebulake iron deposit, Fuyun County, Xinjiang[R]. 1-41(in Chinese).
- Zhang T L, Zang M, Qin J H, Zhao Z H and He L X. 2013. Characteristics of skarn mineral from Baliersi iron deposit in Altay, Xinjiang, and its geological significance[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 33(4): 7-16(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z X. 2011. The study on mineralization mechanism of the Wutubulake iron deposit in the southern of Altay, Xinjiang(dissertation for master degree) [D]. Supervisor: Yang F Q. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences. 1-135(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z X, Yang F Q, Chai F M, Liu F, Geng X X, Lü S J, Jiang L P, Zhong T Z and Ouyang L J. 2011a. A study of REE geochemistry of Wutubulake iron deposit in Altay, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 30(1): 87-102(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z X, Yang F Q, Chai F M, Liu F, Geng X X, Lü S J, Jiang L P and Zhong T Z. 2011b. Study on chronology and genesis of granite in the Wutubulake iron deposit district, southern Margin of Altay[J]. Geological Review, 57(3): 350-365(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z X, Yang F Q, Liu F, Chai F M, Geng X X, Ouyang L J, Jiang L P and Lü S J. 2012. Study on the ore-forming mechanism of the Wutubulake iron deposit in the southern of Altay, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(7): 2403-2056(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z Y, Du Y S, Xiang W S, Teng C Y, Long W S, Dong Y C and Li X L. 2012. Genesis of Anqing copper-iron deposit, Anhui Province: Constraints from mineral deposit geology and element geochemistry[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(11): 3739-3756(in Chinese with English abstract).
- Zhao J S, Qiu X L, Zhao B, Tu X L, Yu J and Lu T S. 2007. REE geochemistry of mineralized skarns from Daye to Wushan region, China[J]. Geochimica, 36(4): 400-412(in Chinese with English abstract).
- Zheng C Q, Xu X C, Kato Takenori and Enami Masaki. 2007. Permian CHIME ages of monazites for the Kyanite-Sillimanite type metamorphic belt in Chonghuer area, Altai, Xinjiang and their geological implications[J]. Geological Journal of China Universities, 13(3): 566-573(in Chinese with English abstract).
- Zhuang Y X. 1994. Tectonothermal evolution in space and time and orogenic process of Altay, China[M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press. 70-106(in Chinese).
- 丁振举, 姚书振, 刘丛强, 周宗桂, 杨明国. 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.
- 何国琦, 成守德, 徐新, 李锦轶, 郝杰. 2004. 中国新疆及邻区大地构造图(1:2 500 000)说明书[M]. 北京: 地质出版社. 1-65.
- 洪为, 张作衡, 蒋宗胜, 李凤鸣, 刘兴忠. 2012. 新疆西天山查岗诺尔铁矿床磁铁矿和石榴石微量元素特征及其对矿床成因的制约[J]. 岩石学报, 28(7): 2089-2102.
- 刘淑文, 石顺, 李荣西, 高云宝, 刘玲芳, 段立志, 陈宝赞, 张少妮. 2013. 扬子板块北缘马元铅锌矿床稀土元素地球化学研究[J]. 矿床地质, 32(5): 979-988.
- 龙灵利, 王京彬, 王玉往, 王莉娟, 廖震, 赵路通, 孙志远, 高立明. 2015. 新疆希勒库都克铜钼矿床硫同位素特征及成矿物质来源探讨[J]. 岩石学报, 31(2): 545-554.
- 童英, 王涛, 洪大卫, 代雅建, 韩宝福, 柳晓明. 2007. 中国阿尔泰北部山区早泥盆世花岗岩的年龄、成因及构造意义[J]. 岩石学报, 23(8): 1933-1944.
- 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[J]. 岩石学报, 22(1): 145-152.
- 王中刚, 于学元, 赵振华, 等. 1989. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社. 1-535.
- 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. 2007a. 新疆蒙库铁矿床砂卡岩矿物学特征及其意义[J]. 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. 2007b. 新疆富蕴县蒙库铁矿地质地球化学特征[J]. 岩石学报, 23(10): 2653-2664.
- 杨富全, 毛景文, 徐林刚, 张岩, 刘锋, 黄成林, 周刚, 刘国仁, 代军治. 2007. 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[J]. 岩石学报, 23(10): 2443-2456.
- 杨富全, 毛景文, 柴凤梅, 刘锋, 周刚, 耿新霞, 刘国仁, 徐林刚. 2008a. 新疆阿尔泰蒙库铁矿床成矿流体及成矿作用[J]. 矿床地质, 27(6): 659-680.
- 杨富全, 毛景文, 闫升好, 刘锋, 柴凤梅, 周刚, 刘国仁, 何立新, 耿新霞, 代军治. 2008b. 新疆阿尔泰蒙库同造山斜长花岗岩年代学、地球化学及其地质意义[J]. 地质学报, 82(4): 485-499.
- 杨富全, 刘锋, 柴凤梅, 张志欣, 耿新霞, 吕书君, 姜丽萍, 欧阳刘进. 2011. 新疆阿尔泰铁矿: 地质特征、时空分布及成矿作用[J]. 矿床地质, 30(4): 575-598.
- 杨俊杰, 柴凤梅, 杨富全, 张志欣. 2015. 新疆阿尔泰巴特巴克布拉克铁矿床成矿作用研究[J]. 地质科学, 50(3): 879-897.
- 杨俊杰, 杨富全, 柴凤梅, 巴合达尔·巴勒塔别克. 2016. 新疆阿尔泰巴特巴克布拉克铁矿床砂卡岩矿物特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 35(4): 758-774.
- 藏梅. 2013. 新疆阿尔泰南缘巴利尔斯铁矿床成矿机制研究(硕士论文)[D]. 导师: 董连慧. 新疆: 新疆大学. 1-75.
- 藏梅, 董连慧, 柴凤梅, 杨富全, 刘锋, 李强, 欧阳刘进. 2013. 新疆阿尔泰南缘巴利尔斯铁矿床稀土元素地球化学研究[J]. 地球学报, 34(2): 203-212.
- 张建中, 冯秉寰, 金浩甲, 刘斌, 罗玉鹏, 金志明, 朱美珠, 陈书章. 1987. 新疆阿勒泰阿巴宫-蒙库海相火山岩与铁矿的成生关系

附中文参考文献

- 柴凤梅, 杨富全, 刘锋, 耿新霞, 张志欣, 陈斌. 2012. 阿尔泰南缘麦兹盆地康布铁堡组变质酸性火山岩年龄及岩石成因[J]. 地质科学, 47(1): 221-239.

- 及成矿地质特征[J]. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, 20: 89-180.
- 张立武, 刘振江, 吴建新, 乔成刚, 付森, 郭明欣, 支有文. 2010. 新疆富蕴县巴特巴克布拉克铁矿核查矿区资源储量核查报告[R]. 1-41.
- 张同良, 藏梅, 秦纪华, 赵忠合, 何立新. 2013. 新疆阿尔泰巴利尔斯铁矿床矽卡岩矿物特征及其地质意义[J]. 矿物岩石, 33(4): 7-16.
- 张志欣. 2011. 新疆阿尔泰南缘乌吐布拉克铁矿床成矿机制研究(硕士论文)[D]. 导师: 杨富全. 北京: 中国地质科学院. 1-135.
- 张志欣, 杨富全, 柴凤梅, 刘锋, 耿新霞, 吕书君, 姜丽萍, 钟天智, 欧阳刘进. 2011a. 新疆阿尔泰乌吐布拉克铁矿床稀土元素地球化学研究[J]. 矿床地质, 30(1): 87-102.
- 张志欣, 杨富全, 柴凤梅, 刘锋, 耿新霞, 吕书君, 姜丽萍, 钟天智. 2011b. 阿尔泰南缘乌吐布拉克铁矿区花岗质岩石年代学及成因[J]. 地质论评, 57(3): 350-365.
- 张志欣, 杨富全, 刘锋, 柴凤梅, 耿新霞, 欧阳刘进, 姜丽萍, 吕书君. 2012. 新疆阿尔泰南缘乌吐布拉克铁矿成矿机制研究[J]. 岩石学报, 28(7): 2043-2056.
- 张智宇, 杜杨松, 向文帅, 滕传耀, 龙旺生, 董玉翠, 李湘莲. 2012. 安徽安庆铜铁矿床成因: 矿床地质特征与元素地球化学约束[J]. 岩石学报, 28(11): 3739-3756.
- 赵劲松, 邱学林, 赵斌, 涂湘林, 虞珏, 芦铁山. 2007. 大冶-武山矿化夕卡岩的稀土元素地球化学研究[J]. 地球化学, 36(4): 400-412.
- 郑常青, 徐学纯, Takenori Kato, Masaki Enami. 2007. 新疆阿尔泰冲乎尔地区蓝晶石-夕线石型变质带独居石 CHIME 二叠纪年龄及其地质意义[J]. 高校地质学报, 13(3): 566-573.
- 庄育勋. 1994. 中国阿尔泰造山带热动力时空演化和造山过程[M]. 长春: 吉林科学技术出版社. 70-106.

<http://www.kcdz.ac.cn/>