

新疆阿尔泰山南缘巴利尔斯铁矿床稀土元素 地球化学研究

藏 梅¹⁾, 董连慧²⁾, 柴凤梅^{1)*}, 杨富全³⁾, 刘 锋³⁾, 李 强³⁾, 欧阳刘进¹⁾

1)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;

2)新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局, 新疆乌鲁木齐 830000;

3)中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点开放实验室, 北京 100037

摘 要: 巴利尔斯铁矿是阿尔泰山南缘麦兹盆地新近发现的中型铁矿床。赋存于上志留—下泥盆统康布铁堡下亚组第二岩性段变粒岩、浅粒岩及斜长角闪岩中, 矿体及其周围发育大量矽卡岩矿物。本文对矿体围岩、矽卡岩矿物和矿石进行了稀土元素地球化学研究, 结果表明磁铁矿矿石、矽卡岩与围岩斜长角闪岩的 REE 特征具有相似性, 暗示磁铁矿矿石与矽卡岩具有亲缘性, 斜长角闪岩可能提供部分成矿物质。矽卡岩和矿石发育 Eu 正异常及所有矿石的负 Ce 异常, 表明铁成矿作用发生在高温氧化环境。

关键词: 稀土; 矽卡岩; 铁矿床; 巴利尔斯; 阿尔泰山

中图分类号: P618.31; P618.7; P595 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2013.02.07

Research on REE Geochemistry of the Baliarsi Iron Deposit in Altay, Xinjiang

ZANG Mei¹⁾, DONG Lian-hui²⁾, CHAI Feng-mei^{1)*}, YANG Fu-quan³⁾, LIU Feng³⁾, LI Qiang³⁾, OUYANG Liu-jin¹⁾

1) Xinjiang Key Laboratory for Geodynamic Processes and Metallogenic Prognosis of the Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046;

2) Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Urumqi, Xinjiang 830000;

3) MRL Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: The Baliarsi iron deposit is located in Maizi Basin on the southern margin of Altay orogenic belt. The ore bodies are hosted in the metamorphosed volcanoclastic-sedimentary rocks of the Upper Silurian-Lower Devonian Kangbutiebao Formation. The ore bodies are largely concordant with the bedding of the strata, and the wall rocks are amphibolite, leptynite and leptyte. Abundant skarn minerals such as garnet, diopside, amphibole, epidote and chlorite are widely distributed around the ore bodies. The REE characteristics of skarn, magnetite ore and amphibolite are similar to each other, indicating that skarn and magnetite ore have close relationship, and amphibolite might have provided part of metallogenic materials. Skarn and most ores have obvious Eu positive

本文由国土资源部公益性行业科研专项经费项目(编号: 200911007-06)和“十二五”国家科技支撑计划项目(编号: 2011BAB06B03-02)联合资助。

收稿日期: 2012-11-25; 改回日期: 2013-02-21。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 藏梅, 女, 1986 年生。硕士研究生。主要从事矿床地质、地球化学研究。通讯地址: 830046, 乌鲁木齐延安南路 1230 号。

E-mail: xzangm@163.com。

*通讯作者: 柴凤梅, 女, 1971 年生。教授。主要从事矿物学、岩石学、矿床学研究。通讯地址: 830046, 乌鲁木齐延安南路 1230 号。

E-mail: chaifengmei@163.com。

anomalies and Ce negative anomalies, implying that mineralization took place at high temperature and in an oxidation environment.

Key words: REE geochemistry; skarn; iron deposit; Bliersi; Altay

阿尔泰山南缘是我国重要的多金属成矿带, 大部分的铁、铜、金以及铅锌矿等产于阿舍勒、冲乎尔、克朗和麦兹四个火山沉积盆地。其中麦兹盆地是最重要的铁矿集区, 已发现了蒙库大型铁矿、乌吐布拉克中型铁矿、巴拉巴克布拉克中型铁矿、巴利尔斯中型铁矿等。这些铁矿体均赋存于上志留一下泥盆统康布铁堡组变质火山沉积岩系中, 大致顺地层产出, 但矿体周围又发育大量的矽卡岩矿物。前人对该区的蒙库铁矿床和乌吐布拉克铁矿床做了大量的工作, 但对它们的成因尚存在较大争议, 有矽卡岩型、火山喷流沉积型、火山喷流沉积+叠加改造型、海相火山岩型等不同认识(张建中等, 1987; 仇仲学, 2003; Wang et al., 2003; 李嘉兴等, 2003; 胡兴平, 2004; 杨富全等, 2007; 张志欣等, 2011a)。富蕴县巴利尔斯铁矿发现于 2002 年, 目前该矿床尚未开展系统研究, 这在一定程度上制约了矿区深部找矿工作。本文对巴利尔斯铁矿的火山岩、矽卡岩、矿石进行了稀土元素分析, 以期探讨它们之间的成因关系, 为成矿机制探讨提供新资料。

巴利尔斯铁矿床位于新疆阿尔泰山南缘的麦兹火山沉积盆地, 大地构造位置为晚古生代活动陆缘(何

国琦, 2004; 童英等, 2005; 刘锋等, 2008; 刘国仁等, 2010)。盆地内出露有中—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-滨海相碎屑沉积岩建造。康布铁堡组主要由中等变质海相火山熔岩、火山碎屑岩, 以及少量陆源碎屑岩和碳酸盐岩组成。阿勒泰镇组为一套中浅变质浅海相复理石建造。盆地内构造活动比较强烈, 断裂和褶皱发育, 主要有麦兹复式向斜、蒙克木背斜、巴特巴克布拉克向斜、铁热克萨依向斜, 巴寨、可依洛甫、沙尔布拉克等区域大断裂。侵入岩主要有早—中泥盆世花岗岩岩株和基性-酸性岩脉(童英等, 2007; 杨富全等, 2008; 张志欣等, 2011b)。盆地内发育了蒙库大型铁矿和可可塔勒大型铅锌矿等。

1 矿床地质特征

1.1 矿区地层及侵入岩

矿区出露的地层主要为上志留一下泥盆统康布铁堡组下亚组的第二岩性段、第三岩性段和上亚组的第一岩性段。其中第二岩性段分布于矿区北东部, 为磁铁变粒岩、浅粒岩, 夹少量角闪更长片麻岩、

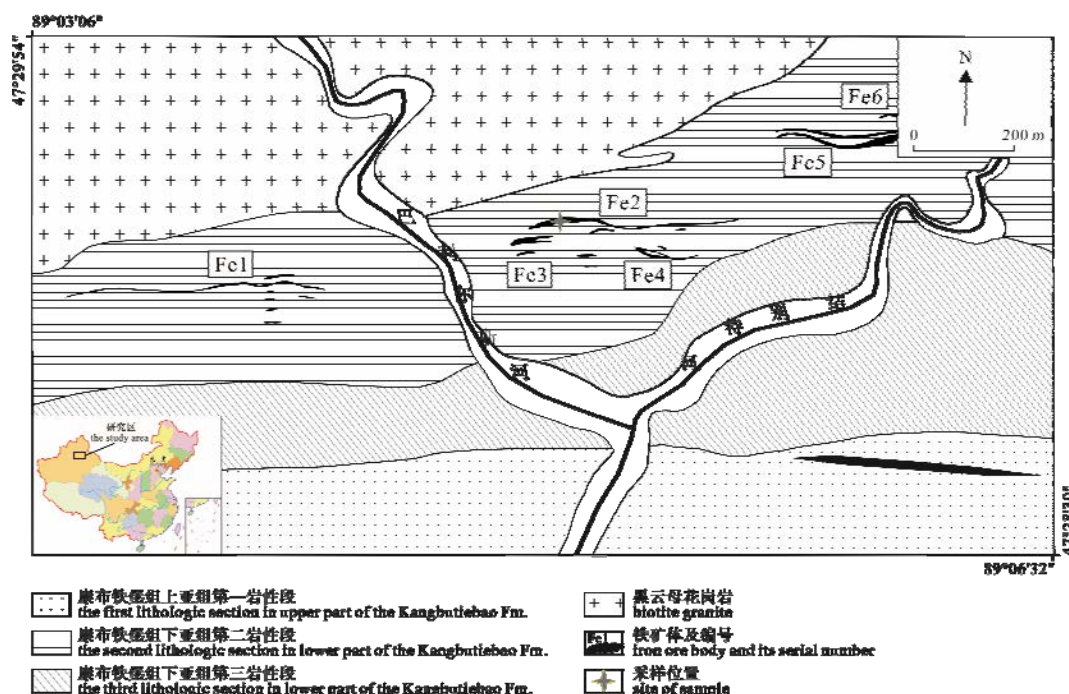


图 1 巴利尔斯铁矿地质略图(厉小钧等, 2006 修编)

Fig. 1 Geological map of the Bliersi iron ore district (modified after LI et al., 2006)

斜长角闪岩和黑云母变粒岩等, 巴利尔斯铁矿体位于该层位。第三岩性段分布于矿区中部, 主要为黑云母变粒岩、浅粒岩, 夹少量黑云母片岩。上亚组第一岩性段为变质凝灰质砂岩、变质钙质长石石英砂岩、变质泥质粉砂岩、变质粉砂岩、黑云母片岩夹大理岩透镜体(图 1)。

矿区北东部分布有中泥盆世也根拜黑云母花岗岩, 其年龄为 385~388 Ma(张志欣等, 2011b)。该岩体空间分布受控于断裂构造。

1.2 矿体及矿石特征

巴利尔斯铁矿带长约 5 km, 宽 0.4 km, 可分为北、南两个矿化带。矿体以似层状、透镜状赋存于矽卡岩、变粒岩、浅粒岩及斜长角闪岩中。其中 2 号矿体是最主要的矿体, 位于矿带中部。矿石构造主要以致密块状、条带状构造为主, 浸染状和团块状构造次之, 主要为自形-半自形中粗粒结构, 也见交代结构。矿石矿物主要有磁铁矿, 偶见黄铁矿、黄铜矿等, 脉石矿物主要有透辉石、石榴石, 其次为绿帘石、角闪石、绿泥石、石英及方解石等。块状矿石的脉石矿物为石榴石(图 2A); 条带状矿石的脉石矿物以透辉石为主, 透辉石与磁铁矿以条带状相

互排列, 磁铁矿与透辉石接触的部位分布有角闪石(图 2B); 团块状矿石中的磁铁矿一般以 3~10 cm 团块产于石榴石或者透辉石矽卡岩中(图 2C); 浸染状矿石磁铁矿通常以稠密浸染状产于透辉石矽卡岩中, 并见磁铁矿交代透辉石(图 2D)。

1.3 热液蚀变及成矿期次划分

巴利尔斯铁矿床围岩蚀变主要以矽卡岩化为主。矽卡岩主要有石榴石矽卡岩、透辉石矽卡岩、透辉石绿帘石矽卡岩和绿泥石角闪石矽卡岩。石榴石矽卡岩中石榴石多为半自形-它形粒状, 部分晶体呈现环带(图 3A); 透辉石干涉色鲜艳, 自形-它形短柱状; 绿帘石以粒状为主, 个别有姜黄异常干涉色(图 3B)。角闪石较自形, 绿泥石以片状为主, 呈现蓝绿色; 可见绿帘石交代透辉石、磁铁矿交代透辉石的残余、磁铁矿交代石榴石形成的港湾(图 3C、3D), 并见有石英及方解石交代石榴石、磁铁矿及绿帘石(图 3E、3F)。

根据矿体特征、穿插关系、矿物共生组合、生成顺序及矿石组构等特征, 将矿床成矿过程大致划分为三个阶段: 矽卡岩阶段、退化蚀变阶段和石英硫化物阶段。矽卡岩阶段主要形成石榴石、透辉石

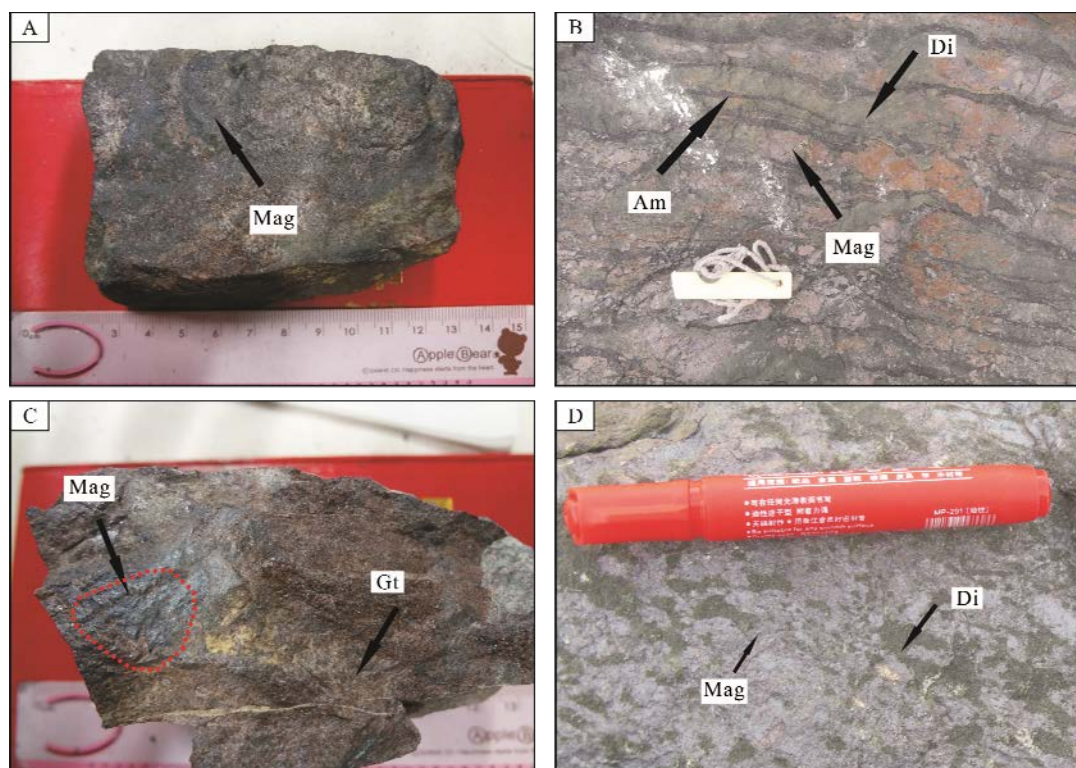


图 2 巴利尔斯铁矿矿石特征

Fig. 2 Features of ores from the Baliersi iron deposit

A-块状磁铁矿矿石; B-条带状磁铁矿矿石; C-团块状磁铁矿矿石; D-浸染状磁铁矿矿石;

Mag-磁铁矿; Am-角闪石; Di-透辉石; Gt-石榴石

A-Massive magnetite ore; B-Banded ore; C-Magnetite ore in the form of lumps; D-disseminated structure ore;

Mag-magnetite; Am-amphibole; Di-diopside; Gt-garnet

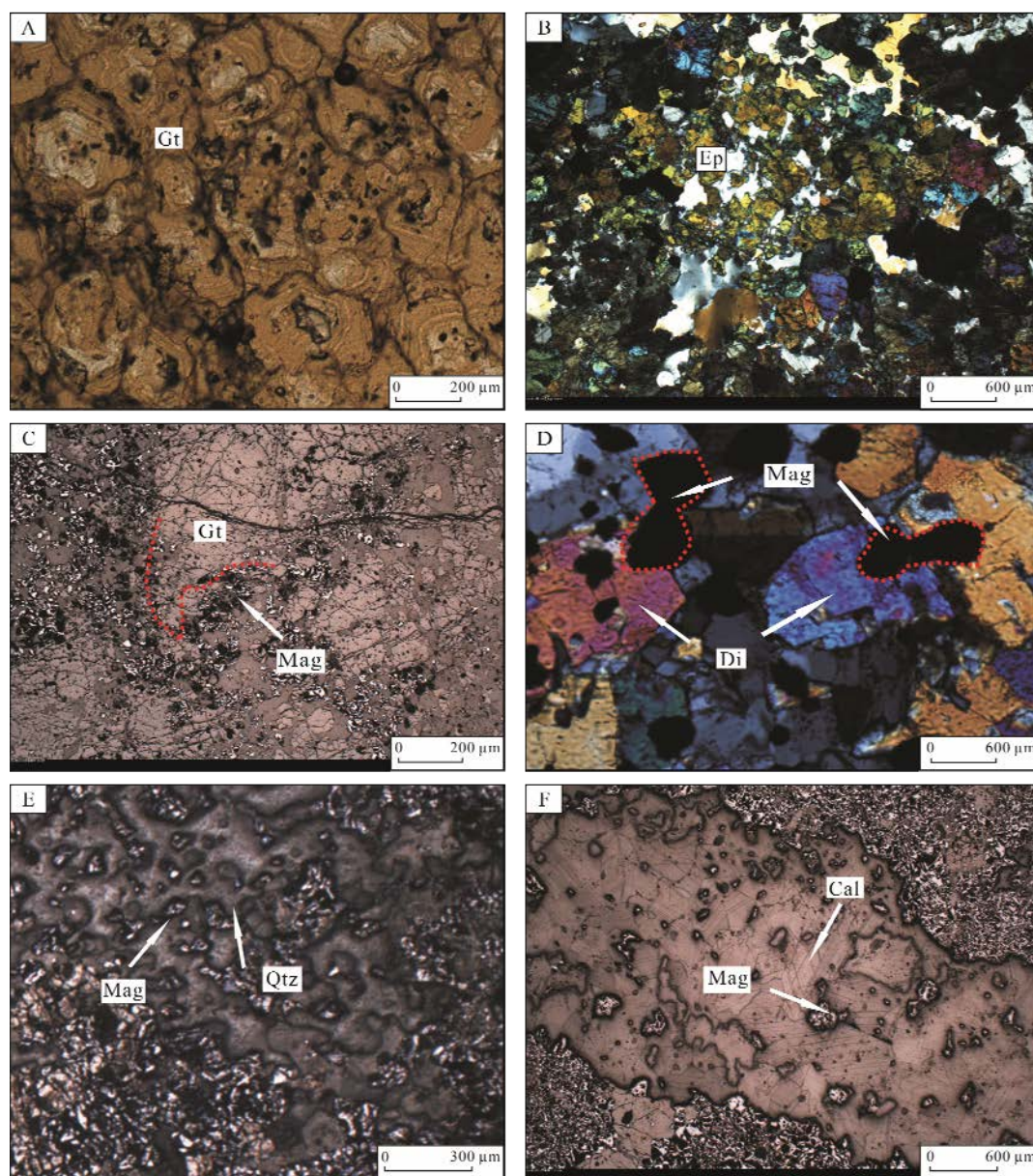


图 3 矽卡岩矿物及与磁铁矿之间的关系

Fig. 3 Skarn minerals and the relationship between skarn minerals and magnetite

A-具有环带结构的石榴石矽卡岩; B-绿帘石矽卡岩; C-磁铁矿交代石榴石形成港湾结构; D-磁铁矿交代透辉石; E-石英交代磁铁矿; F-方解石交代磁铁矿; Gt-石榴石; Ep-绿帘石; Mag-磁铁矿; Di-透辉石; Qtz-石英; Cal-方解石
A-garnet skarns with zonal structure; B-epidote skarns; C-magnetite has been metasomated by garnet with harbor structure; D-magnetite has been metasomated by diopside; E-magnetite has been metasomated by quartz; F-magnetite has been metasomated by calcite; Gt-garnet; Ep-epidote; Di-diopside; Mag-magnetite; Qtz-quartz; Cal-calcite

等无水矽卡岩矿物; 退化蚀变阶段主要形成绿帘石、绿泥石、角闪石、磁铁矿等, 是铁矿的主要成矿阶段; 石英硫化物阶段形成石英、方解石、黄铁矿、黄铜矿等。

2 样品及分析方法

本次研究的 18 件样品采自巴利尔斯铁矿 2 号矿体, 其中火山岩围岩 9 件(斜长角闪岩 3 件、变粒岩 3 件、浅粒岩 3 件)、矽卡岩 3 件(石榴石矽卡

岩 1 件、绿帘石矽卡岩 2 件)、磁铁矿矿石 6 件(条带状、浸染状的透辉石(不含石榴石)磁铁矿矿石 2 件、团块状含石榴石磁铁矿矿石 3 件、块状磁铁矿矿石 1 件)。

18 件样品首先进行清洗、粉碎、缩分, 然后将样品在玛瑙研钵中研磨至 200 目以下粉末备用。稀土元素分析在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成, 分析仪器为等离子质谱 X-series, 执行标准为 DZ/T 0223—2001, 分析误差小于 5%。

3 稀土元素分析结果

18 件样品稀土元素分析结果见表 1。

斜长角闪岩: 3 件斜长角闪岩的 ΣREE 变化微小($183.63 \times 10^{-6} \sim 187.67 \times 10^{-6}$), 平均为 185.03×10^{-6} 。LREE 相对较富集($\text{LREE}/\text{HREE}=3.28 \sim 3.31$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=2.42 \sim 2.68$), LREE 和 HREE 内部分异不明显($(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=1.40 \sim 1.41$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}=1.51 \sim 1.71$)。Eu 异常与 Ce 异常均不明显($\delta\text{Eu}=0.90 \sim 0.98$, $\delta\text{Ce}=1.01 \sim 1.02$)(图 4A)。

变粒岩: 3 件变粒岩的 ΣREE 变化较大($178.64 \times 10^{-6} \sim 280.56 \times 10^{-6}$), 平均为 227.27×10^{-6} 。LREE 相对较富集($\text{LREE}/\text{HREE}=5.42 \sim 8.47$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=4.61 \sim 8.84$)。LREE 内部元素发生了分异($(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=2.58 \sim 2.85$), HREE 内部基本无分异

(($\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}=1.36 \sim 1.92$)。样品具有中等程度的 Eu 负异常($\delta\text{Eu}=0.48 \sim 0.51$)和弱 Ce 正异常($\delta\text{Ce}=1.05 \sim 1.20$)(图 4B)。

浅粒岩: 与斜长角闪岩和变粒岩相比, ΣREE 相对较低($40.83 \times 10^{-6} \sim 63.09 \times 10^{-6}$), 平均为 51.02×10^{-6} 。3 件样品具有相似的 LREE 富集的配分曲线, LREE 内部分异不大($(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=1.15 \sim 1.85$), 轻重稀土分异也不明显($\text{LREE}/\text{HREE}=1.06 \sim 2.02$), 3 件样品具有明显的 Eu 负异常($\delta\text{Eu}=0.38 \sim 0.66$), 样品 bls68 无明显 Ce 异常($\delta\text{Ce}=0.97$), bls69 具有弱的 Ce 正异常($\delta\text{Ce}=1.25$), bls70 具有弱的 Ce 负异常($\delta\text{Ce}=0.79$)(图 4C)。

矽卡岩: 3 件矽卡岩的 ΣREE 变化较大, 绿帘石矽卡岩(bl56、bl57)的 ΣREE 为 300.83×10^{-6} 和 327.01×10^{-6} , 石榴石矽卡岩(bl58)的 ΣREE 为

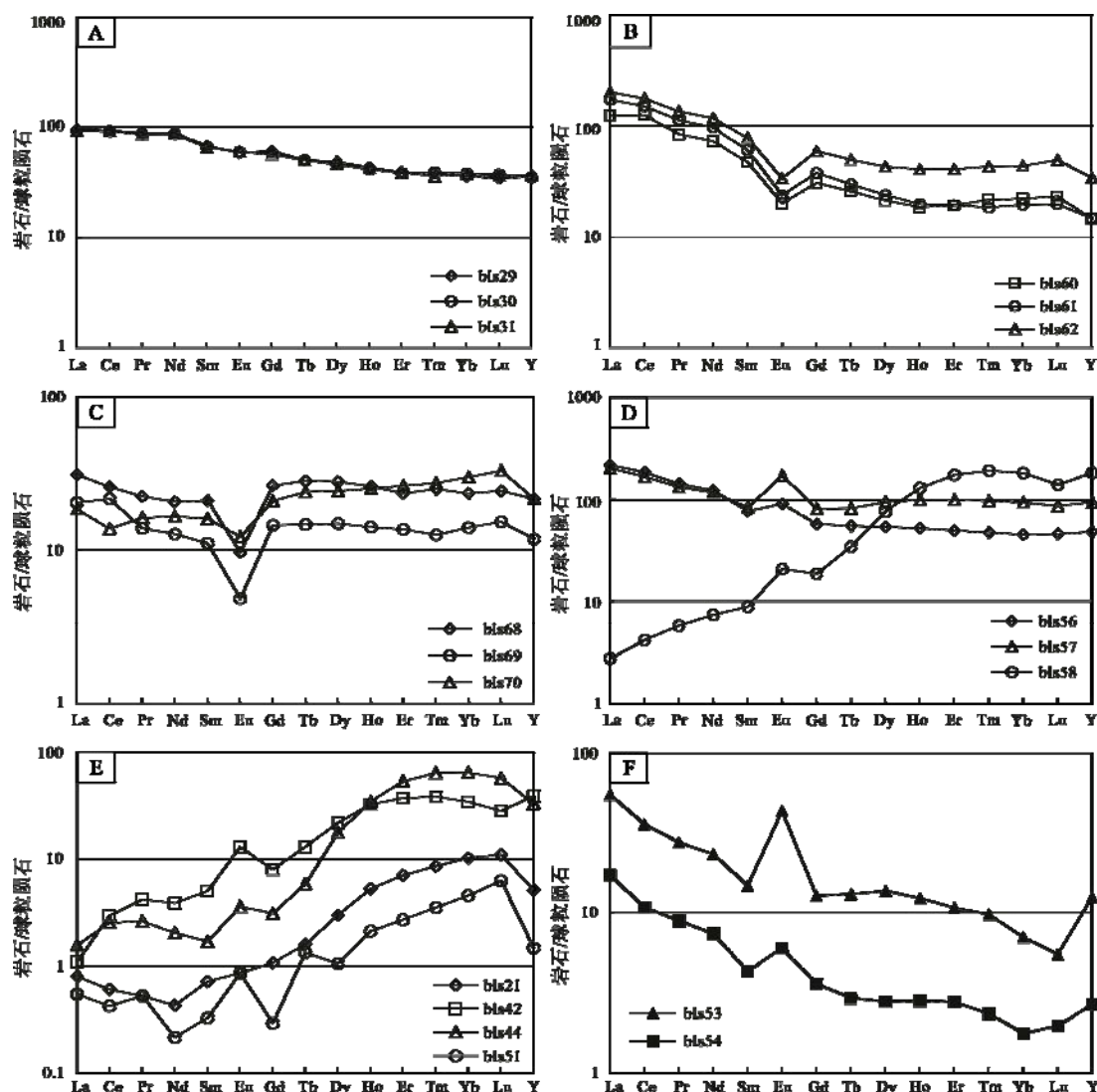


图 4 巴利尔斯铁矿围岩、矽卡岩及矿石的稀土配分模式(球粒陨石标准据 Sun et al., 1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns of wall rocks, skarns and ores from the Bailsi iron deposit (normalized chondrite value after Sun et al., 1989)

表 1 巴利尔斯铁矿床围岩及矿石稀土元素组成/ 10^{-6} Table 1 REE composition/ 10^{-6} of wall rocks and ores from the Baliarsi iron deposit

样号	bls29	bls30	bls31	bls60	bls61	bls62	bls68	bls69	bls70
岩性	斜长角闪岩	斜长角闪岩	斜长角闪岩	变粒岩	变粒岩	变粒岩	浅粒岩	浅粒岩	浅粒岩
La	22.80	21.90	22.00	29.60	40.90	47.60	7.38	4.86	4.39
Ce	57.50	56.30	56.30	76.80	91.90	108.00	15.90	13.20	8.47
Pr	8.45	8.29	8.26	7.98	10.70	12.80	2.13	1.32	1.55
Nd	41.20	40.60	41.00	34.10	45.00	54.60	9.67	5.97	7.75
Sm	10.50	10.10	10.10	7.24	9.25	11.90	3.23	1.70	2.46
Eu	3.41	3.48	3.49	1.16	1.37	1.94	0.56	0.28	0.71
Gd	12.60	12.20	11.70	6.27	7.72	12.20	5.44	3.00	4.30
Tb	1.90	1.89	1.89	0.96	1.11	1.85	1.06	0.55	0.90
Dy	12.40	11.70	11.90	5.40	6.06	10.90	7.10	3.79	6.17
Ho	2.46	2.35	2.43	1.05	1.12	2.30	1.48	0.80	1.43
Er	6.48	6.38	6.46	3.18	3.20	6.72	3.89	2.26	4.36
Tm	0.98	1.00	0.92	0.55	0.47	1.10	0.64	0.32	0.70
Yb	6.11	6.49	6.40	3.76	3.32	7.40	3.99	2.39	5.10
Lu	0.88	0.95	0.93	0.59	0.50	1.25	0.62	0.39	0.84
Y	56.1	55.3	57.8	22.9	23.1	53.5	33.9	18.6	34.1
Σ REE	187.67	183.63	183.78	178.64	222.62	280.56	63.09	40.83	49.13
LREE	143.9	140.7	141.2	156.9	199.1	236.8	38.9	27.3	25.3
HREE	43.81	42.96	42.63	21.76	23.5	43.72	24.22	13.5	23.8
LREE/HREE	3.28	3.27	3.31	7.21	8.47	5.42	1.60	2.02	1.06
(La/Yb) _N	2.68	2.42	2.47	5.65	8.84	4.61	1.33	1.46	0.62
(La/Sm) _N	1.40	1.40	1.41	2.64	2.85	2.58	1.48	1.85	1.15
(Gd/Yb) _N	1.71	1.56	1.51	1.38	1.92	1.36	1.13	1.04	0.70
δ Eu	0.90	0.96	0.98	0.51	0.48	0.49	0.41	0.38	0.66
δ Ce	1.01	1.02	1.02	1.20	1.05	1.05	0.97	1.25	0.79
样号	bls58	bls21	bls51	bls42	bls44	bls53	bls54	bls56	bls57
岩性	石榴石砂卡岩	块状磁铁矿	含透辉石石榴石磁铁矿矿石	透辉石石榴石磁铁矿矿石	透辉石石榴石磁铁矿矿石	透辉石磁铁矿矿石	透辉石磁铁矿矿石	绿帘石砂卡岩	绿帘石砂卡岩
La	0.65	0.19	0.13	0.26	0.37	13.00	4.07	51.50	48.10
Ce	2.57	0.37	0.26	1.82	1.56	22.00	6.65	113.00	103.00
Pr	0.55	0.05	0.05	0.40	0.25	2.62	0.85	13.60	12.60
Nd	3.45	0.20	0.10	1.81	0.96	10.90	3.48	56.90	54.50
Sm	1.36	0.11	0.05	0.77	0.26	2.26	0.66	11.80	12.80
Eu	1.20	0.05	0.05	0.76	0.21	2.52	0.35	5.25	9.95
Gd	3.85	0.22	0.06	1.65	0.64	2.64	0.74	11.80	16.70
Tb	1.29	0.06	0.05	0.49	0.22	0.49	0.11	2.06	3.06
Dy	19.40	0.76	0.27	5.57	4.51	3.49	0.71	13.70	23.90
Ho	7.31	0.30	0.12	1.85	1.96	0.70	0.16	2.96	5.63
Er	28.80	1.17	0.45	6.21	8.89	1.78	0.46	8.19	16.30
Tm	4.88	0.22	0.09	0.98	1.64	0.25	0.06	1.21	2.47
Yb	31.00	1.75	0.78	5.88	11.00	1.20	0.30	7.70	15.80
Lu	3.55	0.28	0.16	0.72	1.46	0.14	0.05	1.16	2.20
Y	288	8.03	2.32	61.4	52.2	19.7	4.22	75.8	148
Σ REE	109.86	5.73	2.62	29.17	33.93	63.99	18.65	300.83	327.01
LREE	9.78	0.97	0.64	5.82	3.61	53.3	16.06	252.05	240.95
HREE	100.1	4.8	2.0	23.4	30.3	10.7	2.6	48.8	86.1
LREE/HREE	0.10	0.20	0.32	0.25	0.12	4.99	6.20	5.17	2.80
(La/Yb) _N	0.02	0.08	0.12	0.03	0.02	7.77	9.73	4.80	2.18
(La/Sm) _N	0.31	1.12	1.68	0.22	0.92	3.71	3.98	2.82	2.43
(Gd/Yb) _N	0.10	0.10	0.06	0.23	0.05	1.82	2.04	1.27	0.87
δ Eu	1.50	0.96	2.79	2.01	1.50	3.15	1.52	1.35	2.08
δ Ce	0.98	0.91	0.79	1.12	1.22	0.87	0.83	1.02	1.00

注: 球粒陨石标准据 Sun et al., 1989, δ Eu=2Eu/(Sm_N+Gd_N), δ Ce=2Ce/(La_N+Pr_N)。

109.86×10^{-6} 。绿帘石矽卡岩富集 LREE (LREE/HREE=2.80~5.17), 石榴石矽卡岩富集 HREE (LREE/HREE=0.10)。样品均具有 Eu 正异常($\delta\text{Eu}=1.35\sim2.08$), 基本无 Ce 异常($\delta\text{Ce}=0.98\sim1.02$)(图 4D)。

矿石: 6 件矿石样品的 ΣREE 不高, 变化较大 ($2.62 \times 10^{-6} \sim 63.99 \times 10^{-6}$)。条带状及浸染状的透辉石磁铁铁矿石(bls53、bls54)富集 LREE (LREE/HREE=4.99, 6.20), 并且 LREE 内部分异程度不同 ((La/Sm)_N=3.71~3.98), 含石榴石的磁铁铁矿石(bls42、bls44、bls51)及块状矿石(bls21)富集 HREE (LREE/HREE=0.12~0.32), LREE 内部分异程度差别较大 ((La/Sm)_N=0.22, 0.92, 1.12, 1.68), 样品呈现明显的 Eu 正异常($\delta\text{Eu}=1.50\sim3.15$)和弱的 Ce 负异常($\delta\text{Ce}=0.79\sim0.91$)(图 4E、4F)。

4 讨论

4.1 围岩、矽卡岩和矿石的 REE 模式成因

巴利尔斯铁矿区的斜长角闪岩、变粒岩和浅粒岩均具有轻稀土相对富集的稀土元素配分模式, 应该是继承了原岩的稀土元素特征, 因为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迁移(王中刚等, 1989)。在 La/Yb- ΣREE 图解(图 5)中矿区围岩大部分落在玄武岩区, 少量落在沉积岩区中, 这与前人对康布铁堡组变质原岩恢复的多数原岩为火山岩的结论一致(张建中, 1987)。围岩均富集 HREE, Eu 异常具有差别, 这可能与岩浆演化过程有关。

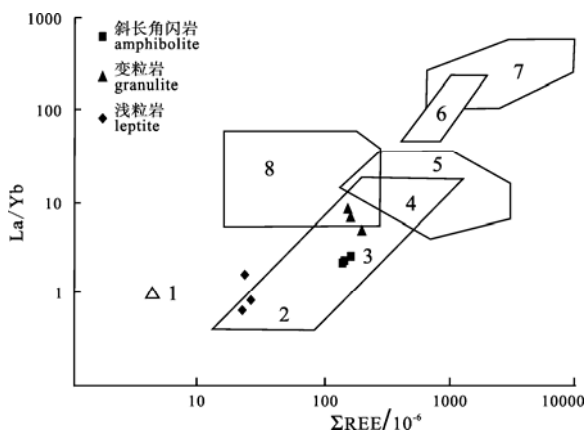


图 5 巴利尔斯铁矿床围岩 La/Yb- ΣREE 图解
(底图转引自朱笑青等, 1994)

Fig. 5 La/Yb- ΣREE diagram of wall rocks from the Baliersi iron deposit (base map after ZHU et al., 1994)

- 1-球粒陨石; 2-大洋拉斑玄武岩; 3-大陆拉斑玄武岩;
4-碱性玄武岩; 5-花岗岩; 6-金伯利岩; 7-碳酸岩; 8-沉积岩
1-chondrite; 2-oceanic tholeiite; 3-continental tholeiite; 4-alkalic basalt; 5-granite; 6-kimberlite; 7-carbonatite; 8-sedimentary rocks

前人已对矽卡岩及其矿物的 REE 特征进行了大量的研究, 不同形成机制的矽卡岩的 REE 特征具有明显差别。石榴石矽卡岩的 REE 配分模式受到石榴石中 REE 分配行为的控制。变质成因和岩浆成因的石榴石通常呈富 HREE 的分布模式(Gaspar et al., 2008), 这种石榴石一般富 Al(洪为等, 2011a)。赵斌等(1999)、赵劲松等(2007)将长江中下游 Cu(Au)、Cu-Fe(Au)和 Fe 矿床富集 LREE 亏损 HREE 和正 Eu 异常的石榴石矽卡岩称为岩浆成因的矽卡岩。典型接触交代成因矽卡岩的石榴石通常具有富 LREE 的特点(Gressey, 1987), 受到岩体的影响较大(赵斌等, 1999), 也有富集 HREE 的模式, 王莉娟等(2002)认为可能受到大气水等的影响, 这类矽卡岩及其矿物的 REE 受到岩体影响较小。

矽卡岩是巴利尔斯铁矿常见的蚀变岩石, 其石榴石矽卡岩呈富集 HREE 的左倾型, 绿帘石矽卡岩呈富集 LREE 的右倾型, 两者均具有正 Eu 异常。石榴石矽卡岩的 REE 模式与蒙库铁矿部分石榴石及查岗诺尔铁矿的石榴石的 REE 模式相似, 杨富全等(2007)、洪为等(2012a, b)认为其为岩浆热液交代火山岩地层形成。通常石榴石的 REE 模式主要受到矿物晶体化学性质和晶体结构对 REE 控制(赵劲松等, 2007)。巴利尔斯铁矿床石榴石的化学式为 $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mn}, \text{Mg}, \text{Ca})_{2.895\sim3.059}(\text{Al}, \text{Ti}, \text{Fe}^{3+})_{1.923\sim2.040}[\text{SiO}_4]_3$, 端元组分为钙铝-钙铁系列(未发表资料), Al^{3+} 的存在促使 HREE³⁺ 优先进入石榴石的晶格。绿帘石矽卡岩为退化蚀变阶段的产物, 与围岩斜长角闪岩的 REE 模式较相似, 暗示绿帘石矽卡岩与斜长角闪岩具有密切关系, 这与斜长角闪岩受到绿帘石化的现象吻合, 但绿帘石矽卡岩具有更明显的 Eu 正异常, Eu 异常的差别可能是流体作用的影响。绿帘石矽卡岩与长江中下游东狮子山、伏牛山、西狮子山和胡村 Cu(Au)矿床的矽卡岩及大冶-武山矿化矽卡岩的 REE 配分模式一致, 这些矿床的矽卡岩均与岩浆热液作用有关, 也与蒙库铁矿退化蚀变阶段的绿帘石矽卡岩的 REE 模式具有相似性(杨富全等, 2007)。巴利尔斯铁矿床的矽卡岩 REE 模式与矿区出露岩体也根拜黑云母花岗岩(富 LREE, 负 Eu 异常)的模式差别较大(张志欣等, 2011b), 矽卡岩的 REE 受到矿区出露岩体的影响较小。

虽然不同成因的矽卡岩的 REE 具有自身的特点, 但巴利尔斯铁矿床的矽卡岩由于测试数据有限等原因, 其具体形成机制还有待进一步研究, 但值得注意的问题有: 1)不同成矿阶段的矽卡岩具有不同 REE 模式, 研究表明, 优先富集某一部分 REE 矿物

的晶出会引起流体中 REE 的分异,使得流体中 REE 的组成显著改变,可导致后期形成的矿物呈现完全不同的 REE 配分模式(Brugger et al., 2000),这可能是矽卡岩具有两种 REE 模式的主要成因,但也不排除成矿过程中可能有大气水、地层封存海水等加入的影响;2)巴利尔斯铁矿床矽卡岩 REE 特征结合其石榴石中熔融包裹体和气-液两相包裹体共存的现象,表明成矿流体中存在硅酸盐熔体(未发表资料),暗示巴利尔斯铁矿矽卡岩的形成与岩浆热液作用关系密切。

磁铁矿矿石的 REE 模式除了受到成因不同的限制,磁铁矿 REE 含量较低,脉石矿物种类和含量的不同也会导致磁铁矿矿石 REE 模式的变化。巴利尔斯磁铁矿呈现两种 REE 模式,分别富集 HREE 和 LREE。样品 bls44(透辉石石榴石磁铁矿矿石)的 REE 模式与石榴石矽卡岩的 REE 模式极相似(图 5),暗示含石榴石的磁铁矿矿石的 REE 模式可能受到石榴石的影响。总体来看,巴利尔斯铁矿床的磁铁矿矿石与矽卡岩 REE 的特征具有相似性,磁铁矿矿石与矽卡岩具有亲缘关系。

4.2 Eu、Ce 等指示的成矿意义

Eu 与 Ce 的异常对指示成岩成矿条件具有重要的指示意义, Eu 正异常表明流体的温度较高,处于氧化环境(Hass et al., 1995); Eu 异常的大小反映氧化还原程度的强弱, Eu 异常峰值越高,表明氧化程度越强, Eu 异常谷越深,表明还原程度越强(赵劲松等, 2007)。Ce 的正异常和无异常表明氧化环境,负异常表明相对还原环境。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,由于海水的加入引起,海水正常沉淀出的物质不会发育 Eu 的正异常,矿石中 Eu 正异常和弱 Ce 负异常同时发育,说明矿石沉淀时较高温度的热流体与少量的海水发生了对流混合。巴利尔斯铁矿的矽卡岩和矿石均呈现中等程度到强的 Eu 正异常,矿石发育弱的 Ce 负异常,表明其形成于高温的氧化环境,氧化环境较适合磁铁矿的析出(丁俊等, 2011),成矿过程中可能有地层封存海水的加入。

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,因此它们在许多地球化学环境中具有相似的地球化学行为。Anders 等(1989)认为球粒陨石中 Y/Ho 值为 28,火成岩及硅酸盐碎屑沉积岩与球粒陨石的差别不大(Bau et al., 1995),但在水溶液体系中其化学行为却发生分异。巴利尔斯铁矿床的矽卡岩和矿石的 Y/Ho 比值在 19—39 范围变化,多数为 25~28,接近火成岩的

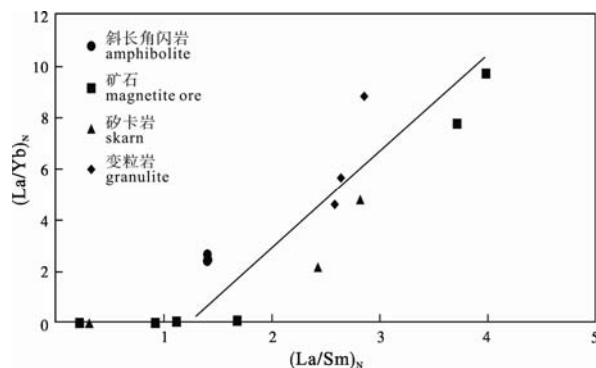


图 6 巴利尔斯铁矿斜长角闪岩、变粒岩、矽卡岩及矿石 $(La/Yb)_N-(La/Sm)_N$ 图解

Fig. 6 $(La/Yb)_N-(La/Sm)_N$ diagrams of amphibolites, granulite, skarns and ores from the Bliersi iron deposit

Y/Ho 值,也暗示磁铁矿富集可能与岩浆热液有关。

在 $(La/Yb)_N-(La/Sm)_N$ 图(图 6)上,矿石与矽卡岩及围岩具有两种不同的关系,含石榴石的磁铁矿矿石与石榴石矽卡岩具有线性相关性,不同构造的磁铁矿矿石(不含石榴石)与绿帘石矽卡岩及围岩斜长角闪岩三者之间关系较密切。成矿物质来源也许具有多解性,斜长角闪岩可能是物质来源之一,因为其原岩为富铁的中基性火山岩,并发生绿帘石化和磁铁矿化的现象,成矿流体可能从中萃取了 Fe 等物质。

5 结论

1)巴利尔斯中型铁矿床赋存于上志留统一下泥盆统康布铁堡组变质火山-沉积岩系中,容矿岩石为矽卡岩、变粒岩、浅粒岩及斜长角闪岩中,矿体空间上与矽卡岩密切相关。矿床的形成经历了矽卡岩阶段、退化蚀变阶段和石英硫化物阶段,铁矿主要形成于退化蚀变阶段。

2)巴利尔斯铁矿的磁铁矿矿石、矽卡岩与围岩斜长角闪岩的 REE 特征具有相似性,暗示磁铁矿矿石与矽卡岩具有亲缘性,斜长角闪岩可能提供部分物质来源。

3)矽卡岩和矿石发育 Eu 正异常及所有矿石的 Ce 负异常,表明它们形成于高温氧化的环境。

参考文献:

- 丁俊, 张术根, 徐忠发, 秦新龙. 2011. 印度尼西亚塔里亚布岛锡铁多金属矿床的地球化学特征与成因[J]. 地球学报, 32(3): 313-321.
- 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(1:2500000)说明书[M]. 北京: 地质出版社.
- 洪为, 张作衡, 蒋宗胜, 李凤鸣, 刘兴忠. 2012a. 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.
- 洪为, 张作衡, 李华芹, 李凤鸣, 刘兴忠. 2012b. 新疆西天山查岗诺尔铁矿床成矿时代——来自石榴子石 Sm-Nd 等时线年龄的信息[J]. 矿床地质, 31(5): 1067-1074.
- 胡兴平. 2004. 新疆富蕴县蒙库铁矿区地质特征及成因浅析[J]. 新疆有色金属, 1: 2-5.
- 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[J]. 新疆地质, 21(3): 307-311.
- 刘锋, 李延河, 毛景文, 杨富全, 柴凤梅, 耿新霞, 杨宗喜. 2008. 阿尔泰山带阿巴宫花岗岩体锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义[J]. 地球学报, 29(6): 795-804.
- 刘国仁, 董连慧, 高福平, 陈剑祥, 赵华, 王定胜, 宋志勇, 何立新, 秦纪华. 2010. 新疆阿尔泰山克拉克中游泥盆纪花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. 地球学报, 31(4): 519-531.
- 厉小钧, 仇仲学. 2006. 新疆阿勒泰—富蕴富铁矿锰矿资源调查评价成果报告[R]. 西安: 中国冶金地质勘查工程总局西北地质勘查院.
- 仇仲学. 2003. 新疆富蕴县蒙库铁矿床地质特征与成因分析[J]. 地质找矿论丛, 18(S1): 110-114.
- 童英, 王涛, 洪大卫, 柳晓明, 韩宝福. 2005. 阿尔泰山带西段同造山铁列克花岗岩体锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地球学报, 26(S1): 74-77.
- 童英, 王涛, 洪大卫, 代雅建, 韩宝福, 柳晓明. 2007. 中国阿尔泰山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.
- 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[J]. 岩石学报, 18(4): 575-584.
- 王中刚, 于学元, 赵振华. 1989. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
- 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, 闫升好, 刘锋, 柴凤梅, 周刚, 刘国仁, 何立新, 耿新霞, 代军治. 2008. 新疆阿尔泰山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.
- 赵斌, 赵劲松, 刘海臣. 1999. 长江中下游地区若干 Cu(Au)、Cu-Fe(Au)和 Fe 矿床中钙质夕卡岩的稀土元素地球化学[J]. 地球化学, 28(2): 113-125.
- 赵劲松, 邱学林, 赵斌, 涂湘林, 虞珏, 芦铁山. 2007. 大冶—武山矿化矽卡岩的稀土元素地球化学研究[J]. 地球化学, 36(4): 400-412.
- 张建中, 冯秉寰, 金浩甲, 刘斌, 罗玉鹏, 金志明, 朱美珠, 陈书章. 1987. 新疆阿尔泰山阿巴宫—蒙库海相火山岩与铁矿的成生关系及成矿地质特征[J]. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, 20(6): 89-180.
- 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. 新疆阿尔泰山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. 阿尔泰山缘乌吐布拉克铁矿区花岗岩质年代学及成因[J]. 地质论评, 57(3): 350-365.
- 朱笑青, 王中刚. 1994. 冲绳海槽热水区沉积物的地球化学特征[C]//胡瑞忠. 矿床地球化学研究. 北京: 地震出版社: 108-112.

References:

- ANDERS E, GREVESS N. 1989. Abundances of the elements: Meteoritic and solar[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53: 197-214.
- BAU M, DULSKI P. 1995. Comparative study of yttrium and rare-earth element behavior in fluorine-rich hydrothermal fluids[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119(2-3): 213-223.
- BRUGGER J, LAHAYE Y, COSTA S, LAMBERT D, BATEMAN R. 2000. Inhomogeneous distribution of REE in scheelite and dynamics of Archaean hydrothermal systems (Mt. Charlotte and Drysdale gold deposit, Western Australia[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 139: 251-264.
- DING Jun, ZHANG Shu-gen, XU Zhong-fa, QIN Xin-long. 2011. Geological and Geochemical Characteristics and Genesis of the Sn-Fe Polymetallic Deposit in Taliabu Island, Indonesia[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(3): 313-321(in Chinese with English abstract).
- DING Zhen-Ju, YAO Shu-zhen, LIU Cong-qiang, ZHOU Zong-gui, YANG Ming-guo. 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).
- HE Guo-qi, CHENG Shou-de, XU Xin, LI Jin-yi, HAO Jie. 2004. An introduction to the explanatory text of the map of tectonics of Xinjiang and its neighbouring areas[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- HONG Wei, ZHANG Zuo-heng, JIANG Zong-sheng, LI Feng-min, LIU Xing-zhong. 2012a. 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).
- HONG Wei, ZHANG Zuo-heng, LI Hua-qin, LI Feng-min, LIU Xing-zhong. 2012b. Metallogenic epoch of Chagangnuoer iron deposit in western Tianshan Mountains, Xinjiang: Information from garnet Sm-Nd isochron age[J]. *Mineral Deposits*, 31(5): 1067-1074(in Chinese with English abstract).
- HU Xing-ping. 2004. Geological features and genesis of the Mengku iron deposit in the Fuyun, Xinjiang[J]. *Xinjiang Non-Ferrous Metals*, 1: 2-8(in Chinese).
- HASS J R, SHOCK E L, 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]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(21): 4329-4350.
- LI Jia-xing, JIANG Jun, HU Xing-ping, KANG Ji-chang, YIN Yi-qiu. 2003. Geological features and genesis of the Mengku iron deposit in the Fuyun, Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 21(3): 307-311(in Chinese with English abstract).
- LIU Feng, LI Yan-he, MAO Jing-wen, YANG Fu-quan, CHAI Feng-mei, GENG Xin-xia, YANG Zong-xi. 2008. SHRIMP U-Pb Ages of the Abagong Granites in the Altay Orogen and Their Geological Implications[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(6): 795-804(in Chinese with English abstract).
- LIU Guo-ren, DONG Lian-hui, GAO Fu-ping, CHEN Jian-xiang, ZHAO Hua, WANG Ding-sheng, SONG Zhi-yong, HE Li-xin, QIN Ji-hua. 2010. LA-ICP-MS U-Pb Zircon Dating and Geochemistry of the Devonian Granites from the Middle Kelan River Valley of Altay in Xinjiang[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(4): 519-531(in Chinese with English abstract).
- LI Xiao-jun, QOU Zhong-xue. 2006. Results of Investigation and Assessment Report of rich iron and manganese ore resources in FU Yun, Altay, Xinjiang[R]. Xi'an: Northwestern Geologic Exploration Bureau of China Exploration and Engineering Bureau(in Chinese).
- QIU Zhong-xue. 2003. Analysis on genesis and geological characteristics of Mengku iron deposit in fuyun county, Xinjiang autonomous region[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 18(S1): 110-114(in Chinese with English abstract).
- TONG Ying, WANG Tao, HONG Da-wei, LIU Xiao-ming, HAN Bao-fu. 2005. Zircon U-Pb Age of Syn-orogenic Tielieke Pluton in the Western Part of Altay Orogenic Belt and Its Structural Implications[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(S1): 74-77(in Chinese with English abstract).
- TONG Ying, WANG Tao, HONG Da-wei, DAI Jian-ya, HAN Bao-fu, LIU Xiao-ming. 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).
- GASPAR M, KNACK C, MEINERT L, MORETI R. 2008. REE in skarn systems: ALA-ICP-MS study of garnets from the Crown Jewel gold deposit[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(1): 185-205.
- GRESSEY G. 1987. Skarn formation between metachak and agglomerate in central Ring Complex, Isle of Arran, Scotland[J]. *Mineral Mag. J.*, 51(2): 231-246.
- SUN S S, MCDONOUGH W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *The Geological Society*, 42: 313-345.
- WANG Li-juan, WANG Jin-bin, WANG Yu-wang, SHIMAZAKI H. 2002. REE geochemistry of the Huangguangliang skarn Fe-Sn deposit, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 575-584(in Chinese with English abstract).
- WANG Yu-wang, WANG Jin-bin, WANG Shu-lai, DING Ru-fu, WANG Li-juan. 2003. Geology of the Mengku iron deposit, Xinjiang, China: a metamorphosed VMS? [C]//MAO J W, GOLDFARB R J, SELTMANN R, WANG D H, XIAO W J, HART C. *Tectonic evolution and metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan*. London: 181-200.
- WANG Zhong-gang, YU Xue-yuan, ZHAO Zhen-hua. 1989. Geochemistry of rare earth elements[M]. Beijing: Sciences Press(in Chinese).
- YANG Fu-quan, MAO Jing-wen, XU Lin-gang, ZHANG Yan, LIU Feng, HUANG Cheng-lin, ZHOU Gang, LIU Guo-ren, DAI Jun-zhi. 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 Fu-quan, MAO Jing-wen, YAN Sheng-hao, LIU Feng, CHAI Feng-mei. 2008. Geochronology, Geochemistry and Geological implications of the Mengku synorogenic plagiogranite pluton in Altay, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 485-499(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Bin, ZHAO Jin-song, LIU Hai-chen. 1999. REE geochemistry for vein calcareous skarns from some iron-copper(gold) deposits along the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River[J]. *Geochimica*, 28(2): 113-125(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Jin-song, QIU Xue-lin, ZHAO Bin, TU Xiang-lin, YU Yu, LU Tie-shan. 2007. REE geochemistry of mineralized skarns from Daye to Wushan region, China[J]. *Geochimica*, 36(4): 400-412(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Jian-zhong, FENG Bing-huan, JIN Hao-jia, LIU Bin, LUO Yu-peng, JIN Zhi-ming, ZHU Mei-zhu, CHEN Shu-zhang. 1987. The genetic relationship between marine volcanic rocks and iron deposit at Abagong-mengku area, Altay district, Xinjiang and ore-forming geological features[J]. *Bulletin of Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, GAGS*, 20(6): 89-180(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhi-xin, YANG Fu-quan, CHAI Feng-mei, LIU Feng, GENG Xin-xia, LÜ Shu-jun, JIANG Li-ping, ZHONG Tian-zhi, OUYANG Liu-jin. 2011a. A study of REE geochemistry of Wutubulake iron deposit in Altay, Xinjiang[J]. 30(1): 87-102(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhi-xin, YANG Fu-quan, CHAI Feng-mei, LIU Feng, GENG Xin-xia, LÜ Shu-jun, JIANG Li-ping, ZHONG Tian-zhi. 2011b. The study on chronology and genesis of the granite from the Wutubulake iron deposit district in the southern margin of Altay[J]. *Geological Review*, 57(3): 350-365(in Chinese with English abstract).
- ZHU Xiao-qing, WANG Zhong-gang. 1994. Geochemical characteristics of hydrothermal sedimentary in Chongsheng Sea[C]//HU Rui-Zhong. *Geochemical study of ore deposits*. Beijing: Seismological Press: 108-112(in Chinese).