

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.239



西昆仑塔什库尔干叶里克铁矿成因:矿床地质与 磁铁矿 LA-ICP-MS 原位分析约束

丁明朋^{1,2}, 汤好书^{1,2*}, 陈衍景³, 董连慧⁴, 李基宏⁴, 屈迅⁴,
李秋根³, 孙晓辉¹, 周振菊³, 石光辉⁵

1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州贵阳 550081
2. 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049
3. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871
4. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局, 新疆乌鲁木齐 830000
5. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第二地质大队, 新疆喀什 844002

摘要: 新疆塔什库尔干铁矿带是我国西部地区新近发现的重要富铁矿带。叶里克铁矿是该成矿带大型铁矿床之一, 对该矿床成因方面的研究尚在起步阶段。通过对叶里克铁矿开展矿床地质研究与磁铁矿 LA-ICP-MS 原位分析, 结果表明矿体产于布伦阔勒变质火山—沉积岩中, 矿体与围岩产状基本一致, 具有明显的层控特征。稠密浸染状或块状富矿体中磁铁矿主要有两种产出形式: 与硬石膏或与方解石共生。这两类磁铁矿中多数微量元素含量较均一, 如 Mg($119 \times 10^{-6} \sim 313 \times 10^{-6}$)、Al($692 \times 10^{-6} \sim 1034 \times 10^{-6}$)、Ti($540 \times 10^{-6} \sim 840 \times 10^{-6}$)、V($3340 \times 10^{-6} \sim 3971 \times 10^{-6}$)、Mn($950 \times 10^{-6} \sim 1160 \times 10^{-6}$)、Co($4 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$)、Ni($52 \times 10^{-6} \sim 64 \times 10^{-6}$)、Zn($84 \times 10^{-6} \sim 143 \times 10^{-6}$)、以及 Ga($26 \times 10^{-6} \sim 31 \times 10^{-6}$), 并与高温热液中磁铁矿类似; 磁铁矿 Al、Ti、V 含量高, Ni/Cr 比高以及 Ti/V 比低揭示出其形成于相对还原、富 Al、Ti 的海底高温热液体系且沉积环境稳定。(Al+Mn)/(Ti+V) 特征指示其形成温度在 300~500 °C 之间。与硬石膏共生的磁铁矿比与方解石共生的磁铁矿具有相对高的 Ti(前者平均 690×10^{-6} , 后者平均 574×10^{-6})、P(从 27×10^{-6} 骤降到 7×10^{-6}) 含量, 低的 Ca 含量(从 36×10^{-6} 骤升到 203×10^{-6}) 并亏损 Zr、Hf、Sc、Ta 等高场强元素, 指示前者形成于更剧烈的热液活动中, 并且硬石膏磁铁矿在热液作用过程中多数 Ca 离子进入硬石膏晶格中, 造成磁铁矿 Ca 含量降低。综合区域地质、矿床地质及磁铁矿组成等多种证据, 表明叶里克铁矿形成于早寒武世的海底高温热液系统。铁矿形成与原特提斯洋南向俯冲引发的火山弧岩浆作用有关, 属于海相火山岩型铁矿。

关键词: 西昆仑; 叶里克铁矿; 布伦阔勒岩群; 矿体特征; 矿床成因; 地球化学。

中图分类号: P618.31; P59

文章编号: 1000-2383(2018)09-3169-17

收稿日期: 2018-02-05

Genesis of the Erik Iron Ore Deposit in the Taxkorgan Area of the West Kunlun, Xinjiang: Constraints from Ore Deposit Geology and In Situ LA-ICP-MS Analysis of Magnetite

Ding Mingpeng^{1,2}, Tang Haoshu^{1,2*}, Chen Yanjing³, Dong Lianhui⁴, Li Jihong⁴, Qu Xun⁴,
Li Qiugen³, Sun Xiaohui¹, Zhou Zhenju³, Shi Guanghui⁵

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China
2. College of Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China
4. Bureau of Xinjiang Geology and Mineral Resources Development, Urumqi 830000, China
5. The No.2 Geology Team of the Bureau of Xinjiang Geology and Mineral Resources Development, Kashi 844002, China

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 41672086, 41402061, 41503035); 中国地质调查局项目 (No. 1212011140056)。

作者简介: 丁明朋 (1992-), 男, 硕士研究生, 工程地质方向。ORCID: 0000-0001-5996-1410. E-mail: 847153506@qq.com

* 通讯作者: 汤好书, E-mail: tanghaoshu@163.com; tanghaoshu@vip.gyig.ac.cn

引用格式: 丁明朋, 汤好书, 陈衍景, 等, 2018. 西昆仑塔什库尔干叶里克铁矿成因: 矿床地质与磁铁矿 LA-ICP-MS 原位分析约束. 地球科学, 43 (9): 3169-3185.

Abstract: The Erik iron deposit is one of the biggest deposits in the Taxkorgan iron deposit belt in Xinjiang, an important high-grade one recently discovered in West China, which has been rarely studied. To identify the genesis of the Erik iron deposit, ore deposit geology survey and in situ LA-ICP-MS analysis of magnetite have been conducted in this study. It is found that mineralization occurs at the Bulunkuole meta-volcano-sedimentary succession. Ore occurrences are basically coordinated with those of host rocks, and exhibit obviously stratabound characteristics. Two main mineral associations of magnetite+anhydrite and magnetite+calcite in variable proportions commonly occurred in the high-grade iron bodies and formed dense disseminations and massive ores. Both magnetite grains from these two associations show constant contents of many elements including Mg ($119 \times 10^{-6} - 313 \times 10^{-6}$), Al ($692 \times 10^{-6} - 1\ 034 \times 10^{-6}$), Ti ($540 \times 10^{-6} - 840 \times 10^{-6}$), V ($3\ 340 \times 10^{-6} - 3\ 971 \times 10^{-6}$), Mn ($950 \times 10^{-6} - 1\ 160 \times 10^{-6}$), Co ($4 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-6}$), Ni ($52 \times 10^{-6} - 64 \times 10^{-6}$), Zn ($84 \times 10^{-6} - 143 \times 10^{-6}$), and Ga ($26 \times 10^{-6} - 31 \times 10^{-6}$) and similar to those of in high-temperature hydrothermal environment. It is interpreted that the high Al, Ti, V contents, with high Ni/Cr and low Ti/V ratios in magnetites result from relatively reduced, Al-Ti-rich seafloor hydrothermal activities under a stable sedimentary environment. The (Al+Mn)-(Ti+V) feature of the Erik magnetites implies a high-temperature crystallization (300–500 °C). The magnetites coexisting with anhydrite have higher Ti (690×10^{-6}), P (27×10^{-6}) concentrations in average, and lower Ca (36×10^{-6}) than those coexisting with calcites (Ti= 574×10^{-6} , P= 7×10^{-6} , Ca= 203×10^{-6}). Moreover, the former are more depleted in high field strength elements of Zr, Hf, Sc, Ta, suggesting them have suffered more severely hydrothermal activities and Ca contents in magnetites are reduced with Ca^{2+} entering into crystal lattice of anhydrites. Integrating obtained evidences, including regional geology, ore deposit geology, magnetite composition, and we conclude that the Erik iron deposit was formed from an Early Cambrian seafloor high-temperature hydrothermal system. The development of the Erik iron deposit is related with a volcanic arc caused by southward subduction of Proto-Tethyan Plate. The Erik iron deposit is classified into a marine volcanic-sedimentary hosted Fe oxide deposit formed at or near the seafloor in submarine volcanic settings.

Key words: West Kunlun; Erik iron deposit; Bulunkuole Group; ore-body feature; ore genesis; geochemistry.

0 引言

我国铁矿床大部分为贫铁矿,富铁矿只占探明资源储量的 4.6%,可直接入炉炼钢或炼铁的富矿仅占 2.27%;因此,富铁矿是我国长期紧缺的大宗矿种(李厚民等,2010;赵一鸣,2013;Zhang *et al.*, 2014;沈其韩和宋会侠,2015).我国铁矿石对外依存度居高不下,2015 年进口铁矿石达到 9.52×10^8 t(中商情报网,2016),严重威胁着我国钢铁行业、乃至整个国民经济链的安全.因此,研究富铁矿形成机制、成矿规律和找矿方向,推动寻找大型富铁矿床(带),仍是我国地质学界面临的严峻挑战.

目前,我国基本确定了 11 个重要铁矿带,即鞍山—本溪、西昌—滇中、冀东—密云、五台—吕梁、长江中下游、包头—白云鄂博、邯郸—邢台、新疆天山、鲁中、霍邱和鄂西—湘西北,蕴涵了全国探明铁矿储量的 80%(赵一鸣,2004,2013).11 个铁矿带中,10 个分布在中—东部地区,西部铁矿带只有 1 个,十分匮乏.这种不均衡的资源分布格局严重限制着西部边疆少数民族地区的经济发展,也阻碍着“一带一路”重大战略的顺利实施.因此,我国铁矿勘查亟需在西部地区,特别是丝绸之路经济带,取得重大突破.开展丝绸之路经济带铁矿床重要类型、成矿规律

及勘查潜力等方面的研究,当属国家之急,也是我国地质学家和矿床学家的重要使命.

国家 305 项目的持续进行和 358 项目的实施推动了新疆找矿工作不断突破,最新在帕米尔高原发现了塔什库尔干富铁矿带(董连慧等,2012),包括铁矿床(点)40 多处,其中赞坎、叶里克、莫喀尔(赞坎东)、老并和切列克其 5 个矿床均达亿吨级;莫拉赫、吉尔铁克沟、喀来子等十数个中型铁矿床(图 1;董连慧等,2011a,2011b;燕长海等,2012;乔耿彪等,2015;曾威等,2015).该铁矿带连续分布长达 120 km 以上,向西北方向延伸至境外邻国,预测铁矿石资源量 $>15 \times 10^8$ t(李文渊等,2011;董连慧等,2011a,2011b).重要的是,该带铁矿床的品位普遍较高,被列为我国富铁矿床重点勘查区之一(董连慧等,2011a).因此,塔什库尔干铁矿带被视为近 50 多年来新疆铁矿床找矿勘查的最大突破,也是我国铁矿勘查史上的一个创举(董连慧等,2012).

已有的地质勘查和研究显示,塔什库尔干铁矿带内铁矿床多属于“硫化物(黄铁矿为主)、硫酸盐(石膏/重晶石)、磁铁矿”3 类组分互层组成的层状(富)铁建造.其中,黄铁矿—石膏—磁铁矿建造主要出现在矿带西侧,产出赞坎、莫喀尔、老并、叶里克等大型含石膏铁矿床;黄铁矿—重晶石—磁铁矿建造

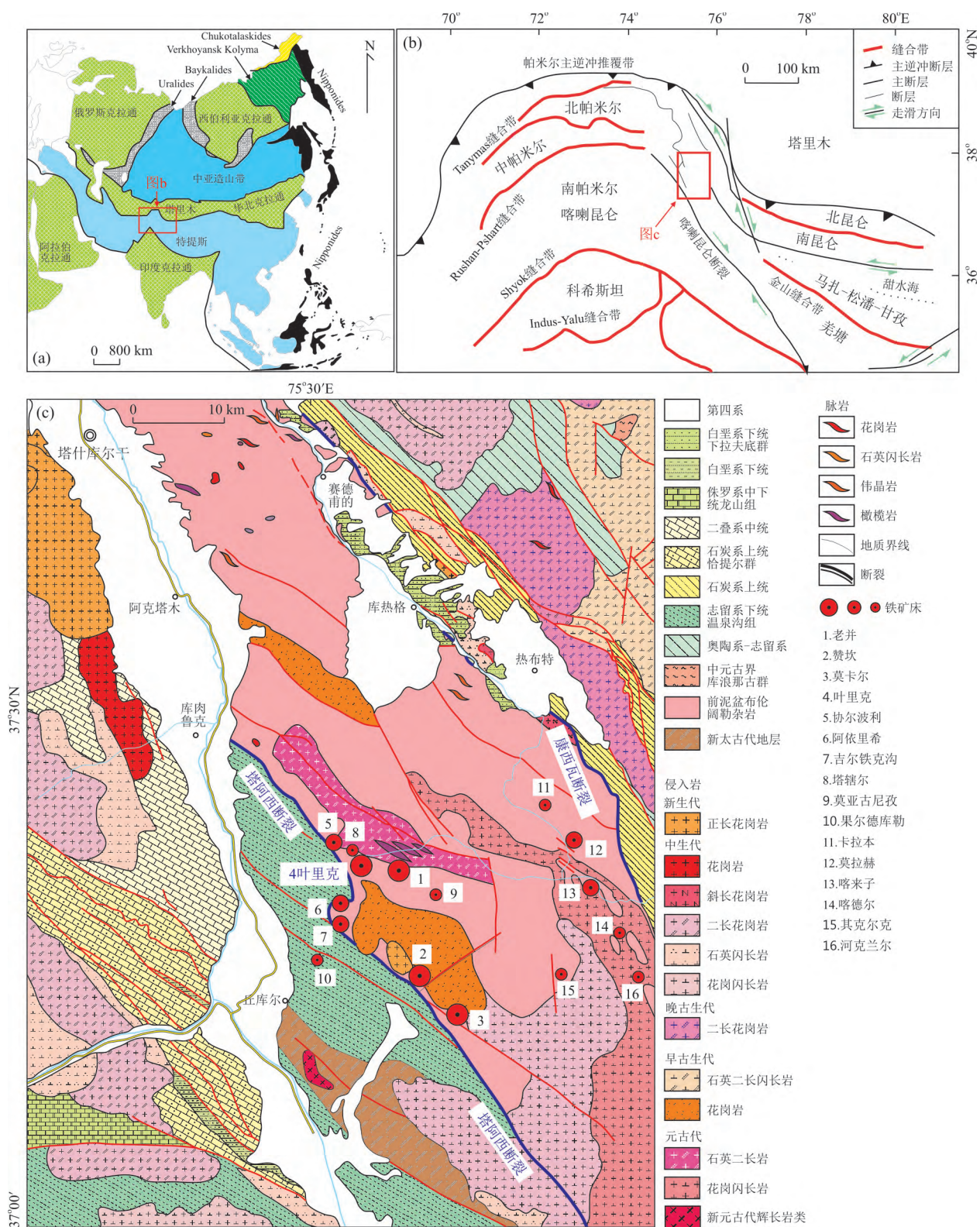


图 1 塔什库尔干地区铁矿分布地质简图

Fig.1 Geological sketch of iron deposits in the Taxkorgan area

图 a 为亚洲构造略图,显示喜马拉雅—西藏造山带西段的位置,据 Sengör *et al.*(1993);图 b 为喜马拉雅—西藏造山带西段构造简图,显示塔什库尔干铁矿带的位置,据 Robinson *et al.*(2012);图 c 为塔什库尔干铁矿带地质简图,据朱杰等 (2016)、Zhou *et al.*(2017, 2018)、Zhang *et al.*(2018a, 2018b) 修改

主要出现在矿带东侧,产出莫拉赫、喀来子等富重晶石铁矿床(图 1)。但由于该地区成矿地质背景比较特殊,交通条件差、总体研究程度低、基础工作薄弱,目前还有许多重要的问题尚不清楚。

本文以该成矿带中叶里克大型铁矿床为研究对象,基于矿床地质特征,结合磁铁矿 LA-ICP-MS 原位地球化学分析及前人研究成果,通过分析成矿物质来源、成矿物理化学条件,对矿床成因进行约束,为认识该区矿床成矿作用规律和开展找矿及评价工作提供参考。

1 区域地质背景

叶里克铁矿床位于塔什库尔干县南东方向直线距离约 50 km 处,与附近的老井、走克本、赞坎、莫喀尔及协尔波力铁矿等共同构成北西—南东向的西昆仑赞坎一带铁矿集区。矿带大地构造位于羌塘弧盆系内的塔什库尔干—甜水海地块,成矿区划属于巴颜喀拉—松潘成矿省西昆仑南部长 700 km、宽 20~50 km 的 Fe-Cu-Au-Pb-Zn-白云母—宝玉石成矿带中的慕士塔格—阿克赛钦 Fe-Cu-Au-Pb-Zn-Sr-Sb-白云母—宝玉石矿带(董连慧等, 2010a, 2010b)。

该带横跨喀喇昆仑造山带、西昆仑造山带、塔里木板块 3 大地构造单元(图 1b),自西向东被塔阿西、康西瓦、柯岗 3 个大型结合带分为 4 个次级地质单元(图 1c)。该区经历了漫长的地质构造演化史和复杂的变质变形过程,形成了区内独特的成矿地质特征。带内矿产以铁、铜、金、铅锌矿为主,是新疆重要的铁矿带。铁矿床集中分布在塔什库尔干陆块,该陆块西、东分别以塔阿西和康西瓦(瓦恰)断裂带为界,断裂带两侧分别为明铁盖陆块和西昆仑构造带(图 1c),康西瓦断裂带是分隔古亚洲和特提斯两大构造域的右行走滑转换构造带(李向东等, 1996; 李向东和王克卓, 2000)。

陆块以布伦阔勒岩群变质岩系为其主要组成部分;下志留统以碎屑岩—碳酸盐岩为主,夹少量火山岩,含笔石化石(王世炎等, 2003);上石炭统主体为碳酸盐岩;中二叠统为碎屑岩—碳酸盐岩夹火山岩,含孢粉化石(姚建新等, 2005);侏罗系为碳酸盐岩,其中下—中侏罗统夹有火山岩。布伦阔勒岩群分布于康西瓦—瓦恰断裂与塔阿西—色克布拉克断裂之间,沿可莫达坂—马尔洋—空木达坂一线呈不规则面状展布,与周围地层多呈断层接触,班迪尔—下拉夫得一带河谷两侧被下白垩统下拉夫底群高角度不

整合覆盖,小热斯卡木、卡英代—卡日巴生等岩体侵入其中。该岩群为一套富含石榴石、矽线石的中深变质岩系,河南省地质调查院(2004, 中华人民共和国 1:25 万塔什库尔干塔吉克自治县幅(J43C003003)、克克吐鲁克幅(J43C003002)、叶城县幅(J43C003004)区域地质调查报告)根据布伦阔勒岩群内部岩性组合将其划分为含铁岩段、(含石榴)斜长角闪片麻岩段、矽线石榴片麻岩—石英岩段、大理岩段 4 套变质建造组合。原岩为一套碎屑岩—碳酸盐岩夹基性火山岩建造。其中斜长角闪岩类空间上呈层状或带状展布,局部地段也可见到片岩类夹层相伴产出,原岩主要为中性火山岩。有较多的花岗伟晶岩脉,花岗闪长岩脉、石英岩脉呈顺层或斜切贯入其中。

布伦阔勒岩群的形成时代长期存在争议,主要有早古生代(张传林等, 2007; 燕长海等, 2012)和古元古代(新疆地质矿产局, 1993; 计文化等, 2011)两种不同认识。近 10 年来,随着高精度锆石 U-Pb 同位素测年技术的应用,在原布伦阔勒岩群中获得了大量同位素年代学数据,除主体集中于早寒武世外,也有古元古代、古生代和中生代的年代学记录,说明其构造混杂岩带的属性(杨坤光等, 2003; 许志琴等, 2004; 曲军峰等, 2007; 王建平, 2008; 杨文强等, 2011)。笔者在塔什库尔干地区对该岩群、特别是对铁矿赋矿地层进行了系统研究(未发表),结合前人研究成果,认为原布伦阔勒岩群至少应该解体为 3 个部分:(1)水库—班迪尔一带为中深变质岩系的主要分布区域,该带高压变质岩石组合构成三叠纪增生杂岩(Robinson *et al.*, 2012; Robinson, 2015; Zhu *et al.*, 2017);(2)铁矿带北部老井、叶里克、喀来子等铁矿床赋矿地层年代为早寒武世(燕长海等, 2012; Zhang *et al.*, 2018a),该带变质程度普遍较低,为绿片岩相—低角闪岩相;(3)保留北部布伦口附近的中深变质岩系以及赞坎、莫喀尔、吉尔铁克沟一带南部原布伦阔勒岩群,将其年龄暂定为古元古代溱沱纪(计文化等, 2011)。最新研究表明,帕米尔东北部的布伦阔勒岩群沉积年龄被确定为早—中寒武世,而非古元古代或二叠纪—三叠纪;与南昆仑地体中寒武纪变质火山—沉积岩系沉积时代一致。它们均为原特提斯洋南向俯冲过程中于塔里木和甜水海地体之间形成的增生楔。并且原特提斯洋是从东向西逐渐闭合的,东部开始闭合的时间约为 440 Ma,而塔里木板块和帕米尔东北部之间残余的原特提斯洋直至早中生代方才闭合,期间则继续沉

积了奥陶纪—三叠纪的沉积岩系(Zhang *et al.*, 2018b).特别值得说明的是,计文化等(2011)在铁矿矿区南部发现早前寒武纪微陆块(具体分布范围有待确定),后经 Zhang *et al.*(2018a)再次工作,确认其形成于 2.5 Ga 左右,主要由变双峰式火山岩系和变一杂砂岩组成,并被 840~835 Ma 花岗岩类侵入.该陆块(麻扎地体)和甜水海群共同构成了甜水海地体的基底,并且可能和祁连、柴达木地体一样是 Rodinia 超大陆裂解期间从扬子克拉通“漂浮”而来的大陆碎片(Zhang *et al.*, 2018a).塔什库尔干地块侵入岩浆活动发育,以古生代、中生代及新生代侵入岩为主,前寒武纪岩体出露较少(张传林等, 2005, 2007, 2012; 边小卫等, 2013).河南省地质调查院(2004, 中华人民共和国 1:25 万塔什库尔干塔吉克自治县幅(J43C003003)、克克吐鲁克幅(J43C003002)、叶城县幅(J43C003004)区域地质调查报告)将走克本二长花岗岩体和马尔洋花岗岩闪长岩体厘定为元古宙侵入岩,但缺少时代依据.

2 矿区地质

叶里克矿区内地层主要为布伦阔勒岩群,总体呈北东向单斜产出,向东延伸与老并铁矿相连,构成叶里克—老并铁矿带(图 2).矿区内布伦阔勒岩群可分为 3 个岩性段(石光辉和谢月娇, 2014),地表大部分被第四系残坡积物覆盖.

第 1 岩性段:分布于矿区西南角,以灰白色含石

英大理岩为主,局部为石英片岩夹角闪片岩;第 2 岩性段:分布于矿区中部,主要为灰色黑云母石英片岩,局部夹角闪片岩、斜长角闪片岩、绿泥石片岩及石膏岩等(图 3,图 4),为主要含矿岩性单元;第 3 岩性段:分布于矿区北东部,以石英片岩为主,夹少量斜长片麻岩、绿泥石片岩、斜长角闪片岩,岩层产状稳定、原始层理较为清晰、局部为褐红色褐铁矿蚀变带.3 个岩性段特征指示矿区沉积成岩时期整体上属于一个从浅海到滨海的海退系列环境.

矿区内未见大规模断层和褶皱等构造,岩层中变形构造小褶皱发育,破坏性构造仅在局部见有小型节理和断裂.

矿区北部及南部少量出露种类单一的侵入岩,为燕山期中—细粒二长花岗岩和正长花岗岩.岩脉零星可见,主要有阳起石绿帘石岩脉、辉石岩脉和石英脉.矿区内火山碎屑岩发育.黑云母(斜长)角闪石英片岩(原岩为中—基性岩火山岩)中多处可见残留的英安岩火山碎屑集块岩堆积特征(图 3c,图 4f),证明成岩过程中有大量火山物质加入.

矿区内共圈定含矿带 6 条(图 2),在地层中主要以夹层状、透镜体状、脉状及不规则囊状等形式产出.矿体在地表大多被残坡积物覆盖,天然露头仅少处可见(图 3b).

赋矿岩层多遭受绿片岩相变质作用,岩性主要为(斜长)黑云母石英片岩(图 4a,4d)或黑云母角闪石英片岩(图 4f,4g)及石膏岩(图 4b),少量石英片岩.矿体主要以夹层状或透镜体状产出,两侧围岩

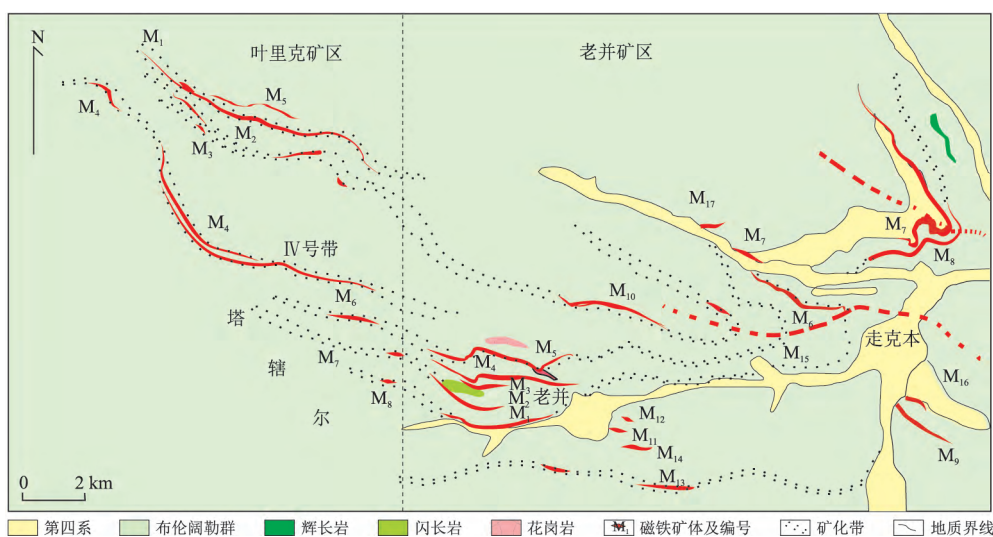


图 2 叶里克、老并铁矿区地质简图

Fig.2 Geological sketch of the Erik and Laobing iron deposits

据陈登辉等(2013)修改

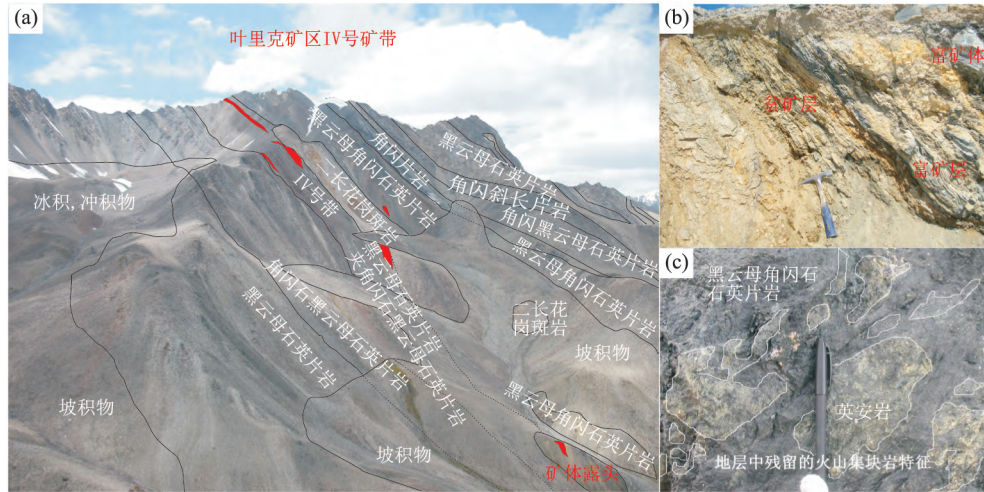


图 3 叶里克矿区 IV 号矿带

Fig.3 Field geology of the No. IV ore belt in Erik deposit

a. IV 号带宏观图; b. IV 号矿体野外露头; c. 含磁铁矿黑云母角闪石石英岩中残留英安岩火山集块岩

主要为黑云母石英片岩(图 3b, 图 4a, 4d). 贫矿体多产自各类含角闪石片岩中, 并随着角闪石含量增多磁铁矿含量增多, 但能聚集成富矿体的很少(图 4c, 4f, 4g, 4j), 磁铁矿化在该类岩性中呈浸染状、条带—浸染状分布(图 4f, 4g); 大部分矿石中的片理产状与围岩一致(图 3a, 3b), 显示出矿体与围岩为同期沉积—变质形成; 有的(斜长)角闪片岩本身磁铁矿化不明显, 但在这些变火山岩的底板围岩——黑云母石英片岩、石英片岩中可见到条带—浸染状磁铁矿化, 个别地段富集形成矿体, 其磁铁矿化条带与两侧围岩片理一致, 也显示了同期形成的特征. 富矿体赋矿岩性通常为硬石膏岩磁铁矿石岩, 有的为顺层的夹层状或透镜体状(图 3b), 有的以穿层的脉状、囊状等形式产出.

矿石矿物主要为磁铁矿、黄铁矿, 磁铁矿呈细—粗不等粒状、常与黄铁矿共生, 地表常见黄铁矿边缘被褐铁矿交代, 另有微量磁黄铁矿、赤铁矿及黄铜矿等. 脉石矿物主要为石英、黑云母、角闪石、石膏、方解石、长石、绿泥石等. 矿石组构主要为粒状结构、浸染状构造及条带—浸染状构造; 富铁矿石为稠密浸染状构造、少量块状构造(图 4b, 4h, 4i). 富矿石中常见硬石膏、碳酸盐矿物, 主要有两种不同产出形式的磁铁矿, 分别为: (1) 与硬石膏密切共生的磁铁矿, 形成稠密浸染状构造(图 4h, 4k); (2) 与方解石共生的磁铁矿, 形成纹层状构造(图 4i, 4l). 这两类矿物组合呈互相渐变过渡关系、无截然界限, 共同构成稠密浸染状构造、或块状构造富铁矿石.

3 样品和分析方法

本次研究样品为采集自叶里克矿区 IV 号脉的稠密浸染状磁铁矿(图 3). 样品(YLK1-2)主要矿物成分为磁铁矿、硬石膏、石英以及少量方解石(图 4h, 4i). 笔者在镜下观察的基础上, 选取富矿体中两种不同产出形式的磁铁矿进行 LA-ICP-MS 原位分析, 分别为: (1) 与石膏密切共生的稠密浸染状磁铁矿(YLK-I; 图 4h, 4k); (2) 与方解石共生的纹层状磁铁矿(YLK-II; 图 4i, 4l). 磁铁矿的微量元素测定在中国科学院地球化学研究所矿床国家重点实验室进行. 采用 GeolasPro 193 nm 激光剥蚀系统+Agilent 7700x 质谱仪测定, 检测限低至 10^{-9} . 具体实验流程、数据处理方法同本实验室先前报道(Huang *et al.*, 2015). 实验过程中采用氦气作为载气、氩气作为补偿气以调节灵敏度. 激光剥蚀斑束为 $60 \mu\text{m}$, 频率为 4 Hz. 每个分析点位的背景时间为 20 s, 数据采集时间为 40 s. 运用多重外标对磁铁矿的含量进行校正(GSE-1G, BCR-2G, BIR-1G, BHVO-2G 和 NIST610), ^{57}Fe 作为内标(Gao *et al.*, 2013). 每 8 个分析样品后跟一个 GSE-1G 标样来校正时间灵敏度漂移. 离线背景和样品信号处理, 时间漂移的校正和定量的校正用软件 ICPMSDataCal10 进行(Liu *et al.*, 2008).

4 结果

磁铁矿样品的 LA-ICP-MS 分析结果见表 1. I

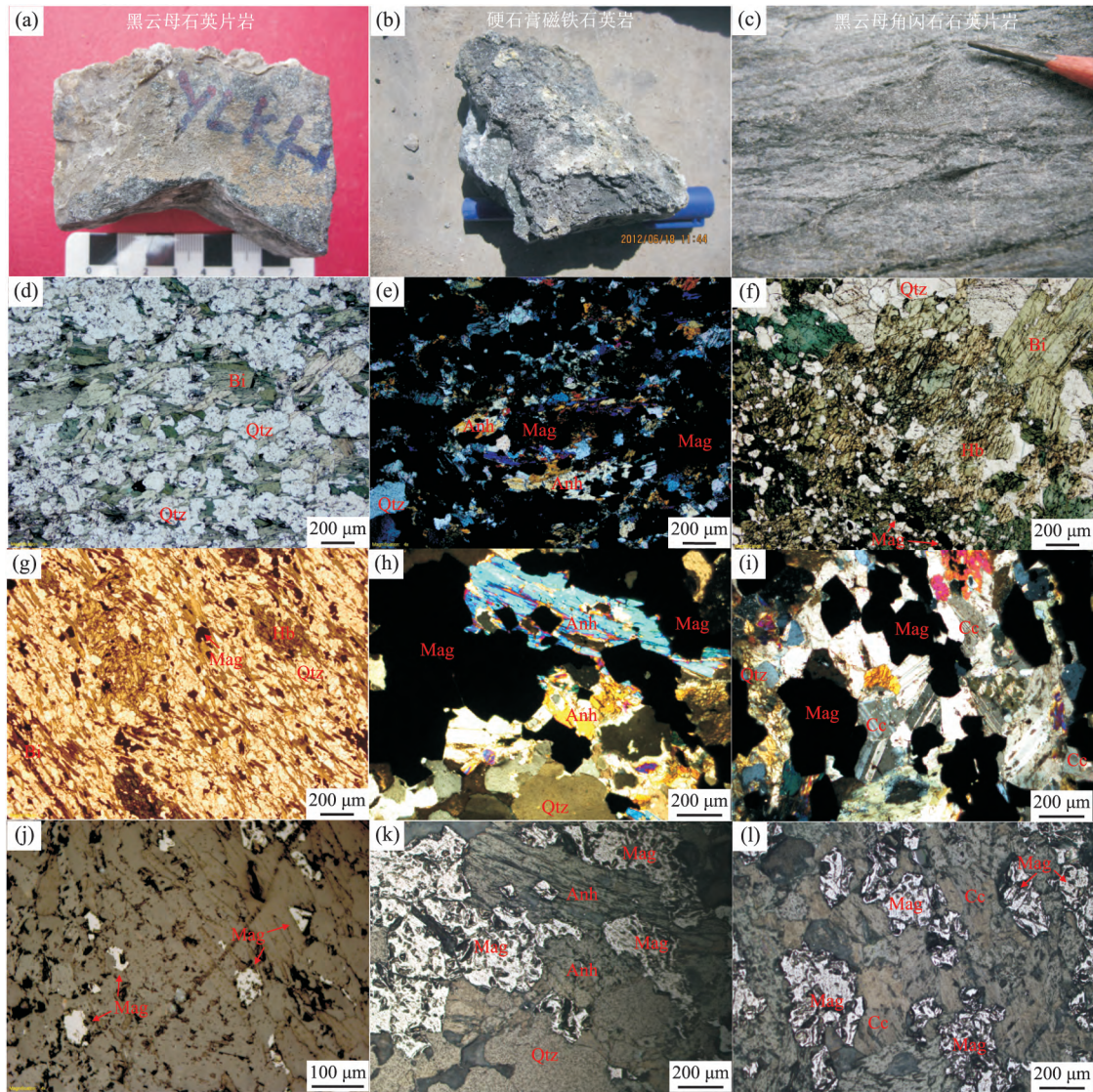


图 4 叶里克铁矿样品地质特征

Fig.4 Geological characteristics of samples from the Erik iron deposit

a.赋矿围岩黑云母石英片岩手标本,样品 YLK1-1;b.硬石膏磁铁矿石英岩块状矿体手标本,样品 YLK1-2;c.含矿黑云母角闪石石英片岩;d.黑云母石英片岩显微镜照片(透射光),黑云母条带与石英条带定向明显;e.硬石膏磁铁矿石英岩显微镜下照片(正交光);f.黑云母角闪石石英片岩显微镜照片(透射光),稀疏浸染状磁铁矿与中粒角闪石、黑云母、石英共生;g.零星细粒磁铁矿赋存于角闪石黑云母石英片岩中,透射光,样品 YLK2-1;h.硬石膏磁铁矿石英岩中与石膏共生的稠密浸染状磁铁矿,正交光;i.硬石膏磁铁矿石英岩中与方解石共生纹层状磁铁矿,正交光;j.角闪石黑云母石英片岩含零星半自形细粒磁铁矿,反射光;k.硬石膏磁铁矿石英岩中与石膏共生的稠密浸染状磁铁矿,反射光;l.硬石膏磁铁矿石英岩中与方解石共生纹层状磁铁矿,反射光.矿物缩写:Bi.黑云母;Qtz.石英;Hb.角闪石;Mag.磁铁矿;Anh.硬石膏;Cc.方解石

组稠密状磁铁矿 Si 含量变化范围较大($79 \times 10^{-6} \sim 2409 \times 10^{-6}$),II 组纹层状磁铁矿 Si 含量变化范围相对较小($631 \times 10^{-6} \sim 1243 \times 10^{-6}$).相较而言,I 组稠密状磁铁矿比 II 组纹层状磁铁矿具有相对低的 Mg、Al(I 组平均分别为 174×10^{-6} 、 841×10^{-6} ; II 组为 233×10^{-6} 、 890×10^{-6}),相对高 Ti 含量(从 I 组平均 690×10^{-6} 降低到 II 组的 574×10^{-6}),Ca 含量显著低(从 I 组平均 36×10^{-6} 骤升到 II 组的 203×10^{-6}),P 含量显著升高(从 I 组平均 27×10^{-6}

骤降到 II 组的 7×10^{-6}).其余微量元素含量在两组样品中无显著差异.

5 讨论

磁铁矿微量元素的种类和含量主要取决于磁铁矿形成环境的物理化学条件,如流体/熔体的化学成分、温度、 f_{O_2} 及 f_{S_2} 等.因此磁铁矿地球化学信息是一个有用的岩石成因指标,并且可以用来区分不

表 1 叶里克铁矿磁铁矿微量元素分析结果表(10^{-6})
Table 1 Magnetite trace elements of the Erik iron deposit (10^{-6})

样品编号	I 组:与石膏共生稠密浸染状磁铁矿						平均
	YLK1-2-2	YLK1-2-3	YLK1-2-4	YLK1-2-5	YLK1-2-6	YLK1-2-7	
Mg	267.13	119.08	152.40	171.49	153.19	181.73	174.17
Al	932.76	841.57	917.18	878.28	784.70	691.87	841.06
Si	2 409.01	1 154.56	1 021.93	608.21	78.89	726.26	999.81
Mn	1 176.37	1 028.64	1 143.26	1 099.52	1 133.57	950.04	1 088.57
Ti	600.00	600.00	720.00	720.00	840.00	660.00	690.00
Ca	73.72	20.34	—	—	20.95	101.89	36.15
Sc	—	—	—	—	0.16	—	0.03
V	3 422.70	3 391.50	3 260.53	3 439.24	3 826.39	3 970.94	3 551.88
Cr	7.79	4.18	2.63	6.29	7.32	2.72	5.16
Co	3.92	4.38	4.16	3.99	3.93	4.56	4.16
Ni	55.90	45.88	55.81	50.59	64.19	54.67	54.51
Cu	0.13	—	0.80	0.21	1.12	0.00	0.38
Zn	133.46	84.46	142.58	109.81	84.71	85.42	106.74
Ga	28.70	27.48	30.60	26.56	27.03	25.97	27.72
Y	0.57	—	—	—	0.01	0.07	0.11
Zr	0.72	1.49	1.18	0.51	1.24	1.11	1.04
Nb	0.11	0.01	—	—	0.01	0.04	0.03
Mo	0.10	0.04	0.12	0.08	0.08	—	0.07
Sn	2.02	1.49	2.49	1.81	1.92	1.14	1.81
Hf	—	0.02	—	—	—	—	0.00
Pb	1.01	0.07	0.06	0.05	0.15	0.28	0.27
Ge	1.09	0.39	0.68	0.67	0.38	1.00	0.70
W	0.13	—	—	—	—	—	0.02
Ta	0.02	—	0.01	—	—	0.01	0.01
P	—	7.11	30.74	—	66.57	59.15	27.26
Ni/Cr	7.18	10.98	21.22	8.04	8.77	20.10	10.57
Ti/V	0.18	0.18	0.22	0.21	0.22	0.17	0.19

样品编号	II 组:与方解石共生纹层状磁铁矿						平均
	YLK1-2-8	YLK1-2-9	YLK1-2-10	YLK1-2-11	YLK1-2-12	YLK1-2-13	
Mg	185.94	198.94	258.55	242.85	200.14	313.45	233.31
Al	835.05	880.97	922.36	743.69	1 034.24	923.58	889.98
Si	630.01	1 243.13	870.03	1 665.29	631.26	1 001.04	1 006.79
Mn	1 090.53	1 050.16	1 159.88	1 102.52	1 197.40	1 092.70	1 115.53
Ti	600.00	564.00	582.00	540.00	560.00	600.00	574.33
Ca	84.04	182.07	95.70	563.35	88.88	203.08	202.85
Sc	0.08	0.25	—	0.01	0.26	0.04	0.11
V	3 796.86	3 658.96	3 340.41	3 370.56	3 395.92	3 445.47	3 501.36
Cr	5.91	8.78	11.87	—	5.06	8.64	6.71
Co	4.28	3.93	4.08	4.37	4.07	4.14	4.15
Ni	51.74	51.98	52.84	54.80	51.95	58.49	53.63
Cu	0.84	0.83	—	0.94	1.04	0.01	0.61
Zn	87.73	103.45	102.87	88.77	109.07	115.26	101.19
Ga	27.64	26.44	27.84	30.28	30.44	30.39	28.84
Y	0.01	0.04	0.06	1.14	0.06	1.64	0.49
Zr	0.99	1.29	0.32	82.49	1.23	0.95	14.55
Nb	—	0.02	0.01	0.04	—	0.04	0.02
Mo	—	0.09	0.15	0.16	0.08	0.19	0.11
Sn	2.12	1.93	2.44	1.74	2.09	1.95	2.05
Hf	0.03	0.03	—	2.11	—	—	0.36
Pb	0.17	0.51	0.15	0.74	0.15	0.15	0.31
Ge	1.53	0.78	0.54	0.80	0.80	0.61	0.84
W	0.02	—	—	0.03	—	0.40	0.08
Ta	—	—	0.01	0.03	—	0.08	0.02
P	—	18.10	20.69	—	4.67	—	7.24
Ni/Cr	8.75	5.92	4.45	—	10.27	6.77	7.99
Ti/V	0.16	0.15	0.17	0.16	0.16	0.17	0.16

注:“—”为低于检出限或未检测到。

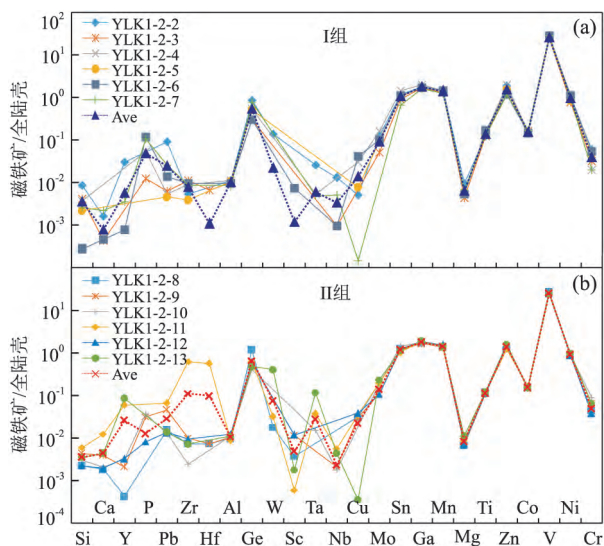


图 5 磁铁矿/全陆壳多元素蛛网图

Fig.5 Multi element variation spider diagrams for magnetite, normalized to bulk continental crust

a. YLK-I 组,与硬石膏共生稠密浸染状磁铁矿; b. YLK-II 组,与方解石共生纹层状磁铁矿; 大陆地壳数据来自 Rudnick and Gao(2003)

同类型的矿床 (Dupuis and Beaudoin, 2011; Dare et al., 2014; Hu et al., 2014; Nadoll et al., 2014; Zhou et al., 2017; Wang et al., 2017).

5.1 磁铁矿物质来源

Mg、Al、Si、P、Ca、Sc、Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Ge、Y、Zr、Nb、Mo、Sn、Hf、Ta、W、Pb,

这 25 个微量元素按照在磁铁矿中相容性递增顺序制作的磁铁矿微量元素蛛网图,能很好地反映微量元素在成矿过程中的行为变化以及磁铁矿的形成环境 (Dare et al., 2014).从图 5 可以看出,两组样品微量元素变化趋势基本一致,表明其可能为同一物质来源.磁铁矿两元素二元图解与相邻赞坎铁矿各类磁铁矿样品对比可以发现,Ti 和 Mg、Al 呈正相关,Ni 和 Co、Al 和 Ga 呈轻微负相关(图 6),并且叶里克样品特征与赞坎浸染状磁铁矿更相似.

YLK-I 组磁铁矿相比于 YLK-II 组更亏损 Zr、Hf、Sc、Ta 等高场强元素,表明越靠近石膏条带磁铁矿受热液作用影响越大 (Dare et al., 2014). YLK-I 组磁铁矿相比于 YLK-II 组更亏损 Ca,可能是由于硬石膏沉淀使得 Ca 离子进入到硬石膏晶格中,从而造成磁铁矿 Ca 含量降低.这也说明磁铁矿和硬石膏属于同期热液沉积成因.

将叶里克铁矿磁铁矿与典型岩浆矿床和热液矿床磁铁矿微量元素对比(图 7),可以看到两组样品与典型岩浆矿床显著不同(图 7a),明显富集不相容元素 Si 和 Ca,亏损 Mn、Mg、Ti、Zn、Co、V、Ni、Cr 等在岩浆磁铁矿中富集的元素.在图 7b 中,可以看出两组样品磁铁矿微量元素配分模式与热液矿床相当,且基本落在高温热液区域 (Dare et al., 2014) (蓝色区域).

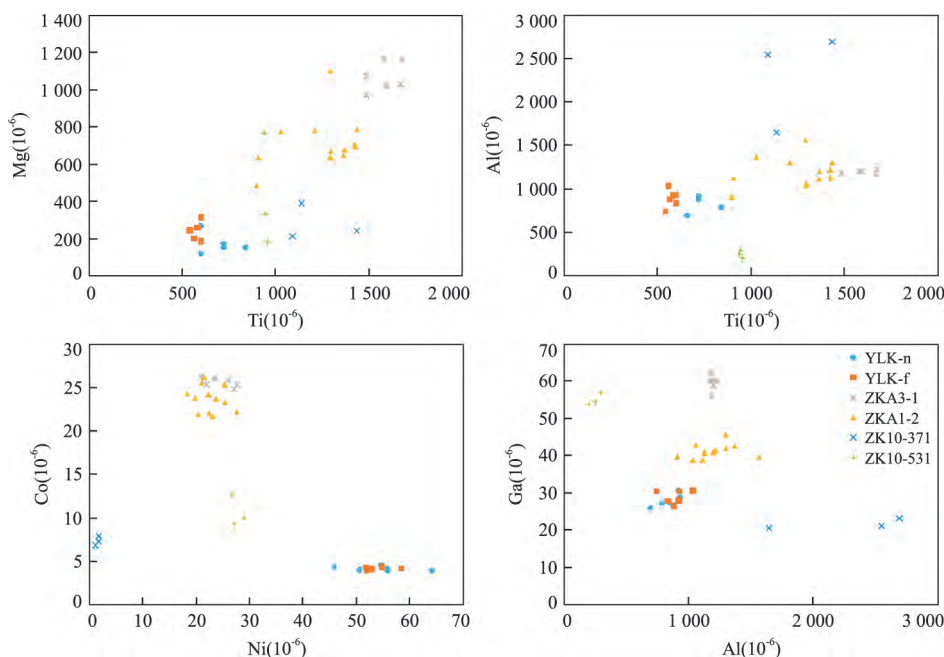


图 6 磁铁矿 Ti-Mg, Ti-Al, Ni-Co, Al-Ga 二元图解

Fig.6 Bi-plots of Ni vs. Co, Ti vs. Mg, Ti vs. Al, and Al vs. Ga of magnetite

ZKA3-1 为块状磁铁矿;ZKA1-2 为条带状磁铁矿;ZK10-371, ZK10-531 均为稠密浸染状磁铁矿;数据来自 Zhou et al.(2017)

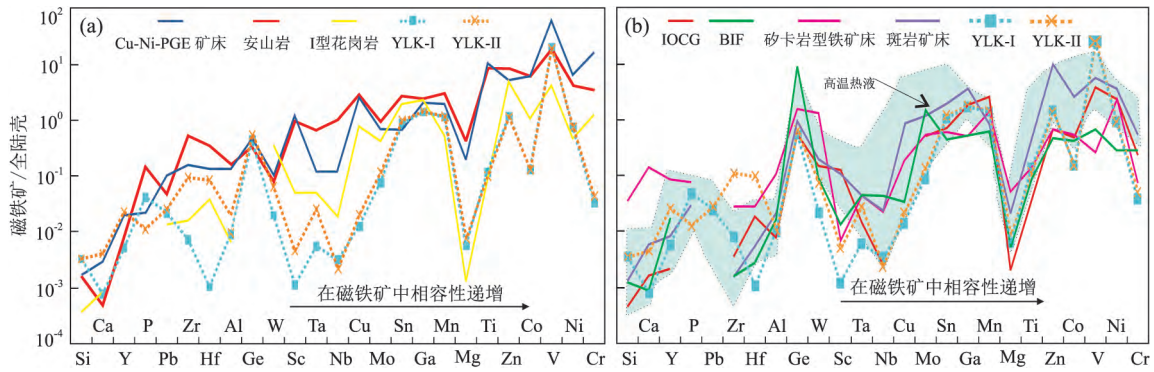


图 7 不同类型磁铁矿/全陆壳多元素蛛网图

Fig.7 Multi-element spider diagrams of average trace element concentrations of different genesis magnetites normalized to the bulk continental crust

IOCG、BIF、砂卡岩型铁矿床、I 型花岗岩、安山岩、Cu-Ni-PGE 矿床和斑岩矿床的磁铁矿数据来自 Dare *et al.* (2014); 大陆地壳数据来自 Rudnick and Gao (2003)

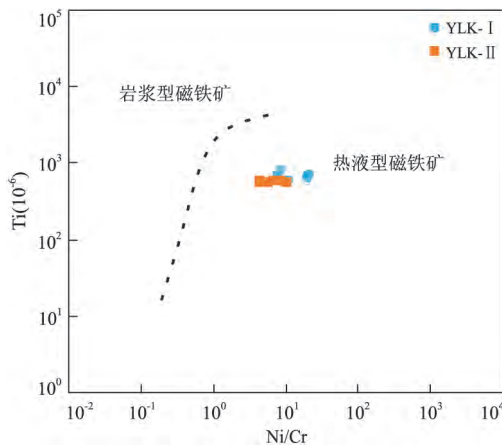


图 8 磁铁矿 Ti 与 Ni/Cr 二元图

Fig.8 Bi-plot of Ti vs. Ni/Cr ratio (un-normalized) of magnetite to distinguish magmatic and hydrothermal settings

底图据 Dare *et al.* (2014)

Ni 和 Cr 的地球化学行为特征在岩浆型磁铁矿和热液型磁铁矿中有很大的差别。在岩浆演化过程中它们的化学行为类似, 往往一起变化, 通常 $Ni/Cr \leq 1$ 。但是在热液过程中它们的行为发生分异, 在热液流体中 Ni 的溶解度远大于 Cr, 因此 Ni/Cr 升高, 通常 ≥ 1 。由此, 应用 Ti-Ni/Cr 二元图解可以区分岩浆磁铁矿和热液磁铁矿 (Dare *et al.*, 2014)。图 8 中, 叶里克磁铁矿 Ni/Cr 均大于 1, 落在热液磁铁矿区域, 指示叶里克磁铁矿为热液来源, 与岩相学的观察一致。

叶里克铁矿成矿物质火山起源尚可获得如下证据支持: (1) 叶里克铁矿赋矿岩层(斜长)黑云母角闪石英片岩中残留英安质火山集块岩(图 3c), 指示成矿与火山喷发作用关系密切, 铁质和富铁镁质脉石矿物可一起由火山喷发作用带来。通常沉积变质

铁矿 SiO_2/Al_2O_3 比值小于 10, 火山沉积变质铁矿 SiO_2/Al_2O_3 比值大于 10 (沈其韩等, 2009)。叶里克铁矿矿石样品 SiO_2/Al_2O_3 含量 > 50 (另文讨论), 显示出火山沉积变质的特征; (2) 原生沉积磁铁矿 $\delta^{18}O$ 值为 $+1.3\% \sim +6.8\%$, 由铁碳酸盐分解形成的磁铁矿 $\delta^{18}O$ 值高达 $+11.2\%$, 由赤铁矿还原形成的磁铁矿相较原生沉积磁铁矿 $\delta^{18}O$ 值低, 区域变质过程中磁铁矿 O 同位素变化不大 (李万亨和杨昌明, 1983)。叶里克与老井铁矿相邻产出, 且矿床特征类似, 具有一定的可比性(图 2)。老井铁矿区域磁铁矿 $\delta^{18}O$ 值在 $+4.1\% \sim +7.2\%$ 之间 (张哨波, 2016), 平均值为 6.0% , 与中基性火山岩基本一致, 指示铁矿成矿物质来源与中基性火山活动关系密切。

5.2 磁铁矿形成温度

Al 和 Ti 的含量无论在岩浆还是热液中都与温度有直接正相关性, (Al+Mn)-(Ti+V) 图解可以用来判别磁铁矿的形成温度 (Nadoll *et al.*, 2014)。图 9 中, 叶里克铁矿所有样品均落在 $300 \sim 500^\circ C$ 的高温区域, 与图 7 结果吻合; 进一步可以判定磁铁矿为高温热液来源。II 组温度要稍高于 I 组, 与两组样品微量元素含量特征相符, II 组微量元素含量大于 I 组, 指示随着形成温度升高, 元素在热液中溶解度增加 (Dare *et al.*, 2014; Nadoll *et al.*, 2014)。与之相较, 我国华北克拉通鞍本地区典型的阿尔戈马型 BIFs 磁铁矿成分在图 9 中落在 $200 \sim 300^\circ C$ 温度范围 (代表其形成的原始沉积温度)。而鞍本弓长岭二矿区富铁矿遭受角闪岩相区域变质作用, 变质温度达 $562 \sim 630^\circ C$ (Sun *et al.*, 2014), 其磁铁矿成分 (Sun *et al.*, 2018) 在图 9 中落在原始沉积温度范围之外, 并且 (Ti+V) 含量趋向于减少 (图 9)。而叶里

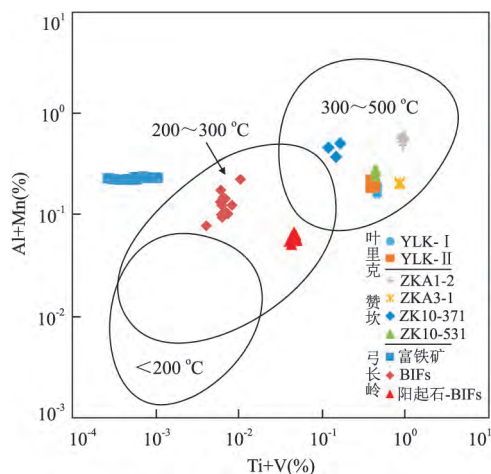


图 9 磁铁矿 (Al+Mn)-(Ti+V)形成温度

Fig.9 Relation of Al+Mn vs. Ti+V for different formation temperatures of magnetite

底图据 Nadoll *et al.* (2014); 数据来源: 叶里克, 本文; 赞坎铁矿: ZKA1-2, ZKA3-1, ZK10-371, ZK10-531 数据与图 6 相同, 据 Zhou *et al.* (2017); 鞍本地区弓长岭 BIFs 铁矿据 Sun *et al.* (2018)

克铁矿磁铁矿形成温度与赞坎铁矿各类磁铁矿基本一致, 并且所有样品点成分均未超出原始沉积温度范围, 表明后期绿片岩相的变质作用并未造成叶里克铁矿磁铁矿微量元素显著迁移。

5.3 磁铁矿形成氧逸度

V 常见化合价为 +4 价, 在磁铁矿中主要以离子半径较大的 +3 价形式存在; 而在高氧逸度条件下以 +5 价形式存在, 由于 V^{5+} 离子半径较小, 难以进入磁铁矿, 因此磁铁矿中 V 含量有助于指示成矿过程中氧逸度变化 (Toplis and Carroll, 1995; Bañan *et al.*, 2006; Bordage *et al.*, 2011; Nadoll *et al.*, 2014). 而 Ti 在成矿流体/熔体中只有一个价态, 并且有着稳定的分配系数, 氧逸度对磁铁矿中 Ti 含量影响不大 (Chung *et al.*, 2015), 因此还原性流体形成的磁铁矿具有较低的 Ti/V. 相反地, Sn^{4+} 在相对高氧逸度的条件下更容易进入磁铁矿晶格中置换 Fe^{3+} (Carew, 2004; Chen *et al.*, 2015). 本次样品中高的 V 含量 ($3.970 \times 10^{-6} \sim 3.260 \times 10^{-6}$) 和低的 Ti/V 比值 (0.22 ~ 0.15) 以及低的 Sn 含量 ($1.14 \times 10^{-6} \sim 2.49 \times 10^{-6}$) (表 1, 图 10), 指示成矿环境为还原性。

5.4 磁铁矿成因类型

在我国, 铁矿主要被划分为 8 种类型: 岩浆型、矽卡岩型、火山岩型、热液型、沉积变质型、沉积型、风化淋滤型以及成因不明型 (赵一鸣等, 2004). 其中火山岩型又划分为陆相火山岩型 (即玢岩型) 和海

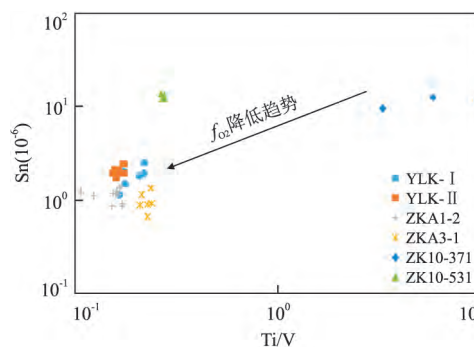


图 10 磁铁矿 Sn-Ti/V 二元图解判断氧逸度条件

Fig.10 Relation of Sn vs. Ti/V ratio (un-normalized) of magnetite

相火山岩型. 国际上, Dill (2010) 按照与构造-岩石的关系, 将铁矿类型划分为岩浆型、沉积岩型、变质岩型、以及与构造有关的铁矿 4 大类, 并且每类均划分为若干亚类和次亚类. 张招崇等 (2014) 对上述两种不同分类方案之间的对应关系进行了系统总结. 其中, 沉积变质型铁矿包括阿尔戈马型和苏必利尔湖型铁建造 (IFs 或 BIFs), 对应 Dill (2010) 方案中的变质岩型大类. 与岩浆-热液系统有关的铁矿类型则有岩浆型钒钛磁铁矿床、玢岩铁矿、矽卡岩型铁矿和海相火山岩型铁矿 (张招崇等, 2014).

Dupuis and Beaudoin (2011) 针对不同类型矿床 (并非全部为铁矿床, 有些磁铁矿作为副矿物研究) 中的磁铁矿开展电子探针原位分析, 发现不同类型矿床铁氧化物中 Ti、V 含量存在明显差异, Ti+V 与 Ca+Al+Mn 之间的关系可以作为矿床类型的判别依据. 在图 11a 中, 叶里克铁矿两类样品落入斑岩区域, 与典型的 BIFs 型 (Sun *et al.*, 2018)、矽卡岩型 (Wang *et al.*, 2017) 磁铁矿存在明显差异, V+Ti 和 Al+Mn+Ca 均明显高于 BIFs. 表明叶里克铁矿床主要形成于热液过程, 而非岩浆分离或正常的化学沉积. 叶里克样品在图 11b 中并未落入列出的任何一种铁矿类型区域, 也印证了前述判断. 结合如下证据: (1) 矿体为层状、似层状产出, 并整合赋存于火山岩地层中 (图 3, 图 4; 燕长海等, 2012); (2) 矿体呈现沉积特征 (图 3b, 图 4); (3) 矿物组合以 Fe-氧化物、Fe-硫酸盐 (重晶石、硬石膏、石膏) 为主, 加上少量 (含量不定) 石英; (4) 磁铁矿 Ti、Al、V 含量高, 指示其形成于相对还原的海底热液系统 (Carew, 2004); (5) 叶里克样品与相邻赞坎铁矿中浸染状磁铁矿微量元素特征基本一致 (图 6, 图 9, 图 11), 已有研究表明赞坎铁矿形成于海底热液系统 (Zhou *et al.*, 2017). 由此揭示叶里克铁矿应归类于

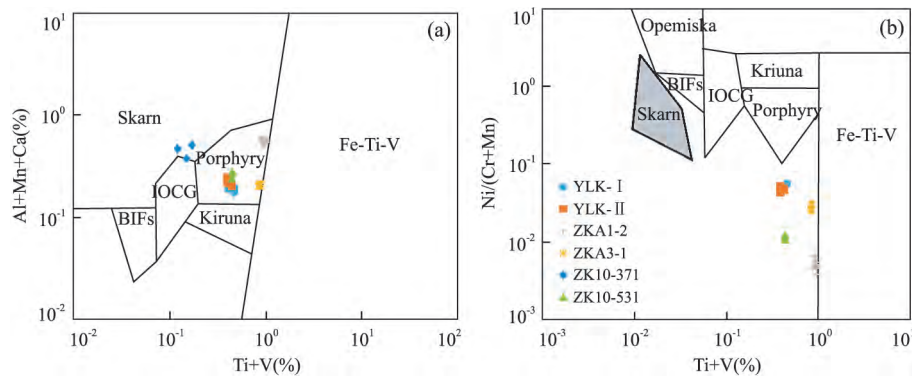


图 11 Ca+Al+Mn-Ti+V (a) Ni/(Cr+Mn)-Ti+V (b) 矿床类型

Fig.11 Diagram of Ca+Al+Mn-Ti+V (a) Ni/(Cr+Mn)-Ti+V (b) ore deposit types

底图据 Dupuis and Beaudoin(2011);Skarn.砂卡岩型铁矿;BIF.条带状铁建造;IOCG.铁氧化物型铜金矿床;Kiruna.基鲁纳型铁矿;Porphyry.斑岩型铁矿;Fe-Ti-V.岩浆钒钛磁铁矿.ZKA1-2,ZKA3-1,ZK10-371,ZK10-531 数据来自 Zhou *et al.*(2017)

海相火山岩型铁矿(赵一鸣等, 2004),对应于 Dill (2010)分类方案中的岩浆型铁矿大类中的火山岩(未变质)型铁矿亚类。

5.5 构造背景

黄朝阳(2014)对叶里克铁矿区黑云石英片岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,获得 510 Ma 的成岩年龄。李基宏和张连昌(2015,新疆地矿局地质科研项目(XGMB2012011):新疆塔什库尔干铁矿带成矿环境及找矿预测)在叶里克黑云石英片岩(原岩为泥质碎屑岩)中获得 9 个碎屑锆石中最年轻的锆石年龄为 529.7 ± 7.6 Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 535.9 ± 5.1 Ma;变质英安岩的形成年龄为 544.2 ± 8.2 Ma (MSWD=6.4, $n=38$),燕长海等(2012)在相邻老并矿区内统计了黑云母石英片岩及长英质片岩中碎屑锆石 U-Pb 年龄,得到加权平均值 532.0 ± 3.9 Ma 和 526 ± 5 Ma 的年龄。李基宏和张连昌(2015,新疆地矿局地质科研项目(XGMB2012011):新疆塔什库尔干铁矿带成矿环境及找矿预测)在老并铁矿体上盘的黑云石英片岩中测得锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值介于 502.3~586.0 Ma,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权年龄为 535.7 ± 6.6 Ma (MSWD=2.1, $n=39$)。这些年龄限定了叶里克铁矿的成矿时代为早寒武世。而 530~500 Ma 时期,正是西昆仑原特提斯洋南向俯冲到西南昆仑地体(SWKT)以及北向俯冲到西北昆仑地体(NWKT)和塔里木克拉通之下的阶段(林尚康, 2015;朱杰等, 2016;Zhu *et al.*, 2017;张航等, 2018;Zhang *et al.*, 2007, 2018a, 2018b,及其文献)。俯冲引发西昆仑造山带的早古生代岩浆活动及成矿作用(Xiao *et al.*, 2005;Liao *et al.*, 2010;Jia *et al.*, 2013;杨文强, 2013)。火山弧区强烈的岩浆活

动带来了大量的成矿物质;同时火山活动增强了海水的活动能力,萃取了原前寒武纪基底中巨量的铁质。在喀来子—老并—叶里克一带形成弧后拉张断陷盆地中心,发育一套火山—碎屑沉积—海底喷流沉积组合。由于陆源物质的加入,改变了水体的沉积环境,导致了铁质和盐类物质的卸载沉淀,形成区内普遍发育的膏(硬石膏、石膏)—铁(磁铁矿、黄铁矿)建造。同生断裂构造导致盆地内中—基性火山岩喷发,同时也是深部热液、铁质等向盆地内集中释放堆积的重要通道,更是海相火山岩型铁矿床形成的关键所在。

6 结论

(1)叶里克铁矿赋存于前泥盆纪布伦阔勒变质火山—沉积岩中。矿体通常与围岩为整合关系,呈层状、似层状产出。矿石为韵律、条带状构造,主要由 Fe-氧化物(磁铁矿)、Fe-硫化物(黄铁矿、磁黄铁矿)和硫酸盐(硬石膏),以及含量不定的石英组成。

(2)叶里克铁矿磁铁矿的 Mg、Al、Ti、V、Mn、Co、Ni、Zn、Sn 和 Ga 等微量元素变化特征揭示其形成于相对还原的海底高温热液体系。

(3)叶里克铁矿形成与早寒武世原特提斯洋南向俯冲到西南昆仑地体之下引发的火山弧岩浆作用有关,属于海相火山岩型铁矿。

致谢:野外工作得到新疆地矿局第二地质大队冯昌荣、郝延海、杨平友、年武强等高温热情、全方位的支持;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研究生吴艳爽、周曙光、项楠,北京大学研究生肖兵参加部分野外工作,特此感谢!中国科学院地球化学研究所戴智慧老师指导完成磁铁

矿原位分析测试;王艳军博士对数据处理提供了帮助;张传林教授,吴昌志教授以及另一位匿名审稿人提出了重要修改意见,使得稿件质量得到大幅度提高,在此表示衷心感谢!

References

- ASKI, 2016. China's Iron Ore Imports Reached a Record High of 9.527 2 Billion Tons in 2015. <http://www.askci.com/news/chanye/2016/01/13/155836w0g6.shtml> (in Chinese).
- Balan, E., Villiers, J.P.R.D., Eeckhout, S.G., et al., 2006. The Oxidation State of Vanadium in Titanomagnetite from Layered Basic Intrusions. *American Mineralogist*, 91(5-6): 953-956. <https://doi.org/10.2138/am.2006.2192>
- Bian, X.W., Zhu, H.P., Ji, W.H., et al., 2013. The Discovery of Qingbaikouan Plutonite in Taxorgan, Xinjiang, and Evidence from Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating of Intrusive Rock. *Northwestern Geology*, 46(1): 22-31 (in Chinese with English abstract).
- Bordage, A., Balan, E., Villiers, J.P.R.D., et al., 2011. V Oxidation State in Fe-Ti Oxides by High-Energy Resolution Fluorescence-Detected X-Ray Absorption Spectroscopy. *Physics and Chemistry of Minerals*, 38(6): 449-458. <https://doi.org/10.1007/s00269-011-0418-3>
- Carew, M.J., 2004. Controls on Cu-Au Mineralisation and Fe Oxide Metasomatism in the Eastern Fold Belt, NW Queensland, Australia (Dissertation). James Cook University, Queensland.
- Chen, D.H., Wu, Y.Z., Li, W.M., et al., 2013. Geological Characteristics and Genesis of the Iron Deposits in the Taxkorgan Area, West Kunlun. *Geotectonica et Metallogenia*, 37(4): 671-684 (in Chinese with English abstract).
- Chen, W.T., Zhou, M.F., Gao, J.F., et al., 2015. Geochemistry of Magnetite from Proterozoic Fe-Cu Deposits in the Kangdian Metallogenic Province, SW China. *Mineralium Deposita*, 50(7): 795-809. <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0575-7>
- Chung, D., Zhou, M.F., Gao, J.F., et al., 2015. In-Situ LA-ICP-MS Trace Elemental Analyses of Magnetite: The Late Palaeoproterozoic Sokoman Iron Formation in the Labrador Trough, Canada. *Ore Geology Reviews*, 65: 917-928. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.09.030>
- Dare, S.A.S., Barnes, S.J., Beaudoin, G., et al., 2014. Trace Elements in Magnetite as Petrogenetic Indicators. *Mineralium Deposita*, 49(7): 785-796. <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0529-0>
- Dill, H.G., 2010. The "Chessboard" Classification Scheme of Mineral Deposits: Mineralogy and Geology from Aluminum to Zirconium. *Earth-Science Reviews*, 100(1-4): 1-420. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.10.011>
- Dong, L.H., Feng, J., Liu, D.Q., et al., 2010a. Research for Classification of Metallogenic Unit of Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 28(1): 1-15 (in Chinese with English abstract).
- Dong, L.H., Feng, J., Zhuang, D.Z., et al., 2011a. Discussion of Metallogenic Models, Mineralization Characteristic and Main Type of Rich Iron Ore of Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 29(4): 416-422 (in Chinese with English abstract).
- Dong, L.H., Feng, J., Zhuang, D.Z., et al., 2011b. Xinjiang Geological Mineral Exploration Retrospect and Prospect. *Xinjiang Geology*, 29(1): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- Dong, L.H., Li, J.H., Feng, J., et al., 2012. The Main Achievement and Progress of Xinjiang Geology and Mineral Exploration in 2011. *Xinjiang Geology*, 30(1): 1-4 (in Chinese with English abstract).
- Dong, L.H., Qu, X., Zhu, Z.X., et al., 2010b. Tectonic Evolution and Metallogenesis of Xinjiang, China. *Xinjiang Geology*, 28(4): 351-357 (in Chinese with English abstract).
- Dupuis, C., Beaudoin, G., 2011. Discriminant Diagrams for Iron Oxide Trace Element Fingerprinting of Mineral Deposit Types. *Mineralium Deposita*, 46(4): 319-335. <https://doi.org/10.1007/s00126-011-0334-y>
- Gao, J.F., Zhou, M.F., Lightfoot, P.C., et al., 2013. Sulfide Saturation and Magma Emplacement in the Formation of the Permian Huangshandong Ni-Cu Sulfide Deposit, Xinjiang, Northwestern China. *Economic Geology*, 108: 1833-1848.
- Geology and Mineral Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 1993. Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Hu, H., Li, J.W., Lentz, D., et al., 2014. Dissolution-Reprecipitation Process of Magnetite from the Chengchao Iron Deposit: Insights into Ore Genesis and Implication for In-Situ Chemical Analysis of Magnetite. *Ore Geology Reviews*, 57: 393-405. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.07.008>
- Huang, C.Y., 2014. Geological Characteristics and Genesis of the Iron Ore Deposit in the Bulunkuole Group, West Kunlun, Xinjiang (Dissertation). Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou (in Chinese with English abstract).
- Huang, X.W., Zhou, M.F., Qiu, Y.Z., et al., 2015. In-Situ LA-ICP-MS Trace Elemental Analyses of Magnetite: The Bayan Obo Fe-REE-Nb Deposit, North China. *Ore Geology Reviews*, 65: 884-899. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.09.010>

- Ji, W. H., Li, R. S., Chen, S. J., et al., 2011. The Discovery of Palaeoproterozoic Volcanic Rocks in the Bulunkuoler Group from the Tianshuihai Massif in Xinjiang of Northwest China and Its Geological Significance. *Science in China (Series D)*, 41(9): 1268–1280 (in Chinese).
- Jia, R. Y., Jiang, Y. H., Liu, Z., et al., 2013. Petrogenesis and Tectonic Implications of Early Silurian High-K Calc-Alkaline Granites and Their Potassic Microgranular Enclaves, Western Kunlun Orogen, NW Tibetan Plateau. *International Geology Review*, 55 (8): 958–975. <https://doi.org/10.1080/00206814.2012.755766>
- Li, H. M., Wang, R. J., Xiao, K. Y., et al., 2010. Feasibility Analysis of Ensuring Iron Demand Mainly by Domestic Resources. *Geological Bulletin of China*, 29(1): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. H., Yang, C. M., 1983. Palaeotectonic and Geochemical Environment of Precambrian Submarine Volcanic Sedimentary Metamorphic Iron Ore in Luanxian of the Hebei Province. *Earth Science*, 8(3): 117–126 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. Y., Zhang, Z. W., Gao, Y. B., et al., 2011. Important Metallogenic Events and Tectonic Response of Qinling, Qilian and Kunlun Orogenic Belts. *Geology in China*, 38(5): 1135–1149 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. D., Wang, K. Z., 2000. The Tethys Framework and Its Tectonic Significance of Southwest Tarim and the Adjacent Region. *Xinjiang Geology*, 18(2): 113–120 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. D., Wang, Y. L., Huang, Z. L., 1996. Kangxiwar Shove Tectonic Belt (KSBT) and Its Significance. *Xinjiang Geology*, 14(3): 204–212 (in Chinese with English abstract).
- Liao, S. Y., Jiang, Y. H., Jiang, S. Y., et al., 2010. Subducting Sediment-Derived Arc Granitoids: Evidence from the Datong Pluton and Its Quenched Enclaves in the Western Kunlun Orogen, Northwest China. *Mineralogy and Petrology*, 100(1–2): 55–74. <https://doi.org/10.1007/s00710-010-0122-x>
- Lin, S. K., 2015. Study on Geochemistry and Zircon U-Pb Ages Dacite Porphyry from the Zankan Iron Deposit West Kunlun Area (Dissertation). Kunming University of Science and Technology, Kunming (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- Nadoll, P., Angerer, T., Mauk, J. L., et al., 2014. The Chemistry of Hydrothermal Magnetite: A Review. *Ore Geology Reviews*, 61: 1–32. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.12.013>
- Qiao, G. B., Wang, P., Wu, Y. Z., et al., 2015. Formation Age of Ore-Bearing Strata of the Zankan Iron Deposit in Taxkorgan Landmass of Western Kunlun Mountains and Its Geological Significance. *Geology in China*, 42(3): 616–629 (in Chinese with English abstract).
- Qu, J. F., Zhang, L. F., Ai, Y. L., et al., 2007. High-Pressure Granulite from Western Kunlun, Northwestern China: Its Metamorphic Evolution, Zircon SHRIMP U-Pb Ages and Tectonic Implication. *Science in China (Series D)*, 37(4): 429–441 (in Chinese).
- Robinson, A. C., 2015. Mesozoic Tectonics of the Gondwanan Terranes of the Pamir Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, 102: 170–179. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.09.012>
- Robinson, A. C., Ducea, M., Lapen, T. J., 2012. Detrital Zircon and Isotopic Constraints on the Crustal Architecture and Tectonic Evolution of the Northeastern Pamir. *Tectonics*, 31(2): 1–16. <https://doi.org/10.1029/2011tc003013>
- Rudnick, R. L., Gao, S., 2003. Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*, 3: 1–64.
- Şengör, A. M. C., Natal'in, B. A., Burtman, V. S., 1993. Evolution of the Altiid Tectonic Collage and Palaeozoic Crustal Growth in Eurasia. *Nature*, 364(6435): 299–307. <https://doi.org/10.1038/364299a0>
- Shen, Q. H., Song, H. X., 2015. Progress, Prospecting and Key Scientific Problems in Origin Researches of High-Grade Iron Ore of the Banded Iron Formation (BIF) in the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 2795–2815 (in Chinese with English abstract).
- Shen, Q. H., Song, H. X., Zhao, Z. R., 2009. Characteristics of Rare Earth Elements and Trace Elements in Hanwang Neo-Archaean Banded Iron Formations, Shandong Province. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(6): 693–699 (in Chinese with English abstract).
- Shi, G. H., Xie, Y. Q., 2014. The Occurrence Features of Ore Bodies from the Erik Iron Deposit and Analyses on Prospecting. *West-China Exploration Engineering*, 9: 134–138 (in Chinese with English abstract).
- Sun, X. H., Zhu, X. Q., Tang, H. S., et al., 2014. The Gongchangling BIFs from the Anshan-Benxi Area, NE China: Petrological-Geochemical Characteristics and Genesis of High-Grade Iron Ores. *Ore Geology Reviews*, 60: 112–125. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.12.017>
- Sun, X. H., Zhu, X. Q., Tang, H. S., et al., 2018. In Situ LA-ICP-

- MS Trace Element Analysis of Magnetite from the Late Neoproterozoic Gongchangling BIFs, NE China: Constraints on the Genesis of High-Grade Iron Ore. *Geological Journal*, 53(2): 8–20. <https://doi.org/10.1002/gj.3004>
- Toplis, M.J., Carroll, M.R., 1995. An Experimental Study of the Influence of Oxygen Fugacity on Fe-Ti Oxide Stability, Phase Relations, and Mineral-Melt Equilibria in Ferro-Basaltic Systems. *Journal of Petrology*, 36(5): 1137–1170. <https://doi.org/10.1093/ptrology/36.5.1137>
- Wang, C.M., Zhang, L., Tang, H.S., et al., 2017. Genesis of the Kaladawan Fe-Mo Ore Field in Altyn, Xinjiang, China: Constraints from Mineralogy and Geochemistry. *Ore Geology Reviews*, 81: 587–601. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.09.001>
- Wang, J.P., 2008. Geological Features and Tectonic Significance of Melange Zone in the Taxkorgan Area, West Kunlun. *Geological Bulletin of China*, 27(12): 2057–2066 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S.Y., Yao, J.X., Xiao, X.C., et al., 2003. Discovery of a Silurian Graptolite Fauna at Daftar, Taxkorgan County, Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 22(10): 839–840 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W.J., Windley, B.F., Liu, D.Y., et al., 2005. Accretionary Tectonics of the Western Kunlun Orogen, China: A Paleozoic–Early Mesozoic, Long-Lived Active Continental Margin with Implications for the Growth of Southern Eurasia. *The Journal of Geology*, 113(6): 687–705. <https://doi.org/10.1086/449326>
- Xu, Z.Q., Qi, X.X., Liu, F.L., et al., 2004. The Kangxiwar Caledonian Khondalite Series in West Kunlun, China, and Its Geological Significance. *Acta Geologica Sinica*, 78(6): 733–743 (in Chinese with English abstract).
- Yan, C.H., Chen, C.J., Cao, X.Z., et al., 2012. The Discovery of the “Pamir-Type” Iron Deposits in Taxkorgan Area of Xinjiang and Its Geological Significance. *Geological Bulletin of China*, 31(4): 549–557 (in Chinese with English abstract).
- Yang, K.G., Liu, Q., Zhang, C.L., et al., 2003. The Newly Discovered Granulite in the West Kunlun Kangxiwa Fault Zone. *Geological Science and Technology Information*, 22(1): 100, 104 (in Chinese).
- Yang, W.Q., 2013. The Indosinian Metamorphism, Magmatism and Formation Age of Bunlunkuole Rock Group in Taxkorgan-Kangxiwar Tectonic Belt, Western Kunlun (Dissertation). Northwest University, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Yang, W.Q., Liu, L., Cao, Y.T., et al., 2011. Geochronological Evidence of Indosinian (High-Pressure) Metamorphic Event and Its Tectonic Significance in Taxkorgan Area of the Western Kunlun Mountains, NW China. *Science in China (Series D)*, 41(8): 1047–1060 (in Chinese with English abstract).
- Yao, J.X., Xiao, X.C., Gao, L.D., et al., 2005. Discovery and Geological Significance of the Permian Sporopollen Fossils from Daftar, Taxkorgan, Xinjiang. *Journal of Palaeogeography*, 7(3): 321–326 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, W., Sun, F.Y., Zhao, C.S., et al., 2015. Genesis of Qieliekeqi Iron Deposit in West Kunlun, Xinjiang: Evidence from Geochemistry and Fluid Inclusions. *Geoscience*, 29(6): 1296–1308 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C.L., Li, H.K., Wang, H.Y., 2012. A Review on Precambrian Tectonic Evolution of Tarim Block: Possibility of Interaction between Neoproterozoic Plate Subduction and Mantle Plume. *Geological Review*, 58(5): 923–936 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C.L., Li, Z.X., Li, X.H., et al., 2007. An Early Paleoproterozoic High-K Intrusive Complex in Southwestern Tarim Block, NW China: Age, Geochemistry, and Tectonic Implications. *Gondwana Research*, 12(1–2): 101–112. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2006.10.006>
- Zhang, C.L., Lu, S.N., Yu, H.F., et al., 2007. Tectonic Evolution of the Western Kunlun Orogenic Belt in Northern Qinghai-Tibet Plateau: Evidence from Zircon SHRIMP and LA-ICP-MS U-Pb Geochronology. *Science in China (Series D)*, 37(2): 145–154 (in Chinese).
- Zhang, C.L., Yu, H.F., Wang, A.G., et al., 2005. Dating of Triassic Granites in the Western Kunlun Mountains and Its Tectonic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 79(5): 645–652 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C.L., Zou, H.B., Ye, X.T., et al., 2018a. A Newly Identified Precambrian Terrane at the Pamir Plateau: The Archean Basement and Neoproterozoic Granitic Intrusions. *Precambrian Research*, 304: 73–87. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.11.006>
- Zhang, C.L., Zou, H.B., Ye, X.T., et al., 2018b. Tectonic Evolution of the NE Section of the Pamir Plateau: New Evidence from Field Observations and Zircon U-Pb Geochronology. *Tectonophysics*, 723: 27–40. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.11.036>
- Zhang, H., Wang, Z.Q., Ma, C.Q., et al., 2018. Proto-Tethys Record in Paleo-Tethys Belt of East Kunlun: Evidence from Kuhai Mafic Blocks. *Earth Science*, 43(4): 1164–1182 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.714>
- Zhang, S.B., 2016. Genesis of Gypsolyte-Iron Formation of West

- Kunlun-Pamir Type Iron Deposits: A Case Study of Laobing Iron Deposit. *Mineral Resources and Geology*, 30(2): 151–156 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. C., Hou, T., Li, H. M., et al., 2014. Enrichment Mechanism of Iron in Magmatic-hydrothermal System. *Acta Petrologica Sinica*, 30(5): 1189–1204 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. C., Hou, T., Santosh, M., et al., 2014. Spatio-Temporal Distribution and Tectonic Settings of the Major Iron Deposits in China: An Overview. *Ore Geology Reviews*, 57: 247–263. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.08.021>
- Zhao, Y. M., 2004. Status of the Resources of Ironic Ores in China and Counter-Measures. *Georeview*, 50(4): 396, 417 (in Chinese).
- Zhao, Y. M., 2013. Main Genetic Types and Geological Characteristics of Iron-Rich Ore Deposits in China. *Mineral Deposits*, 32(4): 685–704 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. M., Wu, L. S., Bai, G., et al., 2004. Metallogeny of the Major Metallic Ore Deposits in China. Geological Publishing House, Beijing, 13–62 (in Chinese).
- Zhou, Z. J., Tang, H. S., Chen, Y. J., et al., 2017. Trace Elements of Magnetite and Iron Isotopes of the Zankan Iron Deposit, Westernmost Kunlun, China: A Case Study of Seafloor Hydrothermal Iron Deposits. *Ore Geology Reviews*, 80: 1191–1205. <https://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.09.020>
- Zhou, Z. J., Tang, H. S., Wu, Y. S., et al., 2018. Geology, Geochemistry and Genesis of the Zankan Iron Deposit in the West Kunlun Orogen, Xinjiang, China. *Ore Geology Reviews*, <https://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.09.009>
- Zhu, J., Li, Q. G., Chen, X., et al., 2017. Geochemistry and Petrogenesis of the Early Palaeozoic Appinite-Granite Complex in the Western Kunlun Orogenic Belt, NW China: Implications for Palaeozoic Tectonic Evolution. *Geological Magazine*, 32: 1–26. <https://doi.org/10.1017/s0016756817000450>
- Zhu, J., Li, Q. G., Wang, Z. Q., et al., 2016. Magmatism and Tectonic Implications of Early Cambrian Granitoid Plutons in Tianshuihai Terrane of the Western Kunlun Orogenic Belt, Northwest China. *Northwestren Geology*, 49(4): 1–18 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献
- 中商情报网, 2016. 2015 年中国铁矿石进口 9.527 2 亿吨创历史新高纪录水平. <http://www.askci.com/news/chanye/2016/01/13/155836w0g6.shtml>
- 边小卫, 朱海平, 计文化, 等, 2013. 新疆塔什库尔干县南青白口纪侵入体的发现——来自 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年的证据. *西北地质*, 46(1): 22–31.
- 陈登辉, 伍跃中, 李文明, 等, 2013. 西昆仑塔什库尔干地区磁铁矿矿床特征及其成因. *大地构造与成矿学*, 37(4): 671–684.
- 董连慧, 冯京, 刘德权, 等, 2010a. 新疆成矿单元划分方案研究. *新疆地质*, 28(1): 1–15.
- 董连慧, 冯京, 庄道泽, 等, 2011a. 新疆富铁矿成矿特征及主攻类型成矿模式探讨. *新疆地质*, 29(4): 416–422.
- 董连慧, 冯京, 庄道泽, 等, 2011b. 新疆地质矿产勘查回顾与展望. *新疆地质*, 29(1): 1–6.
- 董连慧, 李基宏, 冯京, 等, 2012. 新疆地质矿产勘查 2011 年主要成果和进展. *新疆地质*, 30(1): 1–4.
- 董连慧, 屈迅, 朱志新, 等, 2010b. 新疆大地构造演化与成矿. *新疆地质*, 28(4): 351–357.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京: 地质出版社.
- 黄朝阳, 2014. 西昆仑布伦阔勒群铁矿床地质特征及成因研究(博士学位论文). 广州: 中国科学院广州地球化学研究所.
- 计文化, 李荣社, 陈守建, 等, 2011. 甜水海地块古元古代火山岩的发现及其地质意义. *中国科学(D 辑)*, 41(9): 1268–1280.
- 李厚民, 王瑞江, 肖克炎, 等, 2010. 立足国内保障国家铁矿资源需求的可行性分析. *地质通报*, 29(1): 1–7.
- 李万亨, 杨昌明, 1983. 冀东滦县地区前震旦纪海底火山沉积变质铁矿的古构造及地球化学环境. *地球科学*, 8(3): 117–126.
- 李文渊, 张照伟, 高永宝, 等, 2011. 秦祁昆造山带重要成矿事件与构造响应. *中国地质*, 38(5): 1135–1149.
- 李向东, 王克卓, 2000. 塔里木盆地西南及邻区特提斯格局和构造意义. *新疆地质*, 18(2): 113–120.
- 李向东, 王元龙, 黄智龙, 1996. 康西瓦走滑构造带及其大地构造意义. *新疆地质*, 14(3): 204–212.
- 林尚康, 2015. 西昆仑赞坎铁矿区英安斑岩地球化学特征及 U-Pb 年代学研究(硕士学位论文). 昆明: 昆明理工大学.
- 乔耿彪, 王萍, 伍跃中, 等, 2015. 西昆仑塔什库尔干陆块赞坎铁矿赋矿地层形成时代及其地质意义. *中国地质*, 42(3): 616–629.
- 曲军峰, 张立飞, 艾永亮, 等, 2007. 西昆仑塔什库尔干高压麻粒岩 PT 轨迹、SHRIMP 锆石定年及其大地构造意义. *中国科学(D 辑)*, 37(4): 429–441.
- 沈其韩, 宋会侠, 2015. 华北克拉通条带状铁建造中富铁矿成因类型的研究进展、远景和存在的科学问题. *岩石学报*, 31(10): 2795–2815.
- 沈其韩, 宋会侠, 赵子然, 2009. 山东韩旺新太古代条带状铁矿的稀土和微量元素特征. *地球学报*, 30(6): 693–699.

- 石光辉,谢月桥,2014.叶里克铁矿矿体产状特征及找矿标志分析.西部探矿工程,9: 134-138.
- 王建平,2008.西昆仑塔什库尔干混杂岩的地质特征及其大地构造意义.地质通报,27(12): 2057-2066.
- 王世炎,姚建新,肖序常,等,2003.新疆塔什库尔干县达布达志留纪笔石动物群的新发现.地质通报,22(10): 839-840.
- 许志琴,戚学祥,刘福来,等,2004.西昆仑康西瓦加里东期孔兹岩系及地质意义.地质学报,78(6): 733-743.
- 燕长海,陈曹军,曹新志,等,2012.新疆塔什库尔干地区“帕米尔式”铁矿床的发现及其地质意义.地质通报,31(4): 549-557.
- 杨坤光,刘强,张传林,等,2003.西昆仑康西瓦断裂带新发现的麻粒岩.地质科技情报,22(1): 100, 104.
- 杨文强,2013.西昆仑塔县—康西瓦构造带印支期变质、岩浆作用及布伦阔勒岩群的形成时代(博士学位论文).西安:西北大学.
- 杨文强,刘良,曹玉亭,等,2011.西昆仑塔什库尔干印支期(高压)变质事件的确定及其构造地质意义.中国科学(D辑),41(8): 1047-1060.
- 姚建新,肖序常,高联达,等,2005.新疆塔什库尔干县达布达志留纪二叠纪孢粉化石的发现及其地质意义.古地理学报,7(3): 321-326.
- 曾威,孙丰月,赵财胜,等,2015.新疆西昆仑切列克其铁矿成因——地球化学及流体包裹体证据.现代地质,29(6): 1296-1308.
- 张传林,李怀坤,王洪燕,2012.塔里木地块前寒武纪地质研究进展评述.地质论评,58(5): 923-936.
- 张传林,陆松年,于海峰,等,2007.青藏高原北缘西昆仑造山带构造演化:来自锆石 SHRIMP 及 LA-ICP-MS 测年的证据.中国科学(D辑),37(2): 145-154.
- 张传林,于海峰,王爱国,等,2005.西昆仑西段三叠纪两类花岗岩年龄测定及其构造意义.地质学报,79(5): 645-652.
- 张航,王宗起,马昌前,等,2018.东昆仑古特提斯构造带中的原特提斯记录:来自苦海镁铁质岩块的证据.地球科学,43(4): 1164-1182.
- 张哨波,2016.西昆仑帕米尔式铁矿床膏铁建造成因探讨——以老井铁矿为例.矿产与地质,30(2): 151-156.
- 张招崇,侯通,李厚民,等,2014.岩浆—热液系统中铁矿的富集机制探讨.岩石学报,30(5): 1189-1204.
- 赵一鸣,2004.中国铁矿资源现状、保证程度和对策.地质论评,50(4): 396-417.
- 赵一鸣,2013.中国主要富铁矿床类型及地质特征.矿床地质,32(4): 685-704.
- 赵一鸣,吴良士,白鸽,等,2004.中国主要金属矿床成矿规律.北京:地质出版社,13-62.
- 朱杰,李秋根,王宗起,等,2016.西昆仑甜水海地体早寒武世花岗岩浆作用及其构造意义.西北地质,49(4): 1-18.