

西昆仑塔什库尔干地区赞坎铁矿床磁铁矿元素地球化学特征及其对成矿的制约*

陈登辉^{1,2,3}, 隋清霖^{1,2,3}, 赵晓健^{1,2,3}, 李旭拓^{1,2,3}, 高永宝^{1,2,3}, 王志华^{1,2,3}

(1 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054; 2 中国地质调查局造山带地质研究中心, 陕西 西安 710054; 3 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

摘要 赞坎铁矿床是塔什库尔干地区一个典型的沉积变质型铁矿, 具有多阶段成矿的特征, 是塔什库尔干地区铁矿成矿作用演化的典型代表。文章将赞坎铁矿床主要矿石矿物磁铁矿的形成划分为3个世代, 分别为条带状磁铁矿、浸染状磁铁矿和粗晶脉状或块状磁铁矿, 分别代表3个成矿阶段的产物。电子探针和 LA-ICP-MS 原位分析表明, 赞坎铁矿从条带状磁铁矿到粗晶块状磁铁矿随着磁铁矿的成矿演化主量元素中 Al 元素有减少的趋势, 而 Ti、Mn、Mg、V 元素均具有增加的趋势; 微量元素中 Co、Nb、Hf、Ta 等具有减少的趋势, Sc、Ga、Zr、Sn 等元素具有增加的趋势。根据以上各成矿阶段中磁铁矿成分变化, 并结合前人的研究成果发现, 赞坎铁矿早期条带状磁铁矿与火山沉积作用有关, 成矿后期特别是在粗晶块状和脉状磁铁矿阶段受岩浆热液影响明显, 富铁矿有岩浆热液的参与。

关键词 地球化学; 赞坎铁矿; 磁铁矿; LA-ICP-MS; 电子探针; 西昆仑

中图分类号: P618.31

文献标志码: A

Geochemical characteristics of magnetite from Zankan iron deposit in Tashenkuergan orefield and its constraint on mineralization

CHEN DengHui^{1,2,3}, SUI QingLin^{1,2,3}, ZHAO XiaoJian^{1,2,3}, LI XuTuo^{1,2,3}, GAO YongBao^{1,2,3} and WANG ZhiHua^{1,2,3}

(1 Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MNR, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2 Research Center for Orogenic Geology, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3 Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract

Zankan iron deposit is a typical sedimentary metamorphic iron deposit, with a multi-stage ore-forming process. It is a representative of the iron mineralization evolution in the Tashenkuergan orefield. The magnetite formation is divided into three stages: banded magnetite, disseminated magnetite, and coarse-grained vein or massive magnetite. In situ electron microprobe and LA-ICP-MS analyses of magnetite from Zankan iron deposit show that, accompanying the evolution of mineralization, the major elements has trends of Al decreasing, Ti, Mn, Mg and V increasing whereas the trace elements had trends of Co, Nb, Hf and Ta decreasing and Sc, Ga, Zr and Sn increasing. Combined with previous studies, the varying compositions of magnetite in various stages indicate that the early stage of banded magnetite was related to the submarine volcanic sedimentation, the final stage of coarse-grained vein or massive magnetite was obviously affected by magmatic hydrothermal activity, and the magmatic hydro-

* 本文得到国家自然科学基金项目(编号:41503046, 41402079)、陕西省自然科学基金(编号:2017JM4024)和中国地质调查局地质调查项目(编号:12120115019501)联合资助

第一作者简介 陈登辉, 男, 1980年生, 博士, 高级工程师, 主要从事沉积学和矿床学研究。Email: 47134454@qq.com

收稿日期 2018-10-05; 改回日期 2018-12-30。赵海杰编辑。

thermal fluid took part in the formation of high-grad iron ore deposit.

Key words: geochemistry, Zankan iron deposit, magnetite, electron microprobe, LA-ICP-MS, western Kunlun

塔什库尔干铁矿矿集区是南疆地区重要的铁矿矿集区(胡建卫等,2010;冯昌荣等,2012;燕长海等,2012a;2012;陈登辉等,2013;周振菊等,2018),位于新疆西昆仑塔什库尔干塔吉克自治县马尔洋乡-达布达尔乡一带,属于喀喇昆仑山区。塔什库尔干地区磁铁矿含矿地层主要为古元古界布伦阔勒岩群,在区内出露于康西瓦-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。2003年新疆地矿局第二地质大队在塔什库尔干地区古元古界布伦阔勒岩群与花岗岩接触带上发现了赞坎铁矿,初步确定其成因类型为“矽卡岩型”(陈勇等,2006),2003至2004年河南省地质调查院承担塔什库尔干1:25万区域地质调查,在赞坎铁矿的北西部发现了老并铁矿,并提出了“沉积变质型”的新成因认识(王世炎等,2004),虽然大多数学者认为其为“沉积变质型”铁矿(冯昌荣等,2011;陈俊魁等,2011;刘宇等,2011;陈曹军等,2011;王彪等,2011;冯昌荣等,2012;燕长海等,2012a;2012b;陈登辉等,2013)。但是对该地区铁矿床成因系统的研究工作较少,继续开展该地区铁矿原位地球化学特征及成因研究,对于完善该地区铁矿成矿模式、总结成矿规律和指导找矿勘查都具有重要的意义。

矿物微区地球化学特征越来越多的应用于成矿流体、成矿物理化学条件及成矿物质富集过程研究。相对于传统的分析方法,电子探针和激光剥蚀电感耦合等离子质谱(LA-ICP-MS)测试技术以其较强的空间分辨率、抗干扰能力、较低的检测限等优势受到科研工作者的广泛应用(胡明月等,2008;Cook et al., 2009;邱检生等,2009;贾泽荣等,2009;Koglin et al., 2010;张乐骏等,2011;袁继海等,2011;Zheng et al., 2013)。磁铁矿作为铁矿床中最常见的矿石矿物及常见的副矿物,产出于多种地质环境中,其地球化学特征对于其成因有较好的指示意义(徐国凤等,1979;林师整,1982;陈光远等,1987;Singoyi et al., 2006;Dupuis et al., 2011)。尽管磁铁矿微区地球化学特征研究尚在尝试阶段,但是已经取得了一些研究成果(周涛发等,2010;段超等,2012;Chen et al., 2015;Chung et al., 2015;Huang et al., 2015;2016),为不同成矿作用中磁铁矿的成因厘定提供了新的技术

方法(Nadoll et al., 2011; Li et al., 2015; Zhao et al., 2015; Wang et al., 2017; Wen et al., 2017; 陈应华等, 2018)。

赞坎铁矿位于塔什库尔干矿集区中部,属于沉积变质型铁矿,但是经受了多期变质作用改造,岩石普遍发育矽卡岩化,矿石及围岩中磁铁矿重结晶明显。文章在详细野外工作基础上,选择不同成矿阶段的矿石进行电子探针和LA-ICP-MS微量元素分析,探讨磁铁矿在成矿过程中的演化特征。

1 矿集区及矿床地质特征

西昆仑地区处于印度板块与塔里木板块结合部位,区内深大断裂极其发育。研究区大地构造位置处于甜水海北羌塘地块群中的塔什库尔干陆块(图1a)(李荣社等,2008),属于区内塔阿西-塔吐鲁沟铁矿带。受塔阿西断裂(喀喇昆仑断裂)和康西瓦断裂(苏巴什-康西瓦-瓦恰断裂带)2条区域性大断裂的影响,构造线呈北西-南东走向。出露地层主要为古元古界布伦阔勒岩群和志留系温泉沟群。古元古界布伦阔勒岩群呈北西-南东向产出,属于角闪岩相区域变质岩,岩性主要为黑云斜长片麻岩、黑云石英片岩,原岩为碎屑岩夹碳酸盐岩及少量火山岩建造。志留系温泉沟组主要分布于布伦阔勒岩群的西部,局部地区与布伦阔勒岩群呈断层接触关系。区内岩浆活动强烈,岩浆岩发育,以古生代、中生代及新生代侵入岩为主,为中酸性侵入岩,前寒武纪岩体出露较少,主要为少量的辉长岩和花岗闪长岩等(张传林等,2005;2012;边小卫等,2013;周振菊等,2018)。

赞坎铁矿位于塔什库尔干矿集区中部(图1b),矿区内出露地层主要为古元古界布伦阔勒群(Pt_1B)及下志留统温泉沟群(S_1W),均呈单斜产出,走向为约北西 300° ,倾向北东向,倾角约 $30^\circ\sim 80^\circ$ 。矿区南部发育志留系温泉沟群碎屑岩,在赞坎河谷中分布有全新统砂砾石。古元古界布伦阔勒群(Pt_1B)为主要的赋矿地层,可以识别出黑云母斜长片麻岩段(Pt_1B^a),构成赞坎Ⅱ号矿体容矿岩石;角闪斜长片麻岩段(Pt_1B^b);黄钾铁矾化斜长角闪片岩段(Pt_1B^c)为Ⅰ号磁铁矿体容矿岩石;角闪斜长片岩段(Pt_1B^d)为

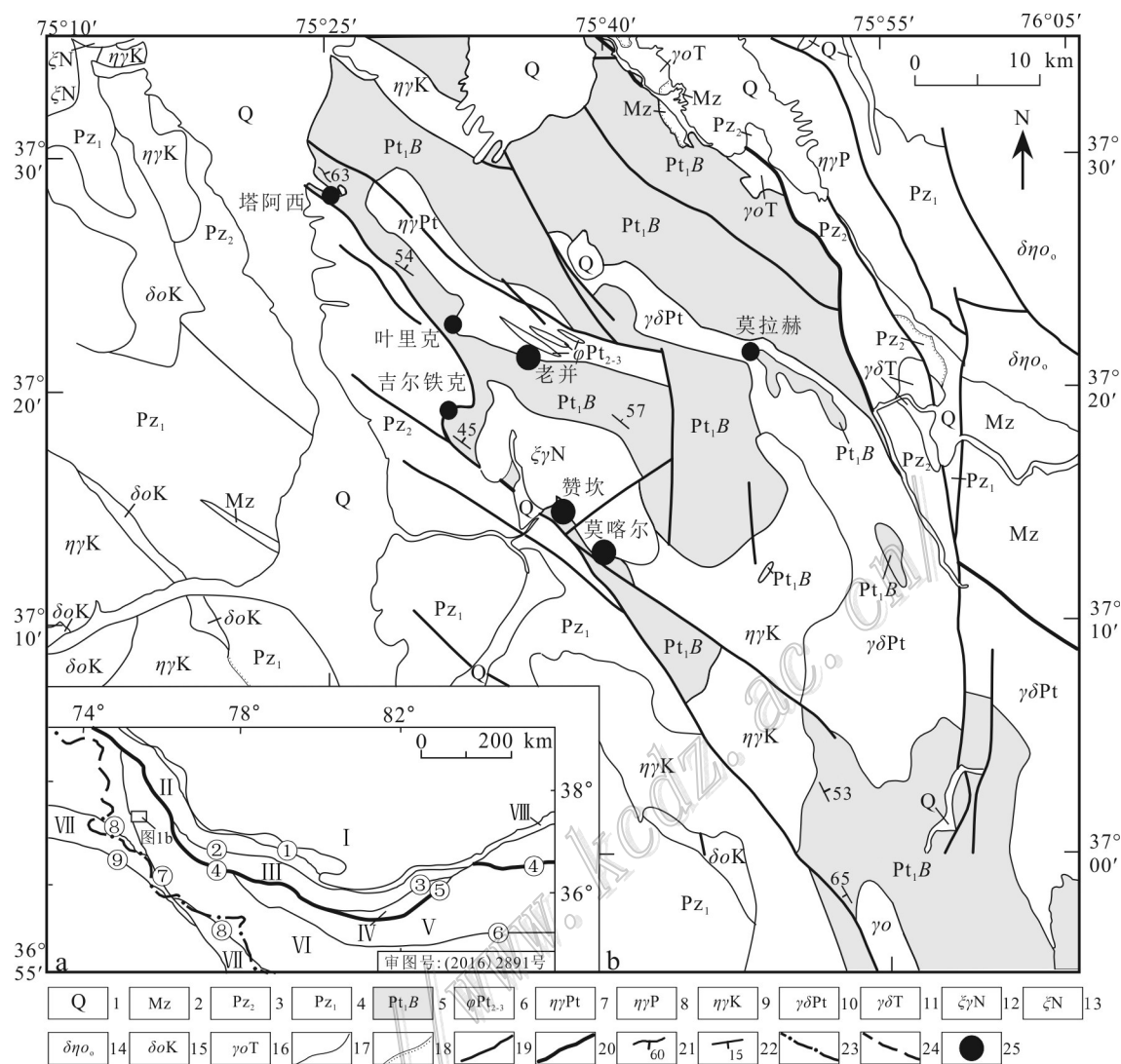


图1 塔什库尔干地区构造位置简图(a)和区地质矿产略图(b)(据王世炎等, 2004)

- 1—第四系; 2—中生界; 3—晚古生界; 4—早古生界; 5—布伦纳勒岩群; 6—角闪岩; 7—二长花岗岩; 8—二长花岗岩; 9—二长花岗岩;
10—花岗闪长岩; 11—花岗闪长岩; 12—正长花岗岩; 13—霓辉正长岩; 14—石英二长闪长岩; 15—石英闪长岩; 16—英云闪长岩;
17—地质界线; 18—不整合界线; 19—一般断裂; 20—区域性断裂; 21—片麻理产状; 22—地层产状; 23—国界; 24—未定国界; 25—铁矿床
- ①—库尔良-柯岗断裂带; ②—库地-其漫于特结合带; ③—昆中断裂带; ④—苏巴什-康西瓦-瓦恰断裂带; ⑤—阿尔金山断裂带;
⑥—郭扎错-西金乌兰湖结合带; ⑦—喀喇昆仑断裂; ⑧—龙木错-双湖结合带; ⑨—雅鲁藏布-印度河结合带;
I—塔里木地块; II—西昆北地块; III—西昆中地块; IV—南昆仑晚古生代残弧带; V—巴颜喀拉地块;
VI—甜水海北羌塘微地块群; VII—喀喇昆仑南羌塘地块; VIII—阿尔金造山带

Fig. 1 Simplified tectonic map (a) and geological map of Taxkorgan area (b) (after Wang et al., 2004)

- 1—Quaternary; 2—Mesozoic strata; 3—Late Palaeozoic strata; 4—Palaeozoic strata; 5—Bulunkuo Group; 6—Amphibolite; 7—Monzogranite;
8—Monzogranite; 9—Monzogranite; 10—Granodiorite; 11—Granodiorite; 12—Orthoclase granite; 13—Aegirine-augite syenite; 14—Quartz monzodiorite; 15—Quartz diorite; 16—Tonalite; 17—Geological boundary; 18—Unconformity boundaries; 19—Fracture; 20—Regional fracture;
21—Gneissosity attitude; 22—Stratigraphic attitude; 23—National boundaries; 24—Not determined international boundary; 25—Iron deposit
- ①—Kuerliang-Kegang fault zone; ②—Kudi-Qimanyute suture zone; ③—Middle Kunlun fault zone; ④—Subashen-Kangxiwa-Waqia fault zone; ⑤—Altun fault zone; ⑥—Guozhacuo-Xijinwulan lake suture zone; ⑦—Karakorum fault;
⑧—Mulongcuo-Shuanghu suture zone; ⑨—Yarlung Tsangpo-Indus River suture zone;
I—Tarim block; II—North west Kunlun block; III—Middle west-Kunlun block; IV—South Kunlun late Paleozoic belt; V—Bayan Har block;
VI—Tianshuihai-North Qiangtang micro-block Group; VII—Karakorum-south Kunlun block; VIII—Altun orogenic belt

Ⅲ、Ⅳ号矿(化)带的赋存部位(图2)。

矿床中共发现13条磁铁矿(化)体,其中主要矿体为M1、M2、M3、M4号,平均品位约35%。矿体产出受片理面控制,走向均为NW~SE向,倾向NE,矿体最长延伸5.9 km。矿石矿物主要为磁铁矿,根据结构构造和空间分布特征可以识别出3个成矿阶段,分别对应了不同的矿石类型:条带状磁铁矿(图3a)、细粒浸染状磁铁矿(图3b)、粗粒块状或脉状磁铁矿(图3c~f)。条带状磁铁矿主要产出于矿区东南部距离花岗岩体较远的位置,矿区内仅少量残留,细粒浸染状磁铁矿和粗粒块状脉状磁铁矿距离矿区中部花岗岩体较近,发育了不同程度的矽卡岩化,含有大量的阳起石、透辉石、电气石等矽卡岩矿物,其中粗粒块状磁铁矿是赞坎铁矿主要矿石类型,主要代表为矿区西部M1、M3矿体,局部为品位50%以上的富铁矿。在后期岩浆热液活动过程中形成了大量的黄铁矿呈脉状产出于磁铁矿矿石及围岩中,反映赞坎铁矿多阶段成矿的特点。

2 样品采集

在详细野外地质调查工作基础上,采集代表成

矿作用不同阶段的矿石作为测试对象,分别为:条带状磁铁矿矿石(图3a),样品有ZK06、ZK08、ZK18、ZK20;细粒浸染状磁铁矿矿石(图3b),样品有ZK04、ZK05、ZK07;粗粒块状(图3c、d)或脉状(图3e、f)磁铁矿矿石,样品有ZK01、ZK02、ZK03。其中条带状磁铁矿在赞坎铁矿产出较少,磁铁矿含量约15%,呈他形,条带状分布(4a、d),浅色条带主要为长石、绿泥石、硬石膏和少量石英,此类矿石样品主要采自赞坎矿区3号矿体及其向东南方向的延伸带;细粒浸染状磁铁矿矿石主要产出于赞坎铁矿M1、M3矿体边部,磁铁矿呈细粒半自形-自形(图4b),发育少量的黄铁矿、磷灰石、黑云母和石榴子石等,磁铁矿含量一般约30%,此类矿石样品主要采集于赞坎铁矿中部M1、M3矿体边部;粗粒块状、脉状磁铁矿主要产出于赞坎铁矿中部M1、M3矿体中,磁铁矿多为粗粒自形-半自形,发育大量阳起石、石榴子石、电气石等矽卡岩矿物(图4c、e、f),磁铁矿含量约50%,此类样品主要采集于赞坎铁矿M1、M3矿体中部。局部粗晶脉状磁铁矿产出于膏盐层之中(图3e),主要产出于赞坎矿区南部M5号矿体之中、在中部的M1、M3号矿体边部也有少量产出。

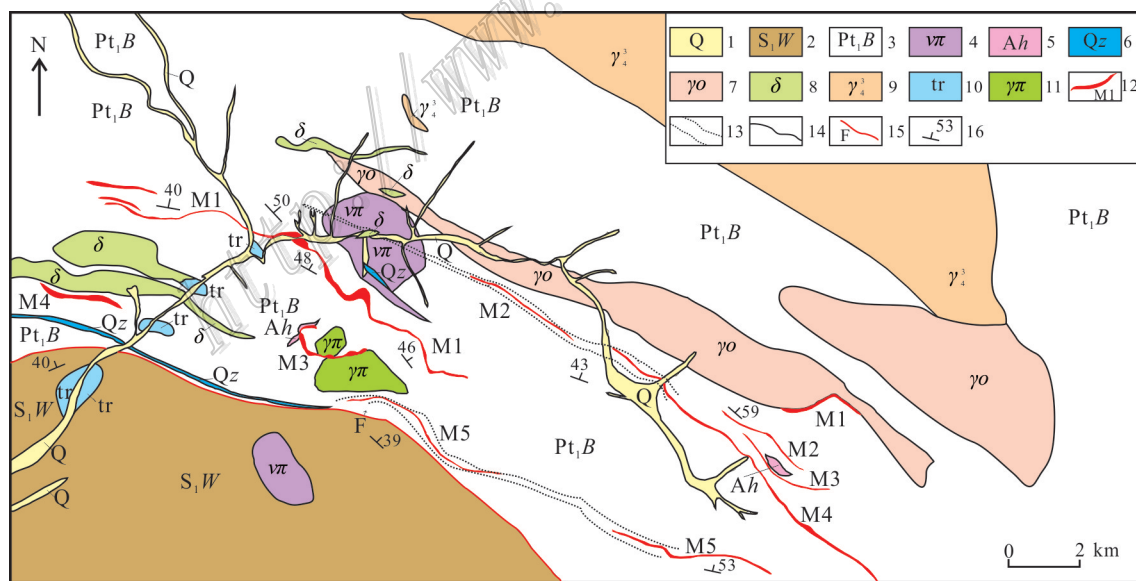


图2 塔什库尔干地区赞坎铁矿矿区地质简图

1—第四系;2—温泉沟群;3—布伦阔勒岩群;4—霏细岩;5—石膏;6—石英岩;7—斜长花岗岩;8—闪长岩;
9—花岗岩;10—碎裂岩;11—花岗斑岩;12—磁铁矿体及编号;13—矿化带;14—地质界线;15—断层;16—地层产状

Fig. 2 Geological sketch map of the Zankan iron deposit in Taxkorgan area

1—Quaternary; 2—Wenquangou Group; 3—Bunlunkuo Group; 4—Felsite; 5—Gypsum; 6—Quartzite; 7—Plagioclase granite; 8—Diorite; 9—Granite;
10—Cataclasite; 11—Granite porphyry; 12—Magnetite ore; 13—Mineralized belt; 14—Geological boundary; 15—Fault; 16—Stratigraphic attitude

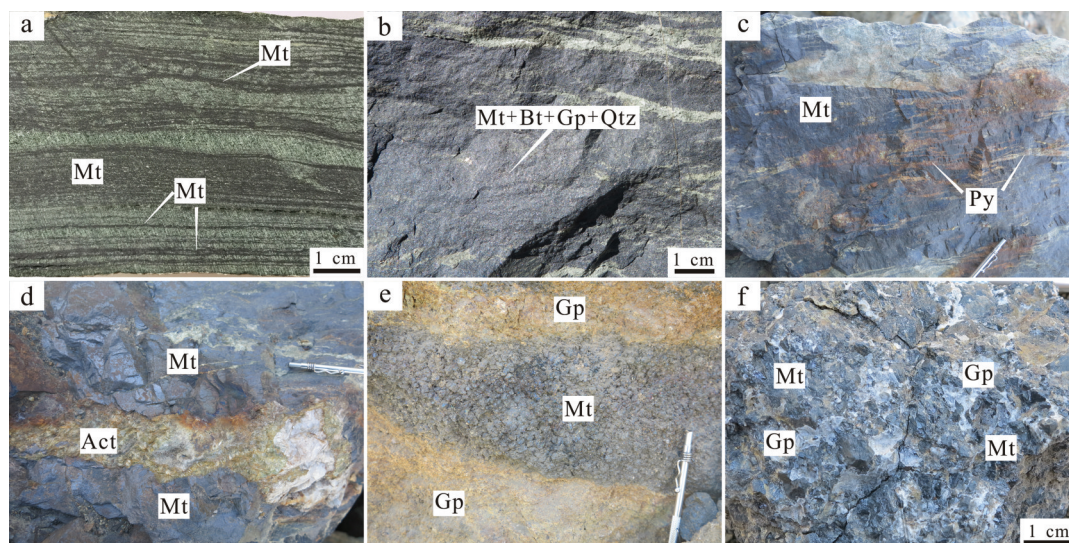


图3 赞坎铁矿矿石照片

a. 条带状磁铁矿; b. 浸染状磁铁矿; c. 块状磁铁矿; d. 粗晶磁铁矿; e. 粗晶脉状磁铁矿; f. 粗晶磁铁矿

Mt—磁铁矿; Bt—黑云母; Py—黄铁矿; Act—阳起石; Gp—石膏

Fig. 3 Photos of ores from Zankan iron deposit

a. Banding magnetite; b. Disseminated magnetite; c. Massive magnetite; d. Coarse magnetite; e. Coarse vein magnetite; f. Coarse magnetite

Mt—Magnetite; Bt—Biotite; Py—Pyrite; Act—Actinolite; Gp—Gypsum

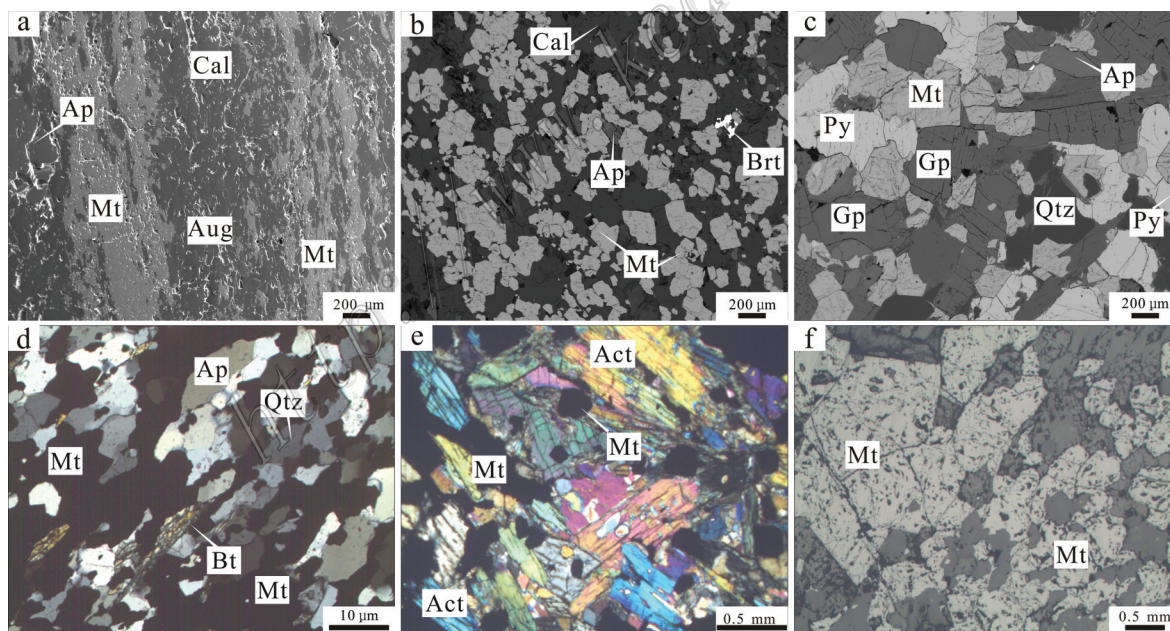


图4 磁铁矿样品显微照片

a. 条带状磁铁矿, 背散射图像; b. 浸染状磁铁矿, 背散射图像; c. 粗晶磁铁矿, 背散射图像; d. 条带状磁铁矿, 单偏光;

e. 矽卡岩化粗晶磁铁矿, 正交偏光; f. 粗晶磁铁矿, 光片

Mt—磁铁矿; Cal—方解石; Ap—磷灰石; Py—黄铁矿; Qtz—石英; Bt—黑云母; Act—阳起石

Fig. 4 Photomicrographs of magnetite from different stages

a. Banding magnetite, backscattered image; b. Disseminated magnetite, backscattered image; c. Coarse magnetite, backscattered image;

d. Banding magnetite; e. Skarnized coarse magnetite, crossed nicols; f. Coarse magnetite, polish slab

Mt—Magnetite; Cal—Calcite; Ap—Apatite; Py—Pyrite; Qtz—Quartz; Bt—Biotite; Act—Actinolite

3 测试方法和结果

3.1 测试方法

将采集的样品制成光片,在显微镜下鉴定后,分别进行了电子探针和激光剥蚀等离子质谱仪测试分析。

电子探针成分分析和激光剥蚀等离子质谱仪测试分析均在中国地质调查局西安地质调查中心自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成,电子探针测试仪器为 JEOL-JXA-8230,工作条件为:加速电压 15 kV;电流 1×10^{-8} A;束斑直径 1~5 μm ,不同元素采用的标样不同,Na,Al 标样采用硬玉,Si 标样采用石英,P,Ca 标样采用磷灰石,Mg 的标样采用方镁石,Fe 的标样采用磁铁矿,Mn,Ti 的标样采用红钛锰矿,K 的标样采用 KTiOPO_4 ,Cr 的标样采用 Cr_2O_3 ,V 标样采用 PbVGe 玻璃。激光剥蚀等离子质谱仪测试分析仪器为 Agilent 7700x 等离子质谱仪,激光器型

号 Geolas Pro。实验采用 He 作为剥蚀物质的载气,脉冲频率 7 Hz、密度 15 J/cm^2 ,测试过程中首先遮挡激光束进行空白背景采集 15 s 清洗进样系统,单点测试分析时间 75 s。等离子质谱测试辅助气流速 (Ar) 0.98 L/min;载气流速 (He) 0.67 L/min,射频发生器功率 1350 W。测试数据采用内标和外标相结合的方法,内标选用铁元素,外标使用 NIST-612。

3.2 测试结果

从电子探针分析数据表(表 1)可以看出,赞坎铁矿 3 个成矿阶段中磁铁矿 $w(\text{Ti})$ 、 $w(\text{Al})$ 、 $w(\text{Mn})$ 、 $w(\text{Mg})$ 、 $w(\text{V})$ 相对较高,随着成矿过程的演化,从条带状磁铁矿-浸染状磁铁矿-粗晶脉状或块状磁铁矿,其中 $w(\text{TiO}_2)$ 变化不大,各类样品平均 $w(\text{TiO}_2)$ 介于 0.155%~0.175% 之间; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 随着成矿过程演化逐渐减少,变化于 0.485%~0.137%,粗晶脉状或块状磁铁矿中最低; $w(\text{MnO})$ 随着成矿过程演化逐渐增加,各类样品平均值介于 0.044%~1.309%; $w(\text{MgO})$ 变化于 0.073%~0.783% 之间,粗晶脉状或块状磁铁

表 1 赞坎铁矿床磁铁矿电子探针测试成分特征表

Table 1 Major element EMPA analyses for magnetite from Zankan iron deposit

样品号	$w(\text{B})/\%$													总和
	Na_2O	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	MgO	CaO	FeO	TiO_2	K_2O	MnO	Cr_2O_3	V_2O_5		
ZK06-68	0.01	0.37	0.08	0	0.05	0	92.753	0.02	0	0.08	0.08	0.01		93.45
ZK06-75	0	0.51	0.10	0	0.03	0	92.796	0.01	0	0	0.06	0.03		93.54
ZK08-79	0.06	0.45	0.06	0.04	0.03	0.08	91.187	0.13	0	0.10	0.03	0.03		92.19
ZK08-53	0.06	0.39	0	0	0.10	0.02	91.786	0.24	0	0.07	0.06	0.13		92.86
ZK08-54	0.03	0.66	0	0.02	0.13	0	90.474	0.22	0	0.02	0.06	0.08		91.69
ZK18-55	0.07	0.46	0.07	0	0.11	0	92.118	0.20	0.03	0.01	0.02	0.06		93.15
ZK18-56	0.03	0.50	0.36	0	0.25	0	92.793	0.30	0.05	0.03	0	0.09		94.40
ZK20-59	0.02	0.72	0.04	0	0.15	0	92.473	0.24	0	0.07	0.02	0.08		93.81
ZK20-84	0	0.33	0.07	0	0.04	0	92.667	0.04	0	0.03	0.13	0		93.31
ZK04-11	0	0	0.02	0	0.01	0	93.147	0.02	0	0.44	0.02	0.02		93.68
ZK04-12	0.10	0.02	0.08	0.01	0.07	0	91.647	0.02	0.04	0.44	0.03	0.07		92.53
ZK04-17	0	0.04	0.12	0	0.03	0	92.930	0.02	0.01	0.10	0.06	0.04		93.35
ZK05-20	0.07	0.46	0	0	0.12	0.17	91.491	0.27	0	0.66	0.08	0.98		94.30
ZK05-21	0	0.45	0.08	0	0.08	0.08	92.568	0.23	0	0.54	0.01	0.82		94.86
ZK05-22	0.07	0.43	0.01	0	0.14	0	92.452	0.35	0	0.61	0.03	0.78		94.87
ZK07-23	0.03	0.40	0.04	0.10	0.14	0.03	91.240	0.47	0	0.68	0.09	0.85		94.07
ZK07-25	0	0.05	0	0.05	0	0	92.695	0.13	0	0.52	0.13	0.73		94.31
ZK07-26	0	0.14	0.44	0	0.13	0.05	92.937	0.06	0.04	0.87	0.05	0.50		95.22
ZK07-27	0	0.05	0	0.01	0.01	0	93.132	0.09	0.01	0.65	0.03	0.46		94.44
ZK01-1	0	0.21	0	0	0.01	0	92.864	0.07	0	0.67	0	0.05		93.87
ZK01-4	0.06	0.29	0.03	0	0	0	92.605	0.06	0	0.67	0.01	0.10		93.83
ZK01-7	0.03	0.32	0.07	0	0	0	92.377	0.07	0	0.56	0.04	0.02		93.49
ZK02-31	0	0.03	0.03	0	0.90	0	88.636	0.15	0.02	1.57	0.05	1.04		92.43
ZK02-32	0.26	0.07	0	0	1.32	0	89.352	0.28	0.01	1.77	0.07	1.08		94.21
ZK03-33	0.07	0.08	0.02	0	1.30	0	88.405	0.22	0	1.64	0.04	0.95		92.73
ZK03-34	0.02	0.07	0.06	0	1.45	0	90.365	0.34	0	1.82	0.03	1.15		95.31
ZK03-35	0.11	0	0.04	0	1.29	0	87.887	0.26	0	1.78	0.05	0.99		92.41

矿中相对较高; $w(\text{V}_2\text{O}_5)$ 随着成矿过程演化而增加,各类样品平均值变化于0.056%~0.673%(表1)。

磁铁矿微量元素原位 LA-ICP-MS 分析中,条带状磁铁矿中 Sc、Cr、Ni、Co、Zn、Ga、Ge、Sr、Nb、Sn、Hf、Ta 等元素高于检出限,Cu、As、Rb 等元素在检出

限附近,其他元素低于检出限或未检出有效值(图 6a);浸染状磁铁矿中 Sc、Cr、Ni、Co、Zn、Ga、Ge、Zr、Nb、Sn、Hf、Ta 等元素高于检出限,Cu、As、Rb 等元素在检出限附近,其他元素低于检出限或未检出有效值(图 6b);粗晶脉状或块状磁铁矿中 Sc、Cr、Ni、Co、

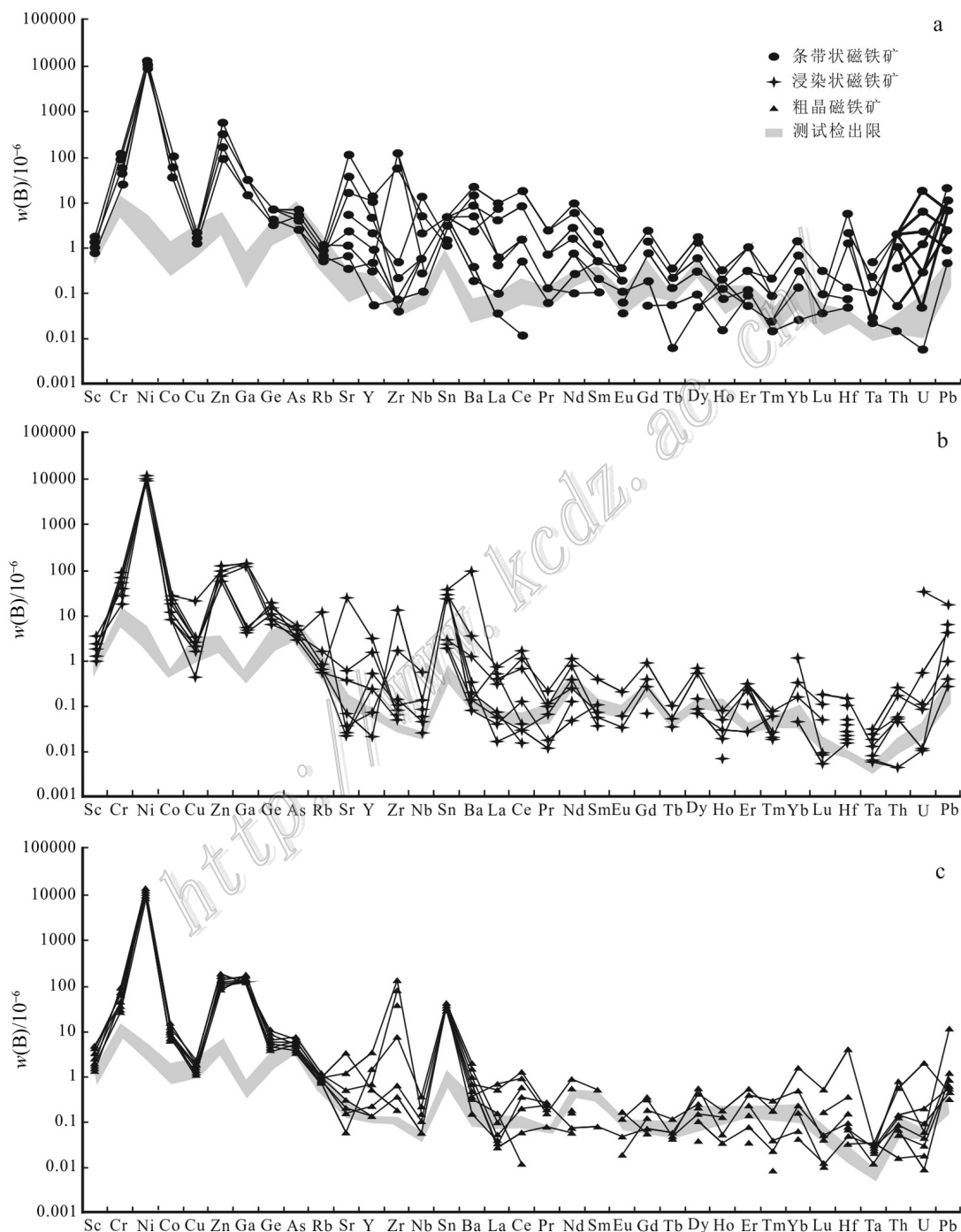


图5 赞坎铁矿床磁铁矿 LA-ICP-MS 微量元素测试值及检出限对照蛛网图

Fig. 5 LA-ICP-MS analytical results of magnetite from Zankan iron deposit, which are compared with the instrument limits of detection

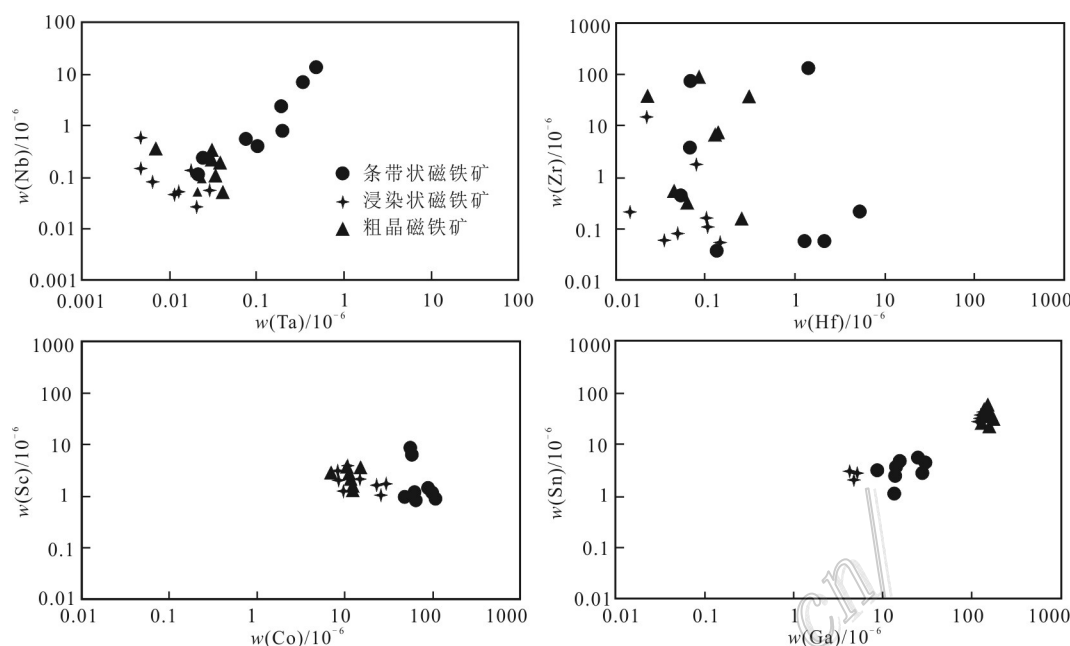


图6 赞坎铁矿床磁铁矿微量元素特征

Fig. 6 Compositions of trace elements from magnetite in Zankan iron deposit

Zn、Ga、Ge、Y、Zr、Nb、Sn、Hf、Ta等元素高于检出限, Cu、As、Rb等元素在检出限附近, 其他元素低于检出限或未检出有效值(图6c); 结合测试信号与背景信号强度选择Sc、Co、Zn、Ca、Zr、Nb、Sn、Hf、Ta等有效元素进行分析。在成矿作用演化过程中 $w(\text{Ga})$ 、 $w(\text{Sn})$ 、 $w(\text{Sc})$ 、 $w(\text{Co})$ 等元素变化相对较小(图6)。随着条带状磁铁矿→浸染状磁铁矿→粗晶脉状块状磁铁矿Ta、Nb、Zr、Hf等元素有减少趋势(表2)。

4 讨论

磁铁矿为一种常见的副矿物, 广泛分布于各类岩石及多种岩浆和热液矿床中, 根据磁铁矿地球化学特征判断磁铁矿成因类型已开展了大量的研究工作(徐国风等, 1979; 林师整, 1982; Singoyi et al., 2006; 黄柯等, 2017; Wen et al., 2017)。林师整(1982)采用 $w(\text{TiO}_2)$ - $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ - $w(\text{MgO}+\text{MnO})$ 三角图解(图7)将磁铁矿划分为侵入岩中副矿物型、岩浆型、火山岩型、接触交代型、矽卡岩型和沉积变质型6种成因类型。随着磁铁矿微量元素分析数据的不断积累, 特别是LA-ICP-MS分析技术的出现, 使得能够以较低的检测限来原位分析磁铁矿中大部分微量元素(Carrew, 2004; Rusk et al., 2009; Savard et al.,

2010; 2012; 段士刚等, 2014), 并拓展了利用磁铁矿中微量元素判别矿床类型、成矿过程等多方面的应用(Singoyi et al., 2006; 黄柯等, 2017; Wen et al., 2017)。

赞坎铁矿中3个成矿阶段的磁铁矿原位微量元素特征有一些差异, 但也存在一定变化规律。磁铁矿 $w(\text{TiO}_2)$ 在0.01%~0.471%之间, 大部分样品更接近于徐国风(1979)统计的接触交代型矿床($w(\text{TiO}_2)$ 介于0.07%~0.40%)。随着磁铁矿成矿演化有趋于增加的趋势, 条带状磁铁矿大部分样品的 $w(\text{TiO}_2)$ 较低, 而粗晶块状或脉状磁铁矿 $w(\text{TiO}_2)$ 相对均较高, 反映出随着成矿阶段演化岩浆作用的影响增强(Wen et al., 2017; 陈应华等, 2018), 成矿温度也相应升高(Vanballen, 1993; Nadoll et al., 2014); 磁铁矿中 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 普遍较低, 条带状磁铁矿最高(表1), 而随着磁铁矿成矿过程的演化在粗晶块状或脉状磁铁矿中最低, 这反映了条带状磁铁矿更接近火山岩型铁矿(林师整, 1982), 而粗晶块状或脉状磁铁矿更接近于沉积变质型铁矿(徐国风等, 1979; 林师整, 1982), 此外, 条带状磁铁矿中含有大量的黑云母容易蚀变为绿泥石, 并伴随着Fe的析出, 导致 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 的升高(陈应华等, 2018)。随着成矿阶段演化 $w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{MnO})$ 逐渐升高, 可能是由于伴随岩浆热液温度降

表2 赞坎铁矿床磁铁矿 LA-ICP-MS 微量元素测试成分特征表

Table 2 Trace element analyses (LA-ICP-MS) for magnetite from Zankan iron deposit

样品号	$w(B)/10^{-6}$								
	Sc	Co	Zn	Ga	Zr	Nb	Sn	Hf	Ta
ZK06-02	0.94	47.15	291.19	13.38	0.450	13.13	1.11	0.051	0.467
ZK06-05	0.94	38.75	266.65	13.51	47.52	4.750	1.32	1.430	0.212
ZK08-02	0.94	62.97	225.82	15.13	72.02	2.370	4.31	0.068	0.189
ZK08-03	1.03	64.02	185.14	13.56	0.058	0.770	2.57	2.140	0.197
ZK18-04	0.88	65.39	98.18	14.10	0.057	0.110	3.23	1.300	0.022
ZK18-03	1.23	93.54	327.08	29.53	0.211	0.550	4.60	5.300	0.075
ZK20-04	1.08	100.69	582.75	25.69	0.037	0.410	5.04	0.133	0.103
ZK20-05	0.94	111.00	147.44	27.62	126.32	0.234	2.99	1.420	0.026
ZK07-03	1.57	24.22	70.26	4.88	1.670	0.550	1.98	0.081	0.005
ZK07-06	1.01	26.38	90.04	5.32	0.076	0.079	2.65	0.051	0.007
ZK07-07	1.66	30.46	61.53	4.49	13.870	0.140	2.89	0.023	0.005
ZK04-01	1.87	8.82	123.07	131.30	0.056	0.052	29.89	0.036	0.029
ZK04-02	2.02	15.22	121.10	139.61	0.050	0.047	36.08	0.148	0.013
ZK04-03	2.99	8.57	93.64	134.42	0.204	0.025	29.74	0.015	0.021
ZK05-05	1.20	9.81	114.73	136.90	0.103	0.130	33.28	0.110	0.018
ZK05-08	3.24	11.38	120.20	131.91	0.149	0.044	32.60	0.105	0.012
ZK01-01	1.32	12.72	79.95	142.83	0.330	0.053	33.85	0.062	0.021
ZK01-02	2.76	7.13	99.38	136.84	7.330	0.341	33.64	0.134	0.030
ZK01-03	3.36	7.27	122.49	143.03	39.18	0.235	33.30	0.023	0.032
ZK02-04	3.71	15.27	108.53	155.57	88.87	0.386	36.56	0.082	0.007
ZK02-05	3.95	10.58	117.48	143.99	0.550	0.100	35.83	0.045	0.023
ZK03-06	1.61	12.45	141.22	136.13	0.163	0.052	29.64	0.250	0.041
ZK03-07	2.72	11.18	117.04	138.71	40.320	0.198	38.31	0.310	0.038
ZK03-08	2.36	12.22	148.88	143.23	138.490	0.107	32.66	3.860	0.034

低及硅酸盐矿物的减少,磁铁矿进入主沉淀阶段,围岩中的大量 Mg、Mn 等被后期热液活化,伴随磁铁矿的沉淀进入磁铁矿晶格中,此时磁铁矿富集 Mg、Mn 等元素。与此同时由于围岩中 P 的加入,形成的磁铁矿与大量磷灰石共生(图 4c)(陈应华等,2018)。在 $TiO_2-Al_2O_3-(MgO+MnO)$ 成因图解(图 7)中,赞坎铁矿条带状磁铁矿和浸染状磁铁矿大多分布在沉积变质型铁矿区,3 个样品位于岩浆型和火山岩型铁矿之中,这反映出早期沉积的磁铁矿可能来源于火山沉积作用,但经受了变质作用改造;粗晶块状或脉状磁铁矿主要分布于矽卡岩型和沉积变质型铁矿区,反映出早期磁铁矿受到了晚期岩浆热液的交代(林师整,1982)。

Dupuis(2011)对铁氧化物中微量元素分进行了大量的研究,分析发现 $w(Ca+Al+Mn)$ 与 $w(Ti+V)$ 能很好地区分铁氧化物-铜-金型(IOCg)、斑岩型、基鲁纳

型、矽卡岩型、BIF 型和钒钛-铁型等铁矿床。在赞坎铁矿 $w(Ca+Al+Mn)-w(Ti+V)$ 图解(图 8)中粗晶块状或脉状样品均落入矽卡岩型铁矿区,说明该类磁铁矿主要为矽卡岩型铁矿,而条带状磁铁矿和浸染状磁铁矿大部分位于斑岩型和矽卡岩型铁矿区,说明区内原始沉积的含铁建造与一套中基性火山岩有关,并在后期经历矽卡岩化的改造(Dupuis et al., 2011)。

赞坎铁矿床微量元素从条带状磁铁矿到粗晶块状或脉状磁铁矿 $w(Sc)$ 集中变化于 $0.88 \times 10^{-6} \sim 3.95 \times 10^{-6}$ 之间,与矽卡岩型铁矿床(1.26×10^{-6})较接近(徐国风等,1979;王奎仁,1989),其逐渐增加的变化趋势反映出随着成矿作用的演化受岩浆作用的影响逐渐增强;从条带状磁铁矿到粗晶块状或脉状磁铁矿 $w(Co)$ 变化于 $7.13 \times 10^{-6} \sim 111.00 \times 10^{-6}$, $w(Co)$ 逐渐减少的趋势也反映出铁矿经历了岩浆热液的改造(Wen et al., 2017),而后期的浸染状磁铁矿和粗晶块状或

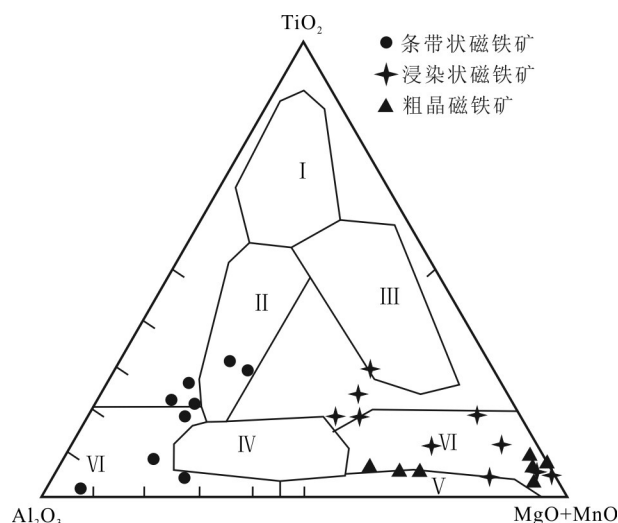


图7 磁铁矿 TiO_2 - Al_2O_3 - $\text{MgO}+\text{MnO}$ 成因分类图解
(据林师整, 1982)

I—副矿物型; II—岩浆型; III—火山岩型; IV—接触交代型;
V—矽卡岩型; VI—沉积变质型

Fig. 7 TiO_2 - Al_2O_3 - $\text{MgO}+\text{MnO}$ magnetite genetic classification diagram (after Lin, 1982)

I—Accessory mineral type; II—Magmatic type; III—Volcanic type; IV—Contact metasomatic type; V—Skarn type; VI—Metamorphosed sedimentary type

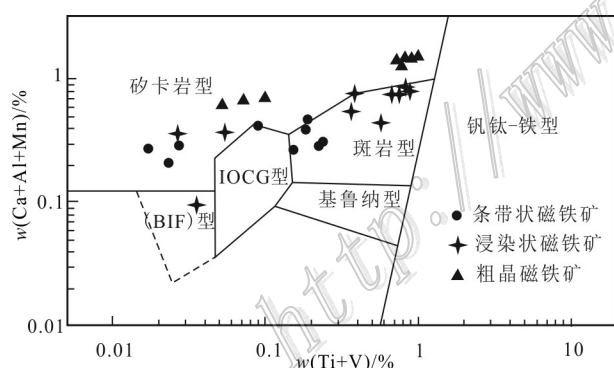


图8 磁铁矿 $w(\text{Ca}+\text{Al}+\text{Mn})$ - $w(\text{Ti}+\text{V})$ 成因分类图解
(底图据 Dupuis et al., 2011)

Fig. 8 $w(\text{Ca}+\text{Al}+\text{Mn})$ - $w(\text{Ti}+\text{V})$ magnetite genetic classification diagram (base map after Dupuis et al., 2011)

脉状磁铁矿受岩浆热液影响明显,特别是成矿后期硫化物的出现导致 $w(\text{Co})$ 降低 (Wen et al., 2017; 陈应华等, 2018)。Ga 由于其较低的分配系数而在磁铁矿中 $w(\text{Ga})$ 较低,但是岩浆作用相关的磁铁矿中含有更高的 $w(\text{Ga})$; 条带状磁铁矿和浸染状磁铁矿中 $w(\text{Sn})$ 相对较低,而粗晶块状或透镜状磁铁矿中 $w(\text{Sn})$

相对较高,这也反映出随着成矿作用演化受岩浆热液影响逐渐增强 (Nadoll, 2011)。

综上所述,赞坎铁矿条带状磁铁矿和浸染状磁铁矿具有火山沉积成因特征,浸染状磁铁矿体的产出位置虽距离岩体较远,但是受到岩浆作用影响磁铁矿发育重结晶;粗晶块状或脉状磁铁矿与岩浆热液作用有关,普遍发育矽卡岩化。

5 结 论

(1) 赞坎铁矿床中磁铁矿中主量元素 Al 在磁铁矿的成矿演化过程中有减少的趋势,而 Ti、Mn、Mg、V 均具有增加的趋势;微量元素 Sc、Co、Ga、Zr、Nb、Sn、Hf、Ta 等均高于检测限,且元素 Co、Nb、Hf、Ta 等随着磁铁矿的成矿演化具有减少的趋势,Sc、Ga、Zr、Sn 等元素随着磁铁矿演化具有增加的趋势。

(2) 赞坎铁矿为一个沉积变质型铁矿,早期条带状含铁建造中磁铁矿与火山沉积作用有关,成矿后期特别是在粗晶块状和脉状磁铁矿阶段受岩浆作用影响明显,不同程度的发育矽卡岩化,而且粗晶磁铁矿的原位微区地球化学特征表明,赞坎铁矿中富铁矿成矿与岩浆热液有关。

致 谢 本次研究在野外地质工作中得到新疆地矿局第二地质大队冯昌荣总工、郝延海副总的帮助和支持,在文章修改过程中审稿专家提出了宝贵意见,在此一并表示感谢!

References

- Bian X W, Zhu H P, Ji W H, Cui J G, Luo Q Z, Ren J G and Peng X P. 2013. The discovery of Qingbaikouan plutonite in Taxorgan, Xinjiang, and evidence from zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of intrusive rock[J]. *Northwestern Geology*, 46(1): 22-31(in Chinese with English abstract).
- Carrew M J. 2004. Controls on Cu-Au mineralisation and Fe oxide metasomatism in the eastern fold belt, NW Queensland, Australia (Ph D. thesis)[D]. Supervisor: Mark G. Queensland: James Cook University. 213-308.
- Chen C J, Cao X Z, Zhang W S, Yan C H, Chen J K and Rao D P. 2011. Ore-controlling factors and prospecting direction for the Ta'axi to Tatulugou iron metallogenic belt in Taxkorgan, Xinjiang[J]. *Geological Science and Technology Information*, 30(6): 81-89(in Chinese with English abstract).
- Chen D H, Wu Y Z, Li W M, Wang X A, Qiao G B and Zhao X J.

2013. Geological characteristics and genesis of the iron deposit in Taxkorgan area, West Kunlun[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 37(4): 671-684(in Chinese with English abstract).
- Chen G Y, Sun D S and Yin H A. 1987. Genetic mineralogy and prospecting mineralogy[M]. Chongqing: Chongqing Publishing House. 1-847(in Chinese).
- Chen J K, Yan C H, Zhang W S, Gao T C, Lü X H, Zhang S B and Hu X C. 2011. Geological characteristics and prospecting direction of the magnetite iron deposits in the Taxkorgan, Xinjiang[J]. *Geological Survey and Research*, 34(3): 179-189(in Chinese with English abstract).
- Chen W, Zhou M F, Li X C, Gao F and Hou K J. 2015. In-situ LA-ICP-MS trace elemental analyses of magnetite: Cu-(Au, Fe) deposits in the Khetri copper belt in Rajasthan Province, NW India[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 929-939.
- Chen Y and Wu L. 2006. The prospecting report of Zankan iron deposit in Taxkorgan area of Xinjiang[R]. No.2 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang. 4-40(in Chinese).
- Chen Y H, Lan T G, Wang H, Tang Y W and Dai Z H. 2018. LA-ICP-MS trace element characteristics of magnetite from the Zhangjiawa iron deposit, Laiwu and constraints on metallogenic processes[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(4): 32-49(in Chinese with English abstract).
- Chung D, Zhou M F, Gao J F and Chen W. 2015. In-situ LA-ICP-MS trace elemental analyses of magnetite: The Late Palaeoproterozoic Sokoman iron formation in the Labrador Trough, Canada[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 917-928.
- Cook N J, Ciobanu C L and Mao J W. 2009. Textural control on gold distribution in As-free pyrite from the Dongping, Huangtuliang and Hougou gold deposits, North China Craton (Hebei Province, China)[J]. *Chemical Geology*, 264(1-4): 101-121.
- Duan C, Li Y H, Yuan S D, Hu M Y, Zhao L H, Chen X D, Zhang C and Liu J L. 2012. Geochemical characteristics of magnetite from Washan iron deposit in Ningwu ore district and its constraints on ore-forming[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1): 243-257(in Chinese with English abstract).
- Duan S G, Dong M H, Zhang Z H, Jiang Z S and Li F M. 2014. A LA-ICP-MS analysis of elements in magnetite from Dundee iron deposit in western Tianshan Mountains, Xinjiang: Constraints on genesis of deposit[J]. *Mineral Deposits*, 33(6): 1325-1337(in Chinese with English abstract).
- Feng C R, He L D, Hao Y H and Huang Z Y. 2012. Features and potential analysis of the iron polymetallic deposits in the Taxkorgan area, Xinjiang[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 36(1): 102-110(in Chinese with English abstract).
- Dupuis C and Beaudoin. 2011. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types[J]. *Mineralium deposita*, 46(4): 319-335.
- Feng C R, Wu H C and Chen Y. 2011. Geological characteristics and genesis of the Zankan iron deposit in Taxkorgan, Xinjiang[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(3): 404-409(in Chinese with English abstract).
- Hu J W, Zhuang D Z and Yang W Z. 2010. The integrated information predicting model of the Zankan iron deposit, Tashikuergan area, southwestern Xinjiang, China and its application in regional metallogenic prognosis[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(10): 1495-1503(in Chinese with English abstract).
- Hu M Y, He H L, Zhan X C, Fan X T, Wang G and Jia Z R. 2008. Matrix normalization for in-situ multi-element quantitative analysis of zircon in laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 36(7): 947-983(in Chinese with English abstract).
- Huang K, Zhu M T, Zhang L C, Li W J and Gao B Y. 2017. LA-ICP-MS analysis of magnetite and application in genesis of mineral deposit[J]. *Advances in Earth Science*, 32(3): 262-275(in Chinese with English abstract).
- Huang X W, Gao J F, Qi L and Zhou M F. 2015. In-situ LA-ICP-MS trace elemental analyses of magnetite and Re-Os dating of pyrite: The Tianhu hydrothermally remobilized sedimentary Fe deposit, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 65:900-916.
- Huang X W, Gao J F, Qi L, Meng Y M, Wang Y C and Dai Z H. 2016. In-situ LA-ICP-MS trace elements analysis of magnetite: The Fenghuangshan Cu-Fe-Au deposit, Tongling, eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 72: 746-759.
- Jia Z R, Zhan X C, He H L, Hu M Y, Fan X T and Wang G. 2009. Application of normalization for in-situ multi-element raster analysis in laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry illustrated with garnets[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 37(5): 653-658. (in Chinese with English abstract)
- Koglin N, Frimmel H E, Minter W E L and Bratz H. 2010. Trace-element characteristics of different pyrite types in Mesoproterozoic to Palaeoproterozoic placer deposits[J]. *Mineralium Deposita*, 45(3): 259-280.
- Li R S, Ji W H, Yang Y C, Yu P S, Zhao Z M, Chen S J, Meng Y, Pan X P, Shi B D, Zhang W J, Li H and Luo C Y. 2008. The geology of Kunlun Mountains and adjacent region[M]. Beijing: Geological Publishing House. 5-10(in Chinese).
- Li W T, Audétat A and Zhang J. 2015. The role of evaporites in the formation of magnetite-apatite deposits along the Middle and Lower Yangtze River, China: Evidence from LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions[J]. *Ore Geology Reviews*, 67: 264-278.
- Lin S Z. 1982. A contribution to the chemistry, origin and evolution of magnetite[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, (3): 166-174(in Chinese with English abstract).
- Liu Y, Kuang A B and Zhang J. 2011. Features and genesis of iron deposits in Laobing-Zankan-Tatulgou of Tashenkuergan area[J]. *Mineralogica Sinica*, (supp.): 373-375(in Chinese with English abstract).
- Nadoll P and Koenig A E. 2011. LA-ICP-MS of magnetite: Methods and reference materials[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26(9): 1872-1877.

- Nadoll P. 2011. Geochemistry of magnetite from hydrothermal ore deposits and host rocks: Case studies from the Proterozoic belt super group, Cu-Mo-porphyry + skarn and Climax-Mo deposits in the western United States(Ph. D. thesis) [D]. Supervisor: Mauk J. Auckland: University of Auckland. 1-307.
- Nadoll P, Angerer T, Mauk J L, French D and Walshe J. 2014. The chemistry of hydrothermal magnetite: A review[J]. *Ore Geology Review*, 61: 1-32.
- Qiu J S, Zhang X L, Hu J and Li Z. 2009. In situ LA-ICP-MS analysis of apatite from carbonatites in western Shandong province: Implications for petrogenesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2855-2865(in Chinese with English abstract).
- Rusk B G, Oliver N H S, Zhang D, Brown A, Lilly R and Jungmann D. 2009. Compositions of magnetite and sulfides from barren and mineralized IOCG deposits in the eastern succession of the Mt Isa Inlier, Australia[R]. Society for Geology Applied to Mineral Deposits, 10th Bi-ennial SGA Meeting. Townsville, Australia.
- Savard D, Barnes S and Raju P S. 2010. Accurate LA-ICP-MS calibration for magnetite analysis using multiple reference materials[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(12): A914.
- Savard D, Barnes S, Dare S and Beaudoin G. 2012. Improved calibration technique for magnetite analysis by LA-ICP-MS[J]. *Mineralogical Magazine*, 76: 2329.
- Singoyi B, Danyushevsky L, Davidson G J, Large R and Zaw K. 2006. Determination of trace elements in magnetites from hydrothermal deposits using the LA ICP-MS technique[R]. SEG Key-stone Conference. Denver, USA: CD-ROM.
- Vanballen M R. 1993. Titanium mobility in metamorphic systems: A review[J]. *Chemical Geology*, 110: 233-249.
- Wang B, Chen L Y, Wang H, Ren G L, Wu Y F, Huang Z Y and Fu W W. 2011. Ore prospecting for the Taxkorgan area of West Kunlun using quantitative extraction of mineralized alteration information[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(3): 372-377(in Chinese with English abstract).
- Wang M F, Wang W, Liu K, Michalak P P, Wei K T and Hu M Y. 2017. In-situ LA-ICP-MS trace elemental analyzes of magnetite: The Tieshan skarn Fe-Cu deposit, eastern China[J]. *Chemie der Erde*, 77: 169-181.
- Wang K R. 1989. Earth and universe genetic mineralogy[M]. Hefei: Anhui Educational Publishing House. 1-544(in Chinese).
- Wang S Y and Peng S M. 2004. 1:250 000 regional geological survey of Keketulu mapsheet (J43C003002), Tashkurgan Tajik autonomous County mapsheet (J43C003003) [R]. Henan Institute of Geological Survey. 254-273. (in Chinese)
- Wen G, Li J W, Hofstra A H, Koenig A E, Lowers H A and Adams D. 2017. Hydrothermal reequilibration of igneous magnetite in altered granitic plutons and its implications for magnetite classification schemes: Insights from the Handan-Xingtai iron district, North China Craton[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 213: 255-270.
- Xu G F and Shao J L. 1979. The characterization of magnetite and its practical significance[J]. *Geology and Exploration*, (3): 30-37(in Chinese with English abstract).
- Yan C H, Cao X Z, Zhang W S, Chen C J, Chen J K, Liu P D, Wang S Y, Zhang S B, Li S P and Liao S J. 2012a. The "Pamir-type" iron deposits[J]. Beijing: Geological Publishing House. 152-217(in Chinese).
- Yan C H, Chen C J, Cao X Z, Zhang W S, Chen J K, Li S P and Liu P D. 2012b. The discovery of the "Pamir-type" iron deposits in Taxkorgan area of Xinjiang and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(4): 549-557(in Chinese with English abstract).
- Yuan J H, Zhan X C, Fan X T and Hu M Y. 2011. Development of microanalysis of trace elements in sulfide minerals by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 30(2): 121-130(in Chinese with English abstract).
- Zhao W and Zhou M F. 2015. In-situ LA-ICP-MS trace elemental analyses of magnetite: The Mesozoic Tengtie skarn Fe deposit in the Nanling Range, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 872-883.
- Zhang C L, Yu H F, Wang A G and Guo K Y. 2005. Dating of Triassic granites in Western Kunlun Mountains and its tectonic significance[J]. *Acta Geological Sinica*, 79(5): 645-652(in Chinese with English abstract).
- Zhang C L, Li H K and Wang H Y. 2012. A review on Precambrian tectonic evolution of Tarim block: Possibility of interaction between Neoproterozoic plate subduction and mantle plume[J]. *Geological Review*, 58(5): 923-936(in Chinese with English abstract).
- Zhang L J, Zhou T F, Fan Y, Yuan F, Qian B and Ma L. 2011. A LA-ICP-MS study apatite from the Taocun magnetite-apatite deposit, Ningwu Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 834-848(in Chinese with English abstract).
- Zheng Y, Zhang L, Chen Y J, Pete H and Chen H Y. 2013. Metamorphosed Pb-Zn-(Ag) ores of the Keketale VMS deposit, Xinjiang: Evidence from ore textures, fluid inclusions, geochronology and pyrite compositions[J]. *Ore Geology Reviews*, 54: 167-180.
- Zhou T F, Zhang L J, Yuan F, Fan Y and Cooker D R. 2010. LA-ICP-MS in situ trace element analysis of pyrite from the Xinqiao Cu-Au-S deposit in Tongling, Anhui, and its constraints on the ore genesis[J]. *Earth Science Frontier*, 17(2): 306-319(in Chinese with English abstract).
- Zhou Z J, Chen Y J, Tang H S, Wu Y S and Chen Z L. 2018. Sr-Nd isotope constraints on the source of ore-forming elements of Zankan iron deposit in the Taxkorgan terrane of West Kunlun orogen[J]. *Gold Science and Technology*, 26(4): 454-464(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

边小卫,朱海平,计文化,崔继刚,罗乾周,任娟刚,彭湘萍. 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[J]. 西北地质, 46(1): 22-31.
- 陈曹军, 曹新志, 张旺生, 燕长海, 陈俊魁, 饶东平. 2011. 新疆塔什库尔干地区塔阿西-塔吐鲁沟铁矿带控矿因素及找矿方向[J]. 地质科技情报, 30(6): 81-89.
- 陈登辉, 伍跃中, 李文明, 王兴安, 乔耿彪, 赵晓健. 2013. 西昆仑塔什库尔干地区磁铁矿床特征及其成因[J]. 大地构造与成矿学, 37(4): 671-684.
- 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 1987. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆: 重庆出版社. 1-847.
- 陈俊魁, 燕长海, 张旺生, 高廷臣, 吕宪河, 张哨波, 胡小川. 2011. 新疆塔什库尔干地区磁铁矿床地质特征与找矿方向[J]. 地质调查与研究, 34(3): 179-189.
- 陈应华, 蓝廷广, 王洪, 唐燕文, 戴智慧. 2018. 莱芜张家洼铁矿磁铁矿 LA-ICP-MS 微量元素特征及其对成矿过程的制约[J]. 地学前缘, 25(4): 32-49.
- 陈勇, 吴磊. 2006. 新疆塔什库尔干县赞坎铁矿普查报告[R]. 新疆地矿局第二地质大队. 4-40.
- 段超, 李延河, 袁顺达, 胡明月, 赵令浩, 陈小丹, 张成, 刘加林. 2012. 宁芜矿集区凹山铁矿床磁铁矿元素地球化学特征及其对成矿作用的制约[J]. 岩石学报, 28(1): 243-257.
- 段士刚, 董满华, 张作衡, 蒋宗胜, 李凤鸣. 2014. 西天山敦德铁矿床磁铁矿原位 LA-ICP-MS 元素分析及意义[J]. 矿床地质, 33(6): 1325-1337.
- 冯昌荣, 吴海才, 陈勇. 2011. 新疆塔什库尔干县赞坎铁矿地质特征及成因浅析[J]. 大地构造与成矿学, 35(3): 404-409.
- 冯昌荣, 何立东, 郝延海, 黄朝阳. 2012. 新疆塔什库尔干县一带铁多金属矿床成矿地质特征及找矿潜力分析[J]. 大地构造与成矿学, 36(1): 102-110.
- 胡建卫, 庄道泽, 杨万志. 2010. 新疆西南部塔什库尔干地区赞坎铁矿综合信息预测模型及其在区域预测中的应用[J]. 地质通报, 29(10): 1495-1503.
- 胡明月, 何红蓼, 詹秀春, 樊兴涛, 王广, 贾泽荣. 2008. 基体归一化定量技术在激光烧蚀等离子体质谱法锆石原位多元素分析中的应用[J]. 分析化学, 36(7): 947-983.
- 黄柯, 朱明田, 张连昌, 李文君, 高炳宇. 2017. 磁铁矿 LA-ICP-MS 分析在矿床成因研究中的应用[J]. 地球科学进展, 32(3): 262-275.
- 贾泽荣, 詹秀春, 何红蓼, 胡明月, 樊兴涛, 王广. 2009. 激光烧蚀-等离子体质谱结合归一化定量方法原位线扫描检测石榴石多种元素[J]. 分析化学, 37(5): 653-658.
- 李荣社, 计文化, 杨永成, 于浦生, 赵振明, 陈守建, 孟勇, 潘晓平, 史秉德, 张维吉, 李行, 洛长义. 2008. 昆仑山及邻区地质[M]. 北京: 地质出版社. 5-10.
- 林师整. 1982. 磁铁矿矿物化学、成因及演化探讨[J]. 矿物学报, (3): 166-174.
- 刘宇, 匡爱兵, 张静. 2011. 新疆塔什库尔干县老井-赞坎-塔吐鲁沟一带铁矿床地质特征及成因浅析[J]. 矿物学报, 增刊: 373-375.
- 邱检生, 张晓琳, 胡建, 李真. 2009. 鲁西碳酸岩中磷灰石的原位激光探针分析及其成岩意义[J]. 岩石学报, 25(11): 2855-2865.
- 王彪, 陈利燕, 王核, 任广利, 吴玉峰, 黄朝阳, 付王伟. 2011. 遥感蚀变信息定量提取方法在成矿预测中的应用——以西昆仑塔什库尔干地区为例[J]. 大地构造与成矿学, 35(3): 372-377.
- 王奎仁. 1989. 地球与宇宙成因矿物学[M]. 合肥: 安徽教育出版社. 1-544.
- 王世炎, 彭松民. 2004. 克克吐鲁克幅(J43C003002)、塔什库尔干塔吉克自治县幅(J43C003003)1:25万区域地质调查报告[R]. 河南省地质调查院. 254-273.
- 徐国凤, 邵洁莲. 1979. 磁铁矿的标型特征及其实际意义[J]. 地质与勘探, (3): 30-37.
- 燕长海, 曹新志, 张旺生, 陈曹军, 陈俊魁, 刘品德, 王世炎, 张哨波, 李山坡, 廖诗进. 2012a. 帕米尔式铁矿[M]. 北京: 地质出版社. 152-217.
- 燕长海, 陈曹军, 曹新志, 张旺生, 陈俊魁, 李山坡, 刘品德. 2012b. 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[J]. 地质通报, 31(4): 549-557.
- 袁继海, 詹秀春, 樊兴涛, 胡明月. 2011. 硫化物矿物中痕量元素的激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱微区分析进展[J]. 岩矿测试, 30(2): 121-130.
- 张传林, 于海锋, 王爱国, 郭坤一. 2005. 西昆仑西段三叠纪两类花岗岩年龄测定及其构造意义[J]. 地质学报, 79(5): 645-652.
- 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[J]. 地质论评, 58(5): 923-936.
- 张乐骏, 周涛发, 范裕, 袁峰, 钱兵, 马良. 2011. 宁芜盆地陶村铁矿床磷灰石的 LA-ICP-MS 研究[J]. 地质学报, 85(5): 834-848.
- 周涛发, 张乐骏, 袁峰, 范裕, Cooke D R. 2010. 安徽铜陵新桥 CuAu-S 矿床黄铁矿微量元素 LA-ICP-MS 原位测定及其对矿床成因的制约[J]. 地学前缘, 17(2): 306-319.
- 周振菊, 陈衍景, 汤好书, 吴燕爽, 陈正乐. 2018. 西昆仑塔身库尔干赞坎铁矿成矿物质来源的铈钕同位素约束[J]. 黄金科学技术, 26(4): 454-464.