

# 西藏列廷冈铁多金属矿床磁铁矿元素地球化学特征及地质意义

李 壮<sup>1,2</sup>, 唐菊兴<sup>1</sup>, 王立强<sup>1</sup>, 杨 毅<sup>3</sup>, 钟 毅<sup>4</sup>

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083;  
3. 西藏自治区地质调查院, 西藏 拉萨 850000; 4. 重庆市地质矿产勘查开发局 107地质队, 重庆 401120)

**摘 要:** 西藏列廷冈矿床是林周盆地 Fe-Mo-Cu-Pb-Zn 矿集区内近年来新发现不久、规模较大的矽卡岩型铁多金属矿床。矿区磁铁矿发育, 主要包括块状、浸染状和脉状 3 种类型。基于详细的野外地质调查和室内矿相学研究, 将矿床成矿期划分为矽卡岩期和热液期 2 期, 进而划分为 5 个成矿阶段: 早期矽卡岩阶段、退化蚀变阶段、早期热液阶段、石英-硫化物阶段和碳酸盐阶段, 其中, 块状磁铁矿主要形成于退化蚀变阶段, 浸染状和脉状磁铁矿主要形成于早期热液阶段。以磁铁矿为主要研究对象, 采用电子探针(EPMA)和单矿物微量稀土元素 ICP-MS 分析实验, 重点对磁铁矿元素地球化学特征、成因矿物学进行系统研究。研究结果表明, 3 种不同类型磁铁矿内均含 Ti、Si、Ca 等次要元素以及 Na、K、Cr、Ni、Co、Pb、Ba、Sn、Sr、Sb、Cu 等多种可检测到的微量元素, 且矿物内主要发生了 Al、Mg、Mn 等元素的类质同像置换, 综合  $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ 、 $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{MgO} + \text{MnO})$  和  $(\text{Ca} + \text{Al} + \text{Mn}) - (\text{Ti} + \text{V})$ 、 $\text{Ni}/(\text{Cr} + \text{Mn}) - (\text{Ti} + \text{V})$  等多种磁铁矿成因判别图解投图结果及矿体野外宏观地质特征, 表明矿区磁铁矿均为热液成因。块状磁铁矿具明显的  $\text{Eu}$  正异常, 浸染状和脉状磁铁矿具  $\text{Eu}$  负异常, 均无明显 Ce 异常特征, 表明富 Eu 成矿流体在矽卡岩期的高温氧化环境下形成了矽卡岩型块状磁铁矿体, 在热液期则逐渐转变为低温还原环境, 形成浸染状和脉状磁铁矿及多种金属硫化物, 且铁的物质来源主要与矿区花岗闪长岩和花岗斑岩紧密相关。

**关键词:** 地球化学; 磁铁矿; 电子探针; ICP-MS; 列廷冈; 西藏

中图分类号: P578.4<sup>+</sup>6; P59

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)05-0821-19

## Geochemistry of magnetites from the Lietinggang iron polymetallic deposit in Tibet and its geological significance

LI Zhuang<sup>1,2</sup>, TANG Ju-xing<sup>1</sup>, WANG Li-qiang<sup>1</sup>, YANG Yi<sup>3</sup> and ZHONG Yi<sup>4</sup>

(1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Earth Science and Mineral Resources, Chinese University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Geological Survey of Tibet, Lhasa 850000, China; 4. No. 107 Geological Party, Chongqing Bureau of Geological and Mineral Resource Prospecting & Development, Chongqing 401120, China)

**Abstract:** The Lietinggang deposit is a newly discovered typical large-sized polymetallic deposit in the Fe-Mo-Cu-Pb-Zn ore concentration area of the Linzhou basin. There are mainly three types of magnetites in this mining area, i. e., massive, disseminated and veined magnetite. On the basis of detailed geological survey and systematic mineralogical studies, the metallogenic period of this deposit can be divided into two periods, i. e., skarn period and hydrothermal and supergene period, which include five ore-forming stages: early skarn stage, degradation and alteration stage, early hydrothermal stage, quartz-sulfide stage and carbonatization stage. The massive

收稿日期: 2015-11-04; 接受日期: 2016-04-08

基金项目: 中国地质调查局地质调查工作项目(12120113036200); 中央级公益性科研院所基本业务项目(K1416)

作者简介: 李 壮(1989-), 男, 汉族, 博士研究生, 矿产普查与勘探专业, E-mail: lizhuangcags@126.com; 通讯作者: 王立强(1984-), 男, 汉族, 副研究员, 现从事矿物学、岩石学、矿床学研究工作, E-mail: wlq060301@163.com.

magnetite mainly formed at the degradation and alteration stage, whereas both the disseminated and veined magnetites formed at the early hydrothermal stage. In this study, the authors selected the magnetites as the main object of study and used electron microprobe analysis (EPMA) and rare earth trace elements ICP-MS experiments to gain an insight into the geochemical characteristics and minerageny of magnetites. The results show that three different types of magnetites (massive, veined and disseminated magnetites) contain Ti, Si, Ca and other minor elements such as Na, K, Cr, Ni, Co, Pb, Ba, Sn. In addition, a variety of trace elements like Sr, Sb and Cu can be detected. There are mainly Al, Mg and Mn replacing the other elements. Combining  $TiO_2 - Al_2O_3 - MgO$ ,  $TiO_2 - Al_2O_3 - (MgO + MnO)$  and  $(Ca + Al + Mn) - (Ti + V)$ ,  $Ni / (Cr + Mn) - (Ti + V)$ , and other discrimination diagrams with orefield geological characteristics, the authors have reached the conclusion that the magnetites of the Lietinggang deposit belong to hydrothermal magnetite. The massive magnetite has obvious positive Eu anomaly, the disseminated and veined magnetites show negative Eu anomaly, and they all have no significant Ce anomalies. The massive magnetites might have been formed in an environment of high oxidation and temperature with the fluids rich in Eu. At the hydrothermal stage, the fluids were gradually transformed into a low temperature and oxidation which could contribute to the formation of disseminated, veined magnetites and a large quantity of sulfides. Moreover, the main sources of iron materials were related to granodiorite and porphyry granite.

**Key words:** geochemistry; magnetite; electron microprobe analysis; ICP-MS; Lietinggang; Tibet

**Fund support:** Geological Survey Project of China Geological Survey (12120113036200); Central Public Research institutes Fundamental Research Project (K1416)

冈底斯成矿带是青藏高原近年来发现的最具经济价值的成矿带之一(张洪涛等, 2004; 郑有业等, 2007; 唐菊兴等, 2013; Zheng *et al.*, 2015), 而冈底斯北部的 Fe-Cu-Pb-Zn-Ag-Mo 多金属成矿带则是一条以纳如松多、蒙亚啊、龙玛拉、亚贵拉、洞中拉等一系列典型矿床为代表的极具成矿远景的成矿亚带(侯增谦等, 2006; 程顺波等, 2008; 杜欣等, 2010; 高一鸣等, 2011)。前人主要针对成矿带内典型矿床的成岩成矿时代、成矿物质来源、成矿地质背景等方面做了较为深入的研究(费光春等, 2011; 付强等, 2014; Wang *et al.*, 2015; Zhao *et al.*, 2015)。位于林周盆地 Fe-Mo-Cu-Pb-Zn 矿集区内的列廷冈矿床是近年来新发现不久、规模较大的矽卡岩型铁多金属矿床, 成矿过程具多期多阶段特征, 矿石类型多样。此外, 邻区内还发育有新嘎果、勒青拉等多个铁多金属矿床(图 1)。目前, 对于列廷冈矿床的研究程度总体较低, 仅杨毅等(2014, 2015)对矿床的成岩成矿时代、成矿流体来源等方面进行了初步的研究, 尚缺乏系统的矿物学、单矿物矿物化学方面的综合研究。

单矿物的元素地球化学特征研究在成矿流体、成矿物理化学条件以及成矿物质富集过程研究中取得了良好的效果(侯林等, 2013), 而作为铁矿床中最

主要的矿石矿物, 磁铁矿地球化学成分的变化规律是重要的矿物成因指示剂(Singoyi *et al.*, 2006; Dupuis and Beaudoin, 2011; 洪为等, 2012<sup>①</sup>)。本文以磁铁矿为研究对象, 结合详细的野外地质调查和室内矿相学工作, 采用电子探针分析技术(EPMA)和磁铁矿单矿物 ICP-MS 微量稀土元素分析方法, 对列廷冈矿区不同类型磁铁矿的化学成分特征进行了系统研究, 以确定磁铁矿成因类型并对磁铁矿的成矿物质来源、成矿物理化学条件等方面做初步探讨, 为列廷冈矿床资料的完善提供基础资料。

## 1 区域地质特征

早古生代时期, 受班公湖-怒江特提斯洋壳俯冲作用, 拉萨地体微陆块南部形成弧后盆地, 并于三叠纪随着后期班公湖-怒江特提斯洋壳向南持续俯冲, 雅鲁藏布江洋新特提斯洋开始发育(Zhu *et al.*, 2007)。早中侏罗世雅江洋开始向北俯冲, 在南冈底斯形成以叶巴组和雄村组为代表的岛弧火山岩(Zhu *et al.*, 2008; 唐菊兴等, 2010)。晚侏罗世班公湖-怒江特提斯洋和雅江洋特提斯洋双向俯冲, 形成冈底斯南缘桑日增生弧(潘桂棠等, 2006; Zhu *et al.*, 2009)。中新世, 随着俯冲的印度大陆陆壳边缘岩石

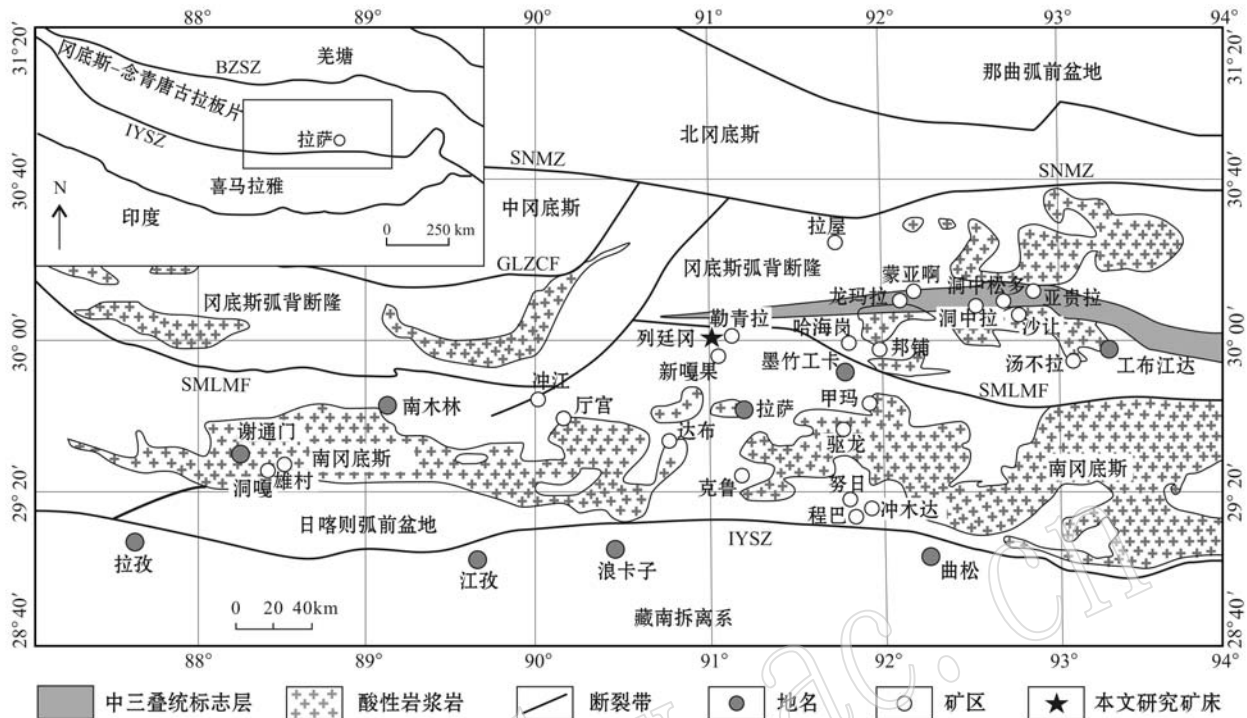


图1 西藏冈底斯东段构造单元划分及部分金属矿床分布图[据王立强等(2014)修改]

Fig. 1 Division of tectonic units and distribution of partial ore deposits in the eastern section of Gangdise (modified after Wang Liqiang *et al.*, 2014)

SNMZ—狮泉河-纳木错混杂岩带; BZSZ—班公湖-怒江缝合带; IYSZ—雅鲁藏布江缝合带; GLZCF—噶尔-隆格尔-错麦断裂; SMLMF—沙莫勒-麦沙-洛巴堆-米拉山断裂

SNMZ—Shiquan River-Nam Co mélange zone; BZSZ—Bangong Co-Nujiang suture zone; IYSZ—Yarlung Zangbo suture zone; GLZCF—Gaer-Longge'er-Cuomai fault; SMLMF—Shamole-Maila-Luobadui-Milashan fault

圈板片发生断离,冈底斯发生东西向伸展,形成了众多的壳幔混合来源的矿化斑岩侵位(侯增谦等, 2004)。

矿区区域地层归属于冈底斯-腾冲区的拉萨-察隅分区,主要发育以旁多群为主体的石炭-二叠系、三叠-白垩系和古近系,地层主要呈近东西向带状展布,大多呈整合接触(赵守仁等,2012)<sup>①</sup>。区域构造比较复杂,主要为区域性东西向压性断裂和褶皱(钟康惠等,2013),断裂构造主要有拉多岗-日阿断层、吓拉断层、巴嘎当-央日阿拉断层和哈母断层;褶皱构造主要有日阿扒贡-江多背斜、哈玛拉-央地雄背斜和曲古-蹦叉背斜(赵守仁等,2012)<sup>①</sup>。区域岩浆活动强烈,广泛发育多期次、多类型的火山岩和侵入岩。火山岩主要为古近系始新统帕那组、年波组火山岩,其分布特征与区域构造演化存在密切关系,属

冈底斯火山岩浆弧重要组成部分。侵入岩广泛发育,其形成时代包括早侏罗世、早白垩世、始新世和中新世;侵入岩出露面积较大,岩性以二长花岗斑岩、花岗斑岩、黑云母二长花岗斑岩、石英闪长玢岩等中酸性深成岩体为主(吴珍汉等,2003)<sup>②</sup>。

## 2 矿床地质特征

列廷冈铁多金属矿床位于拉萨市堆龙德庆县德庆乡,距德庆乡 25 km。大地构造位置隶属于冈底斯弧背断隆带南缘(图 1)。矿区出露地层比较简单,主要有早中三叠世查曲浦组( $T_{1-2c}$ )大理岩和第四系(Q)(图 2)。矿区构造样式简单,主要发育规模较小的断裂构造及局部褶皱构造。矿区岩浆岩类型多样且广泛发育,包括花岗斑岩( $60.69 \pm 0.98$  Ma)、花岗

① 赵守仁,强巴扎西,郭琳,等. 2012. 西藏丁嘎门堆地区地质矿产调查报告.

② 吴珍汉,孟宪刚,胡道功,等. 2003. 西藏当雄幅 1:25 万区域地质调查报告.

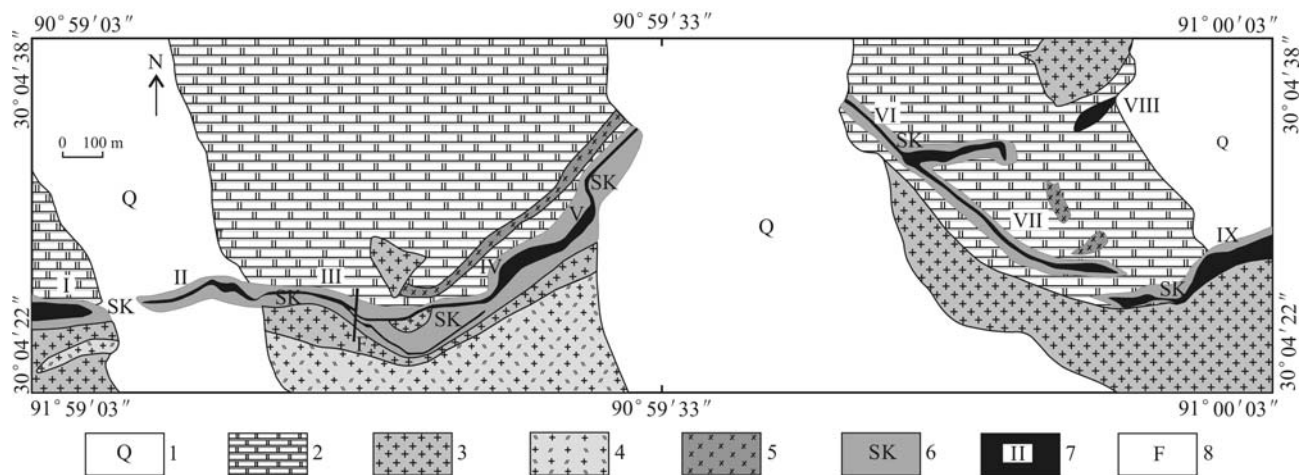


图 2 西藏列廷冈铁多金属矿床地质简图[据杨毅等(2014)修改]

Fig. 2 Simplified geological map of the Lietinggang iron polymetallic ore deposit (modified after Yang Yi et al., 2014)

1—第四系; 2—大理岩; 3—花岗岩; 4—二长花岗岩; 5—辉绿岩; 6—矽卡岩; 7—矿体及编号; 8—不明性质断层

1—Quaternary; 2—marble; 3—granite; 4—monzonitic granite; 5—diabase; 6—skarn; 7—orebody and its serial number; 8—unknown fault

闪长岩( $58.69 \pm 0.68$  Ma)(杨毅等, 2015)、二长花岗岩、辉绿岩、闪长玢岩及少量辉长岩等。花岗闪长岩、花岗斑岩与成矿密切相关。二长花岗岩、花岗闪长岩等岩体主要呈岩枝或岩脉发育; 花岗斑岩主要呈岩株近东西向展布。矿区内围岩蚀变比较发育, 主要有石榴子石化、透辉石化、阳起石化、绿帘石化、绿泥石化、钾长石化、绢云母化、大理岩化、碳酸盐化及少量的电气石化、黑云母化、硅化和萤石化等。

矿区内共圈定 9 个矿体, 由西向东依次编号为 I ~ IX, 矿体大多位于大理岩与侵入岩体层间接触带, 产出形态为似层状、透镜状或囊状, I ~ V 号矿体构成西矿段, VI ~ IX 号矿体构成东矿段(图 2)。I 号矿体位于最西侧, 矿石类型以磁铁矿为主(图 3a), 另发育少量方铅矿(图 3b)、黄铁矿、磁黄铁矿及胶黄铁矿(图 3c)。II 号矿体为矿区规模最大矿体, 矿石类型以磁铁矿为主, 并发育大量的辉钼矿和黄铜矿(图 3d)及少量黄铁矿、磁黄铁矿。III 号矿体以磁铁矿为主, 另发育大量磁黄铁矿、黄铜矿(图 3e)。IV 号矿体主要以磁铁矿为主。V 号矿体以磁铁矿为主, 发育少量黄铁矿、黄铜矿。VI 号矿体以磁铁矿为主, 发育少量闪锌矿、黄铜矿和辉钼矿。VII 号矿体以磁铁矿为主, 另发育大量磁黄铁矿及少量黄铁矿、胶黄铁矿、辉钼矿。VIII 号矿体以磁铁矿为主, 另发育少量黄铜矿和孔雀石(图 3f)。IX 号矿体位于最东侧, 以磁铁矿、黄铜矿为主, 另发育少量闪锌矿、孔雀石和辉钼矿。

根据矿石野外构造类型, 可分为块状磁铁矿石(图 3g)、浸染状磁铁矿石(图 3h)和脉状磁铁矿石(图 3i)3 种类型。结合野外地质调查结果和室内镜下观察可知, 磁铁矿石成因类型可分为矽卡岩型和热液型 2 种。矽卡岩型磁铁矿石中磁铁矿一般与石榴子石、阳起石、绿帘石、绿泥石等矽卡岩矿物伴生, 也常见交代石榴子石、透辉石等矿物。热液型磁铁矿石常伴随有钠长石、钾长石等蚀变, 呈浸染状或脉状发育于花岗斑岩等岩体边缘及内部。矿区矿石矿物主要为磁铁矿、辉钼矿、黄铜矿, 其次为磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿, 少量黄铁矿、胶黄铁矿等; 非金属矿物主要有石榴子石、透辉石、阳起石、绿帘石、绿泥石、角闪石、石英、方解石、钾长石, 少量绢云母、电气石、萤石等。矿石构造主要以致密块状、浸染状、脉状构造为主, 次为条带状、斑杂状构造、蜂窝状构造等。矿石结构主要有交代残余结构(图 4a)、自形晶粒状结构(图 4b)、半自形-它形晶粒状结构(图 4c)、它形晶粒状结构(图 4d)、包含结构(图 4e)及鳞片结构(图 4f)等。

根据矿体野外产出特征、矿石组构、镜下矿物共生组合及相互穿插关系, 可将列廷冈铁多金属矿床的成矿过程分为矽卡岩期和热液期 2 个成矿期, 并进一步划分为 5 个成矿阶段: 早期矽卡岩阶段、退化蚀变阶段、早期热液阶段、石英-硫化物阶段和碳酸盐阶段(图 5)。其中, 矽卡岩期的退化蚀变阶段为磁铁矿形成的主要成矿阶段。



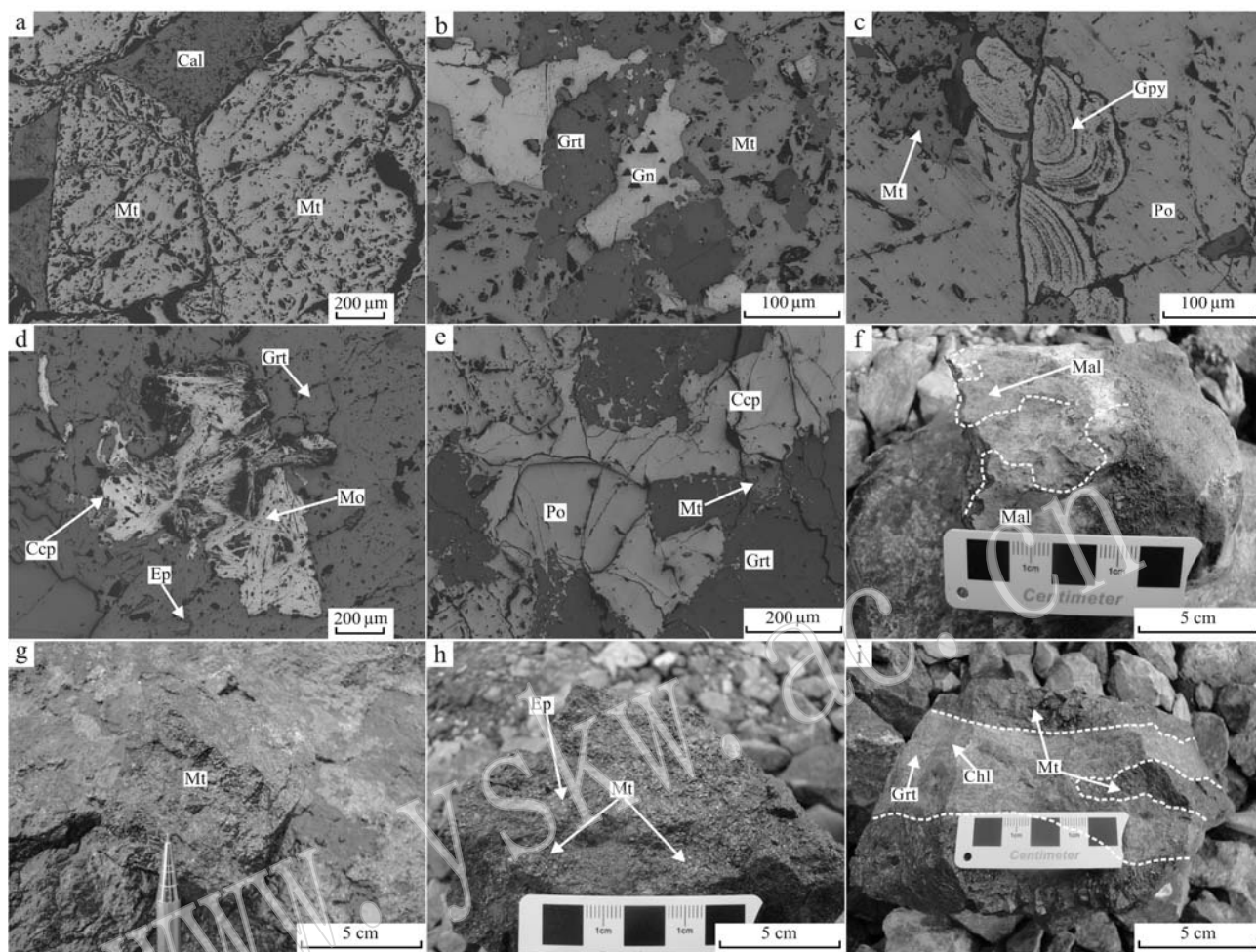


图3 列廷冈铁多金属矿床矿石野外和矿物组合照片

Fig. 3 Ore field and mineral composite photographs of the Lietinggang deposit

a~e—镜下金属矿物组合; f—类矽卡岩表面孔雀石化; g—块状磁铁矿石; h—浸染状磁铁矿石; i—脉状磁铁矿石; Mt—磁铁矿; Po—磁黄铁矿; Gn—方铅矿; Gpy—胶黄铁矿; Ccp—黄铜矿; Mo—辉钼矿; Mal—孔雀石; Grt—石榴子石; Ep—绿帘石; Chl—绿泥石; Cal—方解石

a~e—metal mineral assemblage under microscope; f—malachite mineralization in the skarn; g—massive magnetite ores; h—disseminated magnetite ores; i—veined magnetite ores; Mt—magnetite; Po—pyrrhotite; Gn—galena; Gpy—gluconite; Ccp—chalcopyrite; Mo—molybdenite;

Mal—malachite; Grt—garnet; Ep—epidote; Chl—chlorite; Cal—calcite

(1) 矽卡岩期: 主要包括早期矽卡岩阶段和退化蚀变阶段。早期矽卡岩阶段为无水矽卡岩阶段, 主要形成钙铁榴石、钙铝榴石, 其次为透辉石、硅灰石等无水硅酸盐类矿物; 晚期退化蚀变阶段, 主要形成阳起石、绿帘石、绿泥石、角闪石等含水硅酸盐类矿物, 此外形成大量的块状磁铁矿石、少量石英和黄铁矿, 且块状磁铁矿构成该矿区的主矿体。

(2) 热液期: 早期热液阶段主要形成少量浸染状磁铁矿和脉状磁铁矿, 一般不构成该矿区的独立矿体, 此外还包括少量绿帘石、绿泥石、绢云母、石英等。而石英-硫化物阶段主要形成石英、黄铜矿、辉

钼矿、磁黄铁矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、绢云母等。碳酸盐阶段主要形成方解石、菱铁矿等碳酸盐矿物。

### 3 样品采集与分析测试

用于本文分析测试的磁铁矿样品主要包括3类: 块状磁铁矿石、浸染状磁铁矿石和脉状磁铁矿石。其中, 浸染状磁铁矿石主要采自矿区Ⅲ号矿体平硐内、Ⅶ和Ⅳ号矿体矿石堆, 磁铁矿石常呈稀疏浸染状发育于花岗斑岩、花岗闪长岩岩体及矽卡岩内; 脉状磁铁矿主要采自矿区Ⅰ号和Ⅴ号矿体平硐内、

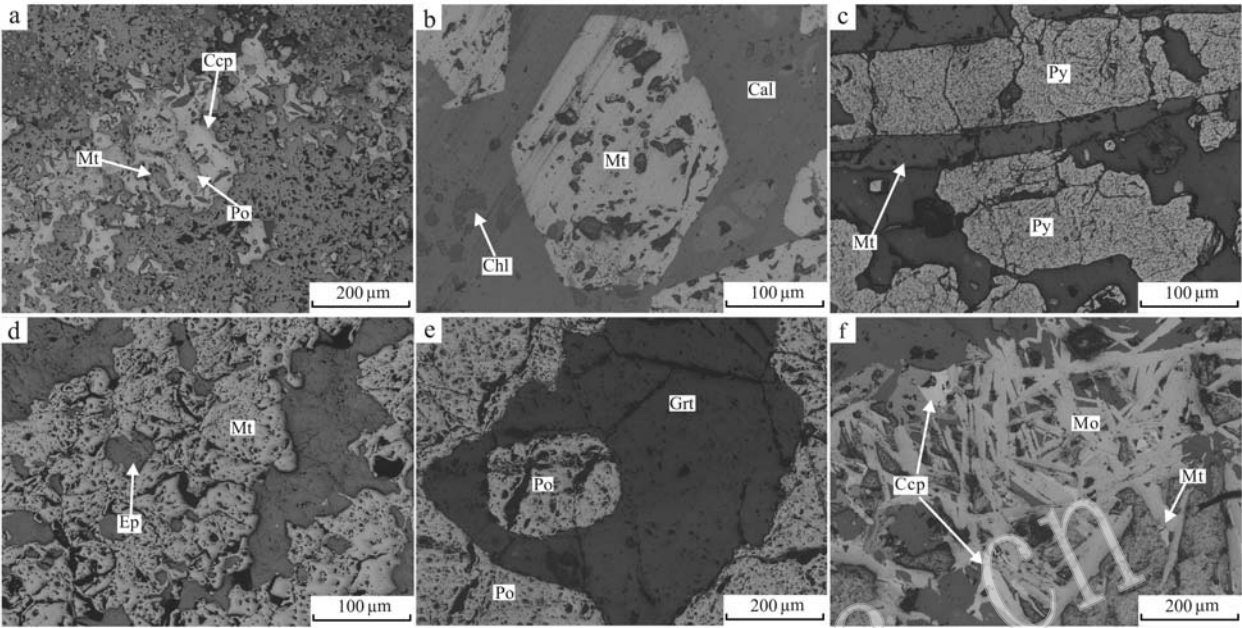


图 4 列廷冈铁多金属矿床典型矿石结构照片

Fig. 4 Typical ore structure photographs of the Lietinggang iron polymetallic deposit  
a—交代残余结构; b—自形晶粒状结构; c—半自形-它形粒状结构; d—它形粒状结构; e—包含结构; f—鳞片状结构  
a—relict texture; b—euhedral granular texture; c—subhedral-angular granular texture; d—angular granular texture;  
e—poikilitic texture; f—flaky texture

| 成矿阶段<br>矿物 | 矽卡岩期    |        | 热液期    |          |       |
|------------|---------|--------|--------|----------|-------|
|            | 早期矽卡岩阶段 | 退化蚀变阶段 | 早期热液阶段 | 石英-硫化物阶段 | 碳酸盐阶段 |
| 钙铁榴石       |         |        |        |          |       |
| 钙铝榴石       |         |        |        |          |       |
| 透辉石        |         |        |        |          |       |
| 硅灰石        |         |        |        |          |       |
| 块状磁铁矿      |         |        |        |          |       |
| 阳起石        |         |        |        |          |       |
| 绿帘石        |         |        |        |          |       |
| 绿泥石        |         |        |        |          |       |
| 角闪石        |         |        |        |          |       |
| 绢云母        |         |        |        |          |       |
| 石英         |         |        |        |          |       |
| 浸染状磁铁矿     |         |        |        |          |       |
| 脉状磁铁矿      |         |        |        |          |       |
| 黄铜矿        |         |        |        |          |       |
| 辉钼矿        |         |        |        |          |       |
| 磁黄铁矿       |         |        |        |          |       |
| 黄铁矿        |         |        |        |          |       |
| 方铅矿        |         |        |        |          |       |
| 闪锌矿        |         |        |        |          |       |
| 方解石        |         |        |        |          |       |
| 菱铁矿        |         |        |        |          |       |

图 5 列廷冈铁多金属矿床矿石矿物和脉石矿物共生组合及生成世代顺序

Fig. 5 Association and formation sequence of the ore minerals and gangue minerals from the Lietinggang iron polymetallic ore deposit

Ⅳ号矿体矿石堆,磁铁矿常呈脉状发育于矽卡岩、花岗斑岩内;块状磁铁矿石主要采自矿区Ⅱ号和Ⅴ号矿体平硐内、Ⅳ号矿体矿石堆,磁铁矿主要发育于石榴子石矽卡岩、透辉石矽卡岩、阳起石绿帘石等矽卡岩中。磁铁矿样品特征如表 1 所示。

首先将采集的磁铁矿矿石样品磨制成探针片,并利用莱卡 DM2500P 偏光显微镜进行详细的镜下观察,圈出磁铁矿物颗粒并照相,然后进行电子探针分析。电子探针实验在长安大学国土资源部成矿作用及动力学开放研究实验室完成,仪器型号为 JXA-8100 型(EPMA),电压为 20 kV,电流为  $2.0 \times 10^{-8}$  A,实际分析束斑直径为 3~5  $\mu\text{m}$ 。Fe、Mg、Mn、Na、Si、

K、Ca、P 等元素检测限为  $\geq 100 \times 10^{-6}$ 。实验标样采用天然矿物或合成金属国家标准,分析精度为 0.01%。

磁铁矿单矿物的挑选由河北省廊坊市区地质矿产调查实验室完成,共完成 16 件磁铁矿单矿物的挑选工作。磁铁矿单矿物 REE 含量和微量元素含量分析在西南冶金地质测试研究中心完成,REE 含量分析采用等离子质谱实验(ICP-MS),使用仪器为 NexLON 300x ICP-MS 等离子质谱仪;微量元素分析采用等离子发射光谱法和 X 荧光法,仪器型号为 Axios X 荧光仪。稀土微量元素分析精度均为  $0.01 \times 10^{-6}$ 。

表 1 西藏列廷冈矿区磁铁矿石样品特征表  
Table 1 Characteristics of magnetite samples in the Lietinggang deposit

| 样品编号    | 样品名称          | 样品采集地点    | 样品手标本及镜下特征                                                                                                  |
|---------|---------------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| LTG-Ⅲ-1 | 矽卡岩化花岗闪长岩     | Ⅲ号矿体 PD03 | 灰色-灰白色,局部呈黄绿色,浅黑色,中-细粒结构,浸染状-块状构造。可见明显矽卡岩化,另局部可见弱的绿帘石、绿泥石化。手标本可见稀疏浸染状磁铁矿、少量辉钼矿发育。                           |
| LTG-Ⅲ-2 | 矽卡岩化大理岩       | Ⅲ号矿体 PD03 | 灰白色,局部呈棕褐色,不等粒变晶结构,浸染状构造。可见弱的矽卡岩化,主要发育少量的阳起石。手标本可见细粒浸染状的磁铁矿发育,另可见他形黄铜矿。                                     |
| LTG-Ⅳ-2 | 石榴子石阳起石绿帘石矽卡岩 | Ⅳ号矿体矿石堆   | 浅灰色,局部呈浅黄绿色、灰黑色,细粒变晶结构,浸染状构造。镜下主要可见黄褐色石榴子石、绿帘石、毛发状阳起石,且磁铁矿局部交代阳起石颗粒呈交代残余结构。                                 |
| LTG-Ⅶ-1 | 弱矽卡岩化花岗斑岩     | Ⅶ号矿体矿石堆   | 灰白色,部分呈浅褐色,斑状结构,浸染状-块状构造。可见弱的石榴子石-透辉石矽卡岩化,细粒的磁铁矿颗粒呈浸染状,并交代早期矽卡岩矿物颗粒。手标本还发育自形黄铁矿颗粒。                          |
| LTG-I-2 | 阳起石绿泥石角闪石矽卡岩  | I号矿体 PD01 | 浅绿色,部分呈墨绿-灰黑色,粒状变晶结构,脉状构造,可见明显阳起石、角闪石化。镜下可见磁铁矿交代角闪石、阳起石等早期矽卡岩矿物。手标本可见脉宽约 0.50~1.0 cm 的磁铁矿脉。                 |
| LTG-Ⅳ-1 | 弱矽卡岩化花岗斑岩     | Ⅳ号矿体矿石堆   | 灰白色,斑状结构、不等变晶结构,脉状构造,局部为角砾状构造。发育弱的矽卡岩化,镜下主要的矽卡岩矿物为绿帘石、绿泥石、绢云母等。手标本可见宽约 3~5 mm 的磁铁矿脉穿插发育。                    |
| LTG-V-1 | 绿泥石角闪石矽卡岩     | V号矿体 PD05 | 浅绿色,局部呈浅黑色,不等粒变晶结构,脉状构造。镜下主要可见绿泥石、角闪石等矽卡岩矿物,矽卡岩蚀变程度整体较弱。主要金属矿物为脉状磁铁矿+方铅矿+闪锌矿。                               |
| LTG-V-2 | 透辉石电气石绿泥石矽卡岩  | V号矿体 PD05 | 墨绿色,局部呈黑色,粒状变晶结构,脉状构造。主要的矽卡岩矿物为他形的透辉石颗粒、板状电气石和绿泥石集合体,金属矿物为磁铁矿+黄铜矿+磁黄铁矿。                                     |
| LTG-Ⅱ-1 | 石榴子石矽卡岩       | Ⅱ号矿体 PD02 | 浅褐-棕褐色,粒状变晶结构,块状构造。主要的矽卡岩矿物为石榴子石,且主要为钙铁榴石,镜下可见石榴子石环带发育,磁铁矿交代石榴子石颗粒,形成典型的骸晶结构。手标本可见粗粒的磁铁矿,粒径约 5~8 mm,另可见辉钼矿。 |
| LTG-Ⅱ-2 | 透辉石石榴子石矽卡岩    | Ⅱ号矿体 PD02 | 灰白-浅褐色,粒状变晶结构,块状构造。镜下可见环带状的石榴子石和高级蓝干涉色的透辉石颗粒。金属矿物主要为自形粒状磁铁矿,另发育黄铜矿、黄铁矿及方铅矿等金属硫化物。                           |
| LTG-Ⅳ-3 | 阳起石绿帘石矽卡岩     | Ⅳ号矿体矿石堆   | 墨绿色,局部呈黄褐色,不等粒变晶结构,块状构造。镜下可见呈放射状集合体的阳起石,另发育姜黄色的绿帘石颗粒。主要金属矿物为磁铁矿,另发育磁黄铁矿、黄铜矿和黄铁矿。                            |
| LTG-V-3 | 绿帘石绿泥石矽卡岩     | V号矿体 PD05 | 浅黄-黄褐色,粒状变晶结构,块状构造。主要矽卡岩矿物为绿帘石和绿泥石。发育粗粒磁铁矿颗粒,另手标本可见少量浸染状的辉钼矿。                                               |

## 4 元素地球化学特征

### 4.1 主要氧化物特征

磁铁矿电子探针成分特征见表 2。从表 2 可知,列廷冈铁多金属矿床磁铁矿全铁 TFeO 含量均相对比较稳定,含量为 86.90%~94.59%,平均含量为 92.55%。3 类不同磁铁矿含一定的 SiO<sub>2</sub> (0.02%~1.84%,平均 0.38%)、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.00%~0.42%,平均 0.03%)、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.03%~6.94%,平均 0.65%)、MgO (0.00%~2.28%,平均 0.16%)、MnO (0.03%~0.84%,平均 0.23%)。个别磁铁矿中含有少量的 Na<sub>2</sub>O (0.00%~0.19%,平均 0.05%)、CaO (0.00%~0.88%,平均 0.04%)、TiO<sub>2</sub> (0.00%~1.49%,平均 0.06%)、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0.00%~0.10%,平均 0.02%)、V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0.00%~0.07%,平均 0.01%)、NiO (0.00%~0.12%,平均 0.02%)。磁铁矿主量元素的相对含量图解(图 6)显示,列廷冈矿床 3 类磁铁矿石中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、MnO 等主要氧化物的含量均表现出随着 TFeO 含量增加而逐渐降低的趋势(图 6a、6b、6c),这 3 种氧化物含量与 TFeO 含量呈明显的负相关性;SiO<sub>2</sub>、CaO、TiO<sub>2</sub> 这 3 种氧化物含量与 TFeO 含量之间也表现为负相关性(图 6d、6e、6f)。同时,随着 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的增加,MgO、MnO 的含量相应增加,MgO 和 MnO 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 均呈现为正相关性(图 6g、6h、6i)。

### 4.2 微量元素特征

从磁铁矿单矿物 ICP-MS 微量元素分析表(表 3)中可见,3 类不同类型磁铁矿中各微量元素含量变化总体差异不大。其中,Zn 在 3 类磁铁矿中含量普遍偏高,Zn 含量为  $911 \times 10^{-6}$ ~ $1\,837 \times 10^{-6}$ ,平均为  $1\,262 \times 10^{-6}$ ;V 为  $12.10 \times 10^{-6}$ ~ $51.70 \times 10^{-6}$ ,平均为  $28.30 \times 10^{-6}$ 。Sc 为  $0.88 \times 10^{-6}$ ~ $1.54 \times 10^{-6}$ ,平均为  $1.15 \times 10^{-6}$ 。Ga 含量为  $4.99 \times 10^{-6}$ ~ $6.22 \times 10^{-6}$ ,平均为  $5.60 \times 10^{-6}$ ;Sn 含量变化较大,含量为  $40.3 \times 10^{-6}$ ~ $278 \times 10^{-6}$ ,平均为  $91 \times 10^{-6}$ 。Co 含量为  $7.74 \times 10^{-6}$ ~ $23.80 \times 10^{-6}$ ,平均为  $18.08 \times 10^{-6}$ ;Ni 含量为  $9.83 \times 10^{-6}$ ~ $19.80 \times 10^{-6}$ ,平均为  $13.58 \times 10^{-6}$ 。Co/Ni 值变化于 0.43~2.56 之间,浸染状磁铁矿 Co/Ni 值较脉状和块状磁铁矿大。Zn/V 值整体偏高,变化于 25.29~99.22 之间,平均比值为 53.81,且脉状磁铁矿中 Zn/V 值最大,浸染状和块状磁铁矿次之。Sn/Ga 值介于 6.81~48.48 之间,平均比值为 16.28,浸染状磁铁矿中 Sn/Ga 值最大,浸染状和块状

磁铁矿次之。磁铁矿微量元素球粒陨石标准化配分图(图 7a)显示,浸染状磁铁矿的微量元素总体含量最高,块状磁铁矿最低,脉状磁铁矿居中。3 类不同类型磁铁矿均具弱 Sr 负异常和强 Ba 负异常,高场强元素(HFSE)Th、Nb、Ta、Zr、Hf 等相对富集,低场强元素(LFSE)Rb、Sr、Ba 等相对亏损的特征。

### 4.3 稀土元素特征

磁铁矿单矿物 ICP-MS 稀土元素成分特征详见表 4。由表 4 可知,3 种不同类型磁铁矿稀土元素含量整体均较低,变化较小。其中,浸染状磁铁矿稀土元素总含量( $\Sigma$ REE)最高, $\Sigma$ REE 为  $3.92 \times 10^{-6}$ ~ $7.05 \times 10^{-6}$ ,平均  $5.45 \times 10^{-6}$ ;脉状磁铁矿稀土元素总含量其次, $\Sigma$ REE 为  $1.26 \times 10^{-6}$ ~ $3.11 \times 10^{-6}$ ,平均  $1.96 \times 10^{-6}$ 。 $\Sigma$ REE 最低为块状磁铁矿,为  $0.64 \times 10^{-6}$ ~ $1.33 \times 10^{-6}$ ,平均为  $1.02 \times 10^{-6}$ 。磁铁矿稀土元素球粒陨石标准化配分图(图 7b)显示曲线整体右倾,3 种不同类型磁铁矿均具有轻稀土元素相对富集而重稀土元素相对亏损的特征,这与 LREE/HREE 值(3.59~13.50,平均为 7.73)反映结论一致。此外,浸染状和脉状磁铁矿均具弱的 Eu 负异常,而块状磁铁矿具弱的 Eu 正异常特征,造成这种情况的原因可能是磁铁矿结晶时的物理化学条件有所差异引起。

## 5 讨论

### 5.1 磁铁矿成因类型

磁铁矿属于尖晶石族,其晶体化学分子式为 AB<sub>2</sub>X<sub>4</sub>,A 组主要阳离子为 Mg<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Mn<sup>2+</sup>、Ni<sup>2+</sup> 等;B 组主要阳离子为 Al<sup>3+</sup>、Fe<sup>3+</sup>、Ti<sup>4+</sup>、Cr<sup>3+</sup> 等(Lindsley, 1976; 潘兆橹, 1984; Deer *et al.*, 1992),同时磁铁矿中还可赋存 Cr、V、Ca、Co、Ni、Sn、Cu、Zn、Ga、Se、Te、Ag、Au 等 20 多种元素。磁铁矿可形成于许多地质环境中,其地球化学成分的变化对于形成环境的指示作用,长期以来一直受到人们的关注。林师整(1982)根据 3 000 多个磁铁矿化学成分数据制作了 TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-(MgO+MnO)磁铁矿成因三角图解(图 8a),将磁铁矿按成因分为 6 种:侵入岩中副矿物型、岩浆型、火山岩型、热液型、矽卡岩型和沉积变质型。如图 8a,列廷冈矿区 3 种不同类型的磁铁矿大部分数据点均落在热液型区域内,少数落在沉积变质型和矽卡岩型区域内。陈光远等(1987)通过磁铁矿单矿物化学分析资料进行统计,建立了磁铁矿的 TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO 成因图解(图 8b),将矿床中的磁铁矿床分为沉积变质磁铁矿、接触交代磁铁矿、超基性-基性-中性

表 2 列廷冈铁多金属矿床磁铁矿电子探针成分特征分析表

| Table 2 Major elements content of magnetite by electron microprobe analysis in the Lietinggang iron polymetallic deposit |             |                   |      |                                |                  |                  |      |       |                  |                               |      |                                |      |                               | w <sub>B</sub> /% |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------------|------|--------------------------------|------------------|------------------|------|-------|------------------|-------------------------------|------|--------------------------------|------|-------------------------------|-------------------|--|
| 样品编号                                                                                                                     | 样品名称        | Na <sub>2</sub> O | MgO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | SiO <sub>2</sub> | CaO  | TFeO  | TiO <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | MnO  | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | NiO  | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Total             |  |
| 浸染状<br>磁铁矿                                                                                                               | LTG-III-1.1 | 0.00              | 0.01 | 0.14                           | 0.00             | 0.36             | 0.00 | 92.97 | 0.01             | 0.00                          | 0.11 | 0.05                           | 0.00 | 0.01                          | 93.65             |  |
|                                                                                                                          | LTG-III-1.2 | 0.05              | 0.05 | 0.18                           | 0.00             | 0.46             | 0.00 | 93.48 | 0.03             | 0.00                          | 0.11 | 0.07                           | 0.00 | 0.00                          | 94.43             |  |
|                                                                                                                          | LTG-III-1.3 | 0.06              | 0.08 | 0.16                           | 0.02             | 0.60             | 0.00 | 93.12 | 0.02             | 0.06                          | 0.08 | 0.00                           | 0.00 | 0.00                          | 94.18             |  |
|                                                                                                                          | LTG-III-2.1 | 0.06              | 0.00 | 0.03                           | 0.01             | 0.11             | 0.00 | 92.46 | 0.05             | 0.05                          | 0.07 | 0.06                           | 0.00 | 0.03                          | 92.92             |  |
|                                                                                                                          | LTG-III-2.2 | 0.02              | 0.09 | 0.23                           | 0.01             | 0.62             | 0.00 | 93.53 | 0.00             | 0.00                          | 0.13 | 0.01                           | 0.01 | 0.00                          | 94.64             |  |
|                                                                                                                          | LTG-III-2.3 | 0.03              | 0.00 | 0.11                           | 0.00             | 0.33             | 0.00 | 94.59 | 0.02             | 0.01                          | 0.17 | 0.08                           | 0.12 | 0.00                          | 95.43             |  |
|                                                                                                                          | LTG-IV-2.1  | 0.00              | 0.04 | 0.71                           | 0.00             | 0.08             | 0.00 | 93.58 | 0.05             | 0.04                          | 0.31 | 0.00                           | 0.00 | 0.04                          | 94.85             |  |
|                                                                                                                          | LTG-IV-2.2  | 0.06              | 0.16 | 0.22                           | 0.00             | 0.43             | 0.00 | 92.23 | 0.02             | 0.02                          | 0.16 | 0.00                           | 0.00 | 0.00                          | 93.30             |  |
|                                                                                                                          | LTG-IV-2.3  | 0.00              | 0.18 | 0.89                           | 0.02             | 0.50             | 0.04 | 89.86 | 0.11             | 0.06                          | 0.22 | 0.00                           | 0.01 | 0.00                          | 91.89             |  |
|                                                                                                                          | LTG-V-1.1   | 0.04              | 0.00 | 1.07                           | 0.00             | 0.31             | 0.13 | 92.00 | 0.01             | 0.06                          | 0.17 | 0.03                           | 0.00 | 0.04                          | 93.86             |  |
|                                                                                                                          | LTG-V-1.2   | 0.08              | 0.08 | 0.59                           | 0.00             | 0.48             | 0.05 | 92.45 | 0.01             | 0.05                          | 0.09 | 0.00                           | 0.00 | 0.00                          | 93.87             |  |
|                                                                                                                          | LTG-V-1.3   | 0.13              | 0.03 | 0.43                           | 0.00             | 0.35             | 0.00 | 92.65 | 0.00             | 0.00                          | 0.03 | 0.42                           | 0.00 | 0.00                          | 94.04             |  |
|                                                                                                                          | LTG-V-1.4   | 0.00              | 0.06 | 0.66                           | 0.00             | 0.07             | 0.00 | 93.88 | 0.00             | 0.00                          | 0.18 | 0.00                           | 0.03 | 0.00                          | 94.87             |  |
|                                                                                                                          | LTG-V-1.3   | 0.08              | 0.05 | 1.14                           | 0.00             | 0.05             | 0.00 | 91.57 | 0.08             | 0.01                          | 0.17 | 0.03                           | 0.00 | 0.01                          | 93.19             |  |
| 脉状<br>磁铁矿                                                                                                                | LTG-I-2.1   | 0.12              | 0.03 | 0.99                           | 0.00             | 0.02             | 0.00 | 92.99 | 0.07             | 0.00                          | 0.09 | 0.00                           | 0.01 | 0.00                          | 94.31             |  |
|                                                                                                                          | LTG-I-2.2   | 0.00              | 0.08 | 1.39                           | 0.02             | 0.04             | 0.00 | 90.70 | 0.09             | 0.05                          | 0.17 | 0.00                           | 0.01 | 0.07                          | 92.63             |  |
|                                                                                                                          | LTG-I-2.3   | 0.08              | 0.34 | 0.99                           | 0.00             | 1.01             | 0.00 | 90.36 | 0.11             | 0.00                          | 0.13 | 0.00                           | 0.00 | 0.00                          | 93.02             |  |
|                                                                                                                          | LTG-IV-1.1  | 0.06              | 0.00 | 0.03                           | 0.01             | 0.11             | 0.00 | 92.46 | 0.05             | 0.05                          | 0.07 | 0.06                           | 0.00 | 0.05                          | 92.94             |  |
|                                                                                                                          | LTG-IV-1.2  | 0.02              | 0.09 | 0.23                           | 0.01             | 0.62             | 0.00 | 93.53 | 0.00             | 0.00                          | 0.13 | 0.01                           | 0.01 | 0.00                          | 94.64             |  |
|                                                                                                                          | LTG-IV-1.3  | 0.03              | 0.00 | 0.11                           | 0.00             | 0.33             | 0.00 | 94.59 | 0.02             | 0.01                          | 0.17 | 0.08                           | 0.12 | 0.00                          | 95.43             |  |
|                                                                                                                          | LTG-V-1.1   | 0.14              | 0.14 | 0.22                           | 0.00             | 0.06             | 0.00 | 92.31 | 0.00             | 0.00                          | 0.79 | 0.05                           | 0.00 | 0.00                          | 93.72             |  |
|                                                                                                                          | LTG-V-1.2   | 0.01              | 0.03 | 0.41                           | 0.00             | 0.14             | 0.00 | 94.09 | 0.02             | 0.07                          | 0.12 | 0.00                           | 0.00 | 0.00                          | 94.89             |  |
|                                                                                                                          | LTG-V-1.3   | 0.04              | 0.03 | 0.48                           | 0.00             | 0.02             | 0.00 | 93.06 | 1.49             | 0.06                          | 0.27 | 0.00                           | 0.02 | 0.00                          | 95.46             |  |
|                                                                                                                          | LTG-V-2.1   | 0.10              | 0.27 | 0.25                           | 0.00             | 0.29             | 0.00 | 91.68 | 0.00             | 0.02                          | 0.84 | 0.00                           | 0.10 | 0.03                          | 93.58             |  |
|                                                                                                                          | LTG-V-2.2   | 0.00              | 0.38 | 0.52                           | 0.00             | 0.99             | 0.26 | 90.82 | 0.00             | 0.10                          | 0.31 | 0.01                           | 0.02 | 0.00                          | 93.41             |  |
|                                                                                                                          | LTG-I-2.4   | 0.10              | 0.04 | 1.21                           | 0.00             | 0.02             | 0.00 | 92.15 | 0.05             | 0.00                          | 0.14 | 0.00                           | 0.00 | 0.00                          | 93.70             |  |
|                                                                                                                          | LTG-I-2.5   | 0.00              | 0.18 | 1.07                           | 0.00             | 0.03             | 0.00 | 92.60 | 0.03             | 0.00                          | 0.26 | 0.02                           | 0.02 | 0.05                          | 94.26             |  |
|                                                                                                                          | LTG-V-2.3   | 0.03              | 0.25 | 0.60                           | 0.03             | 0.59             | 0.19 | 91.93 | 0.00             | 0.00                          | 0.21 | 0.08                           | 0.00 | 0.00                          | 93.90             |  |
| 块状<br>磁铁矿                                                                                                                | LTG-II-1.1  | 0.01              | 0.01 | 0.29                           | 0.00             | 0.08             | 0.00 | 93.54 | 0.01             | 0.00                          | 0.26 | 0.00                           | 0.02 | 0.00                          | 94.21             |  |
|                                                                                                                          | LTG-II-1.2  | 0.03              | 0.04 | 0.65                           | 0.00             | 0.02             | 0.00 | 93.71 | 0.02             | 0.01                          | 0.28 | 0.03                           | 0.07 | 0.02                          | 94.86             |  |
|                                                                                                                          | LTG-II-1.3  | 0.01              | 0.10 | 0.53                           | 0.00             | 0.17             | 0.00 | 93.71 | 0.03             | 0.01                          | 0.24 | 0.01                           | 0.06 | 0.00                          | 94.86             |  |
|                                                                                                                          | LTG-II-2.1  | 0.03              | 0.25 | 0.67                           | 0.01             | 0.64             | 0.08 | 91.42 | 0.04             | 0.03                          | 0.29 | 0.01                           | 0.00 | 0.00                          | 93.47             |  |
|                                                                                                                          | LTG-II-2.2  | 0.16              | 0.05 | 0.49                           | 0.00             | 0.06             | 0.00 | 93.37 | 0.02             | 0.00                          | 0.16 | 0.02                           | 0.00 | 0.02                          | 94.35             |  |
|                                                                                                                          | LTG-II-2.3  | 0.19              | 0.07 | 0.40                           | 0.02             | 0.15             | 0.00 | 92.21 | 0.06             | 0.00                          | 0.28 | 0.02                           | 0.00 | 0.00                          | 93.39             |  |
|                                                                                                                          | LTG-IV-3.1  | 0.00              | 0.74 | 0.21                           | 0.01             | 1.78             | 0.00 | 90.72 | 0.00             | 0.00                          | 0.26 | 0.00                           | 0.00 | 0.00                          | 93.71             |  |
|                                                                                                                          | LTG-IV-3.2  | 0.04              | 0.17 | 0.04                           | 0.00             | 0.59             | 0.00 | 92.46 | 0.00             | 0.07                          | 0.10 | 0.19                           | 0.05 | 0.00                          | 93.70             |  |
|                                                                                                                          | LTG-IV-3.3  | 0.13              | 0.19 | 0.11                           | 0.00             | 1.09             | 0.00 | 93.08 | 0.00             | 0.06                          | 0.29 | 0.01                           | 0.00 | 0.04                          | 95.01             |  |
|                                                                                                                          | LTG-V-3.1   | 0.00              | 0.21 | 0.28                           | 0.00             | 0.04             | 0.00 | 92.77 | 0.05             | 0.00                          | 0.72 | 0.00                           | 0.01 | 0.00                          | 94.08             |  |
|                                                                                                                          | LTG-V-3.2   | 0.16              | 0.06 | 0.86                           | 0.01             | 0.26             | 0.00 | 94.39 | 0.00             | 0.00                          | 0.08 | 0.00                           | 0.00 | 0.00                          | 95.82             |  |
|                                                                                                                          | LTG-II-2.4  | 0.13              | 0.04 | 0.28                           | 0.00             | 0.06             | 0.00 | 93.78 | 0.06             | 0.00                          | 0.11 | 0.12                           | 0.01 | 0.00                          | 94.59             |  |
|                                                                                                                          | LTG-II-2.5  | 0.00              | 0.01 | 0.57                           | 0.01             | 0.05             | 0.00 | 93.60 | 0.03             | 0.00                          | 0.15 | 0.00                           | 0.05 | 0.06                          | 94.52             |  |
|                                                                                                                          | LTG-V-3.3   | 0.04              | 2.28 | 6.94                           | 0.01             | 1.84             | 0.88 | 86.90 | 0.00             | 0.01                          | 0.63 | 0.04                           | 0.00 | 0.00                          | 99.56             |  |

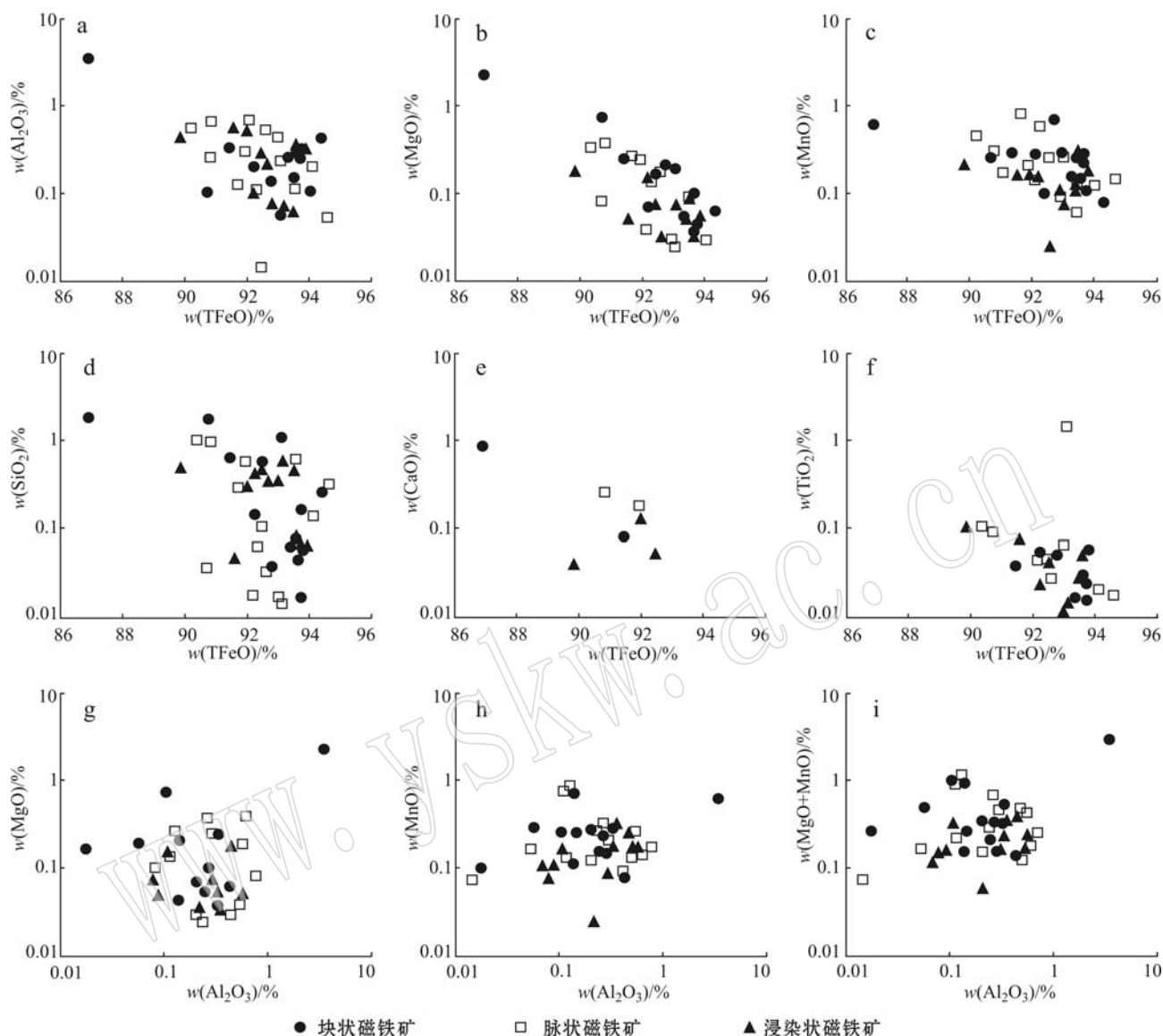


图 6 列廷冈铁矿床磁铁矿主要元素组成

Fig. 6 Characteristics of major elements of magnetite from the Lietinggang iron ore deposit

岩浆磁铁矿、酸性-碱性岩浆磁铁矿。如图 8b 中, 3 类不同类型磁铁矿均落在沉积变质-接触交代区域内。徐国风等(1979)对各种成因类型磁铁矿床中的磁铁矿的化学成分进行了讨论, 总结了不同成因类型铁矿床中磁铁矿的标型化学组分特征, 将其分为岩浆矿床、接触交代矿床、热液交代矿床和区域变质矿床。Dupuis 和 Beaudoin(2011)通过对世界上不同成因类型矿床中磁铁矿和赤铁矿的测试研究, 建立了针对各种类型矿床的磁-赤铁矿成因分类图解(图 9)。在图 9 中, 本区 3 种类型磁铁矿均落在矽卡岩型区域内。

磁铁矿中,  $\text{Fe}^{2+}$  的常见类质同像替代有  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$  等,  $\text{Fe}^{3+}$  的常见类质同

像替代有  $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Ti}^{4+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$ 、 $\text{V}^{3+}$  等(潘兆橹, 1984), 此外, 还常可检测到微量的 Si、Sr、Ba、Ga、Sc、Sn、Zr、Hf、Nd、Ta 等(Singoyi *et al.*, 2006; Nadoll, 2009; 段超等, 2012)。类质同像替代的种类和强度与结晶时的物理化学条件紧密相关, 是磁铁矿成分标型研究的理论基础。二元散点图研究发现, 列廷冈铁多金属矿床的磁铁矿中, 3 种不同类型磁铁矿中均表现出 Al、Mn、Mg 等主要元素与 Fe 均呈明显的反消长关系(图 6a、6b、6c), 这反映出该矿床中主要为 Al、Mn、Mg 等与 Fe 之间发生了类质同像置换。同时, Al 与 Mn、Mg、Mn + Mg 之间表现出正相关关系(图 6g、6h、6i), 这反映出随着  $\text{Al}^{3+}$  代替  $\text{Fe}^{3+}$  的增强,  $\text{Mn}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  代替

表 3 列廷冈铁多金属矿床磁铁矿单矿物 ICP-MS 微量元素成分特征表  
Table 3 ICP-MS trace element characteristics of magnetite from the Lietinggang iron polymetallic deposit

| 样品类型<br>原样编号 | 浸染状磁铁矿    |           |          |           |         | 脉状磁铁矿    |         |         |          |          | 块状磁铁矿    |         |         |         |         | $w_B/10^{-6}$ |
|--------------|-----------|-----------|----------|-----------|---------|----------|---------|---------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------------|
|              | LTG-III-1 | LTG-III-2 | LTG-IV-2 | LTG-VII-1 | LTG-I-2 | LTG-IV-1 | LTG-V-1 | LTG-V-2 | LTG-II-1 | LTG-II-2 | LTG-IV-3 | LTG-V-3 | LTG-V-3 | LTG-V-3 | LTG-V-3 |               |
| Co           | 8.03      | 7.66      | 23.40    | 7.74      | 15.20   | 23.00    | 22.90   | 24.30   | 18.50    | 19.40    | 23.80    | 23.00   | 23.00   | 23.00   | 23.00   |               |
| Ni           | 16.10     | 15.10     | 10.70    | 19.80     | 19.40   | 9.83     | 10.80   | 11.50   | 13.60    | 12.70    | 10.30    | 13.30   | 13.30   | 13.30   | 13.30   |               |
| Zn           | 1 327     | 1 269     | 1 318    | 1 307     | 1 837   | 1 285    | 1 205   | 1 242   | 925      | 911      | 1 323    | 1 190   | 1 190   | 1 190   | 1 190   |               |
| V            | 31.6      | 32.4      | 24.9     | 51.7      | 41.5    | 25.9     | 12.1    | 13.6    | 33.9     | 34.4     | 25.3     | 12.4    | 12.4    | 12.4    | 12.4    |               |
| Sn           | 278.0     | 40.3      | 78.6     | 48.8      | 79.3    | 59.2     | 106.0   | 79.6    | 94.1     | 76.5     | 52.6     | 102.0   | 102.0   | 102.0   | 102.0   |               |
| Ga           | 5.73      | 5.92      | 5.40     | 5.66      | 6.07    | 5.28     | 5.56    | 5.25    | 6.22     | 6.00     | 4.99     | 5.07    | 5.07    | 5.07    | 5.07    |               |
| Sc           | 1.32      | 1.54      | 1.18     | 1.09      | 0.98    | 1.30     | 1.09    | 0.88    | 1.00     | 1.40     | 1.02     | 0.95    | 0.95    | 0.95    | 0.95    |               |
| Cr           | 15.5      | 10.5      | 14.8     | 17.0      | 19.4    | 10.8     | 11.5    | 13.9    | 12.2     | 15.8     | 11.3     | 20.0    | 20.0    | 20.0    | 20.0    |               |
| Rb           | 1.85      | 1.51      | 5.88     | 1.65      | 0.86    | 2.47     | 1.48    | 1.34    | 0.78     | 0.78     | 1.15     | 1.39    | 1.39    | 1.39    | 1.39    |               |
| Sr           | 11.90     | 14.10     | 8.66     | 13.40     | 8.47    | 9.67     | 11.40   | 11.60   | 9.42     | 10.40    | 8.58     | 12.10   | 12.10   | 12.10   | 12.10   |               |
| Zr           | 9.94      | 11.50     | 6.83     | 4.53      | 5.95    | 12.20    | 13.50   | 3.57    | 6.53     | 11.90    | 6.34     | 3.43    | 3.43    | 3.43    | 3.43    |               |
| In           | 0.16      | 0.14      | 0.36     | 0.14      | 0.23    | 0.37     | 0.64    | 0.67    | 0.31     | 0.32     | 0.38     | 0.61    | 0.61    | 0.61    | 0.61    |               |
| Cs           | 0.35      | 0.34      | 0.37     | 0.37      | 0.20    | 0.30     | 0.30    | 0.30    | 0.16     | 0.17     | 0.30     | 0.29    | 0.29    | 0.29    | 0.29    |               |
| Ba           | 3.24      | 4.02      | 11.30    | 3.19      | 5.20    | 4.73     | 15.10   | 15.70   | 1.26     | 3.41     | 4.57     | 12.50   | 12.50   | 12.50   | 12.50   |               |
| Hf           | 0.82      | 0.85      | 0.35     | 0.20      | 0.11    | 0.47     | 0.49    | 0.27    | 0.14     | 1.19     | 0.24     | 0.16    | 0.16    | 0.16    | 0.16    |               |
| Ta           | 0.84      | 0.36      | 0.31     | 0.22      | 0.16    | 0.23     | 0.12    | 0.25    | 0.11     | 0.60     | 0.56     | 0.55    | 0.55    | 0.55    | 0.55    |               |
| Pb           | 22.60     | 9.58      | 13.00    | 13.20     | 16.00   | 14.10    | 22.20   | 23.00   | 11.20    | 9.86     | 11.80    | 20.80   | 20.80   | 20.80   | 20.80   |               |
| Th           | 0.24      | 0.28      | 0.41     | 0.16      | 0.20    | 0.27     | 0.21    | 0.19    | 0.18     | 0.15     | 0.08     | 0.11    | 0.11    | 0.11    | 0.11    |               |
| U            | 0.28      | 0.27      | 0.16     | 0.20      | 0.24    | 0.16     | 0.12    | 0.14    | 0.13     | 0.11     | 0.13     | 0.13    | 0.13    | 0.13    | 0.13    |               |



**Table 4 ICP-MS rare earth element characteristics of magnetite from the Lietinggang iron polymetallic deposit**

| 样品名称<br>样品编号         |       | 浸染状磁铁矿    |           |          | 脉状磁铁矿     |         |          | 块状磁铁矿   |         |          |          |          |
|----------------------|-------|-----------|-----------|----------|-----------|---------|----------|---------|---------|----------|----------|----------|
|                      |       | LTG-III-1 | LTG-III-2 | LTG-IV-2 | LTG-VII-1 | LTG-I-2 | LTG-IV-1 | LTG-V-1 | LTG-V-2 | LTG-II-1 | LTG-II-2 | LTG-IV-3 |
| La                   | 1.19  | 0.93      | 0.98      | 0.61     | 0.69      | 0.47    | 0.24     | 0.36    | 0.25    | 0.29     | 0.11     | 0.24     |
| Ce                   | 3.11  | 3.00      | 2.12      | 1.74     | 1.37      | 0.71    | 0.43     | 0.46    | 0.38    | 0.48     | 0.22     | 0.34     |
| Pr                   | 0.42  | 0.33      | 0.21      | 0.23     | 0.15      | 0.09    | 0.05     | 0.07    | 0.04    | 0.05     | 0.03     | 0.04     |
| Nd                   | 1.53  | 1.26      | 0.82      | 0.86     | 0.54      | 0.35    | 0.21     | 0.31    | 0.19    | 0.24     | 0.13     | 0.15     |
| Sm                   | 0.21  | 0.16      | 0.15      | 0.12     | 0.08      | 0.06    | 0.05     | 0.07    | 0.04    | 0.05     | 0.02     | 0.03     |
| Eu                   | 0.04  | 0.03      | 0.03      | 0.03     | 0.01      | 0.01    | 0.01     | 0.02    | 0.02    | 0.02     | 0.01     | 0.01     |
| Gd                   | 0.19  | 0.15      | 0.15      | 0.10     | 0.08      | 0.06    | 0.05     | 0.07    | 0.04    | 0.05     | 0.03     | 0.04     |
| Tb                   | 0.02  | 0.02      | 0.02      | 0.02     | 0.01      | 0.01    | 0.01     | 0.01    | 0.01    | 0.01     | 0.01     | 0.01     |
| Dy                   | 0.12  | 0.10      | 0.11      | 0.07     | 0.07      | 0.05    | 0.07     | 0.07    | 0.04    | 0.05     | 0.02     | 0.05     |
| Ho                   | 0.03  | 0.02      | 0.02      | 0.01     | 0.01      | 0.01    | 0.01     | 0.02    | 0.01    | 0.01     | 0.01     | 0.01     |
| Er                   | 0.09  | 0.06      | 0.05      | 0.05     | 0.04      | 0.03    | 0.05     | 0.06    | 0.03    | 0.04     | 0.01     | 0.04     |
| Tm                   | 0.01  | 0.01      | 0.01      | 0.01     | 0.01      | 0.01    | 0.01     | 0.01    | 0.01    | 0.01     | 0.01     | 0.01     |
| Yb                   | 0.07  | 0.05      | 0.05      | 0.04     | 0.03      | 0.03    | 0.05     | 0.05    | 0.03    | 0.03     | 0.01     | 0.03     |
| Lu                   | 0.01  | 0.01      | 0.01      | 0.01     | 0.01      | 0.01    | 0.01     | 0.01    | 0.01    | .01      | 0.01     | 0.01     |
| Y                    | 0.96  | 0.71      | 0.49      | 0.48     | 0.40      | 0.30    | 0.46     | 0.54    | 0.30    | 0.38     | 0.14     | 0.33     |
| ΣREE                 | 7.05  | 6.14      | 4.71      | 3.92     | 3.11      | 1.89    | 1.26     | 1.59    | 1.11    | 1.33     | 0.64     | 1.02     |
| LREE                 | 6.51  | 5.72      | 4.30      | 3.59     | 2.84      | 1.69    | 0.99     | 1.29    | 0.92    | 1.13     | 0.52     | 0.81     |
| HREE                 | 0.54  | 0.42      | 0.41      | 0.32     | 0.27      | 0.20    | 0.28     | 0.30    | 0.18    | 0.20     | 0.11     | 0.21     |
| LREE/HREE            | 11.96 | 13.50     | 10.49     | 11.17    | 10.46     | 8.26    | 3.59     | 4.29    | 5.09    | 5.53     | 4.53     | 3.91     |
| (La/Yb) <sub>N</sub> | 13.00 | 13.31     | 14.87     | 9.97     | 14.91     | 12.03   | 3.30     | .91     | 6.73    | 6.24     | 5.78     | 4.95     |
| δEu                  | 0.55  | 0.61      | 0.62      | 0.80     | 0.37      | 0.54    | 0.73     | 0.88    | 1.19    | 1.27     | 1.23     | 1.17     |
| δCe                  | 1.07  | 1.32      | 1.09      | 1.14     | 1.01      | 0.79    | 0.92     | 0.66    | 0.82    | 0.88     | 0.93     | 0.76     |
| Y/Ho                 | 35.50 | 34.76     | 26.79     | 32.48    | 28.36     | 30.13   | 31.38    | 33.57   | 30.40   | 37.51    | 14.04    | 33.04    |

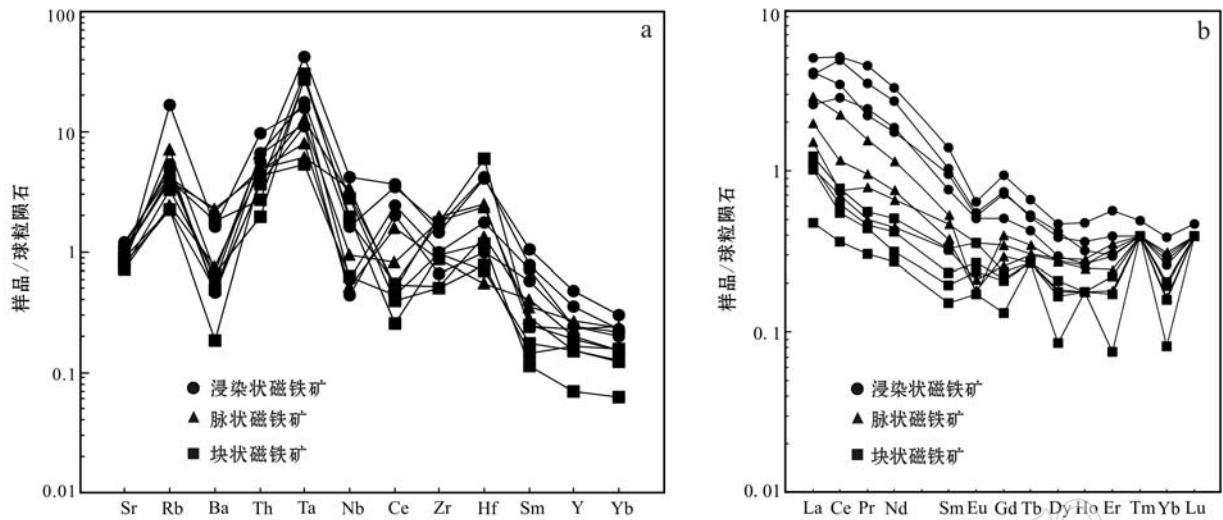


图 7 磁铁矿单矿物微量元素(a)和 REE(b)球粒陨石标准化配分图(球粒陨石标准化值引自 Sun 等, 1989)

Fig. 7 Trace elements spider diagram (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of magnetite samples (chondrite-normalized values after Sun *et al.*, 1989)

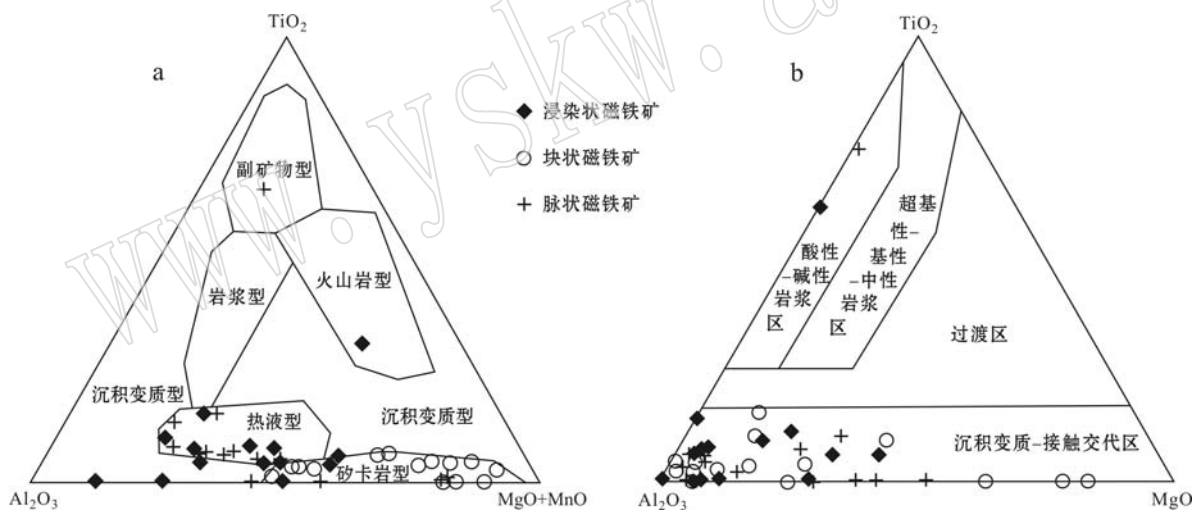


图 8 列廷冈铁矿床磁铁矿  $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{MgO} + \text{MnO})$  成因图解(a)(据林师整, 1982)和  $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$  成因图解(b)(据陈光远, 1987)

Fig. 8 Ternary plot of  $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{MgO} + \text{MnO})$  (a) (modified after Lin Shizheng, 1982) and  $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$  (b) (modified after Chen Guangyuan, 1987) of magnetite from the Lietinggang iron ore deposit

$\text{Fe}^{2+}$  的程度也在提高。

磁铁矿类质同像置换的主要类型具有成因意义。岩浆岩中的磁铁矿, Ti 含量相当高, 为最主要置换类型, 而岩浆期后形成的各种交代岩石中的磁铁矿, Ti 含量显著降低, 区域变质岩中的磁铁矿, Ti 含量极低; V 在基性-超基性岩中的磁铁矿中含量较高, 在碱性岩和其他岩浆岩中的磁铁矿中含量较低, 在变质岩的磁铁矿中含量极低(徐国风等, 1979); Ca、Mg、Mn 在矽

卡岩中的磁铁矿中含量最高, 岩浆岩的磁铁矿中次之, 区域变质岩中最低(林师整, 1982)。列廷冈铁多金属矿床磁铁矿中主要的类质同像置换元素为 Al、Mn、Mg 等元素, 这与岩浆岩、岩浆矿床和区域变质岩中的磁铁矿明显不同, 而与矽卡岩中的磁铁矿较类似。

磁铁矿中的部分次要元素和微量元素含量或比值也可作为重要的成因标型。其中, 热液成因的磁铁矿相对于岩浆成因的磁铁矿具有较低含量的

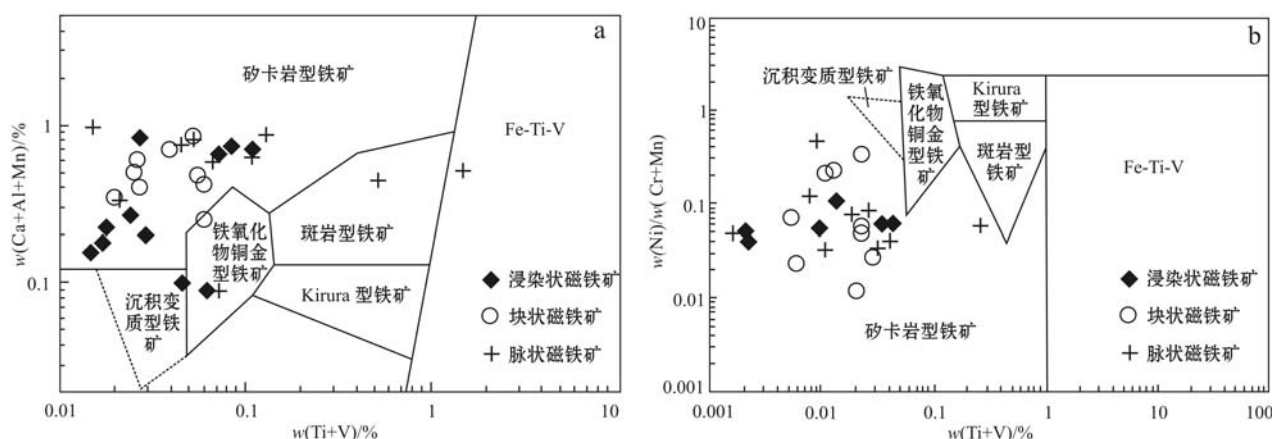


图 9 列廷冈铁矿床磁铁矿 $(\text{Ca} + \text{Al} + \text{Mn}) - (\text{Ti} + \text{V})$ 、 $\text{Ni}/(\text{Cr} + \text{Mn}) - (\text{Ti} + \text{V})$ 成因图解(底图据 Dupuis 和 Beaudoin, 2011)

Fig. 9  $\text{Ca} + \text{Al} + \text{Mn}$  versus  $\text{Ti} + \text{V}$ ,  $\text{Ni}/(\text{Cr} + \text{Mn})$  versus  $(\text{Ti} + \text{V})$  discriminant diagrams showing analyses of magnetite for samples from the Lietinggang iron deposit (modified after Dupuis and Beaudoin, 2011)

$\text{Ti}$  ( $< 2.300 \times 10^{-6}$ )、 $\text{V}$  ( $< 400 \times 10^{-6}$ ) (Nadoll, 2009)、 $\text{Sc}$  (矽卡岩为  $1.26 \times 10^{-6}$ , 岩浆型铁矿床为  $14.22 \times 10^{-6}$ ) (王奎仁, 1989)。Ga 由于具有较低的分配系数而较少出现在磁铁矿中, 但岩浆作用成因的磁铁矿较热液作用成因的磁铁矿含有较高的 Ga (热液成因磁铁矿床 Ga 含量为  $10 \times 10^{-6} \sim 28 \times 10^{-6}$ )。列廷冈铁多金属矿床中磁铁矿的  $\text{Ti}$  ( $0.00 \times 10^{-2} \sim 1.49 \times 10^{-2}$ , 平均为  $0.06 \times 10^{-2}$ )、 $\text{V}$  ( $0 \sim 0.07 \times 10^{-2}$ , 平均为  $0.01 \times 10^{-2}$ )、 $\text{Sc}$  ( $0.75 \times 10^{-6} \sim 1.54 \times 10^{-6}$ , 平均为  $1.10 \times 10^{-6}$ ) 含量变化范围小, 与热液成因的磁铁矿的  $\text{Ti}$ 、 $\text{V}$ 、 $\text{Sc}$  含量接近, 反映磁铁矿为热液成因。此外, 大量分析数据确实表明岩浆岩及岩浆矿床中的磁铁矿具有非常低的  $\text{SiO}_2$  含量 (普遍  $< 0.1\%$ ) (Dare *et al.*, 2012; Zhou *et al.*, 2013), 而热液矿床特别是矽卡岩型矿床中, 磁铁矿普遍含较高的  $\text{SiO}_2$  含量 (Shiga, 1988; Shimazaki, 1998)。本文磁铁矿电子探针数据显示,  $\text{SiO}_2$  含量为  $0.02\% \sim 1.84\%$ , 平均含量为  $0.38\%$ , 远大于  $0.1\%$ , 故磁铁矿为热液成因。胡浩等 (2014) 研究鄂东程潮矽卡岩型铁矿床发现, 从花岗岩到内矽卡岩再到外矽卡岩, 磁铁矿的  $\text{Co}/\text{Ni}$ 、 $\text{Zn}/\text{V}$  和  $\text{Sn}/\text{Ga}$  值依次增大, 聚集在 3 个不同的区域。在胡浩等 (2014) 的  $\text{Zn}/\text{V} - \text{Co}/\text{Ni}$  和  $\text{Sn}/\text{Ga} - \text{Co}/\text{Ni}$  关系图 (图 10) 中, 列廷冈铁矿床磁铁矿投影在内矽卡岩与外矽卡岩范围之间, 这也表明磁铁矿属于热液成因的磁铁矿类。

列廷冈铁矿床的磁铁矿为热液成因还得到其他证据的支持。在宏观上, 磁铁矿体切穿围岩层理, 具有后生特征。矿体围岩蚀变十分发育。据矿相学观察可知, 磁铁矿的沉淀发生在矽卡岩阶段之后的退化

蚀变阶段, 可见磁铁矿交代和包裹早期石榴子石; 磁铁矿沉淀后, 被晚期阶段的热液硫化物及更晚期的低温热液矿物方解石-绿泥石所交代或胶结, 表明磁铁矿是从热液流体中沉淀出来的。

## 5.2 成矿物理化学条件

Eu 属于变价元素, 有  $\text{Eu}^{2+}$  和  $\text{Eu}^{3+}$  两种价态, 通常呈  $\text{Eu}^{3+}$  出现。前人研究表明, 长石斑晶与流体交换反应以及矿物或岩石对  $\text{Eu}^{2+}$  的吸附作用、吸附与络合的复合作用等多种因素都可以造成 Eu 正异常 (Bau, 1991; Klinkhammer *et al.*, 1994; Hass *et al.*, 1995; 杨富全等, 2007), 但共同点都是将 Eu 主要以二价离子出现作为前提。根据对  $\text{Eu}^{2+} - \text{Eu}^{3+}$  在氧化-还原平衡时的流体氧逸度与温度、压力、pH 值关系的研究, 流体氧逸度随着温度升高而快速增大, 随着 pH 值的变化而略有增加, 随着压力的增大而略有降低, 指示较高温度是  $\text{Eu}^{2+}$  在流体中以主要形式出现的重要条件, 即温度是影响流体是否发育 Eu 正异常的重要因素 (丁振举等, 2003; 赵劲松等, 2007)。Eu 异常的大小可以反映氧化还原程度的强弱, Eu 峰值越高, 表明氧化程度越强; 相反, Eu 异常谷值越深, 表明还原程度越强 (赵劲松等, 2007)。列廷冈铁多金属矿床矽卡岩期的块状磁铁矿石均表现为 Eu 正异常, 热液期的浸染状磁铁矿和脉状磁铁矿均表现为 Eu 负异常, 暗示矽卡岩阶段为温度较高的岩浆流体, 而到了热液期, 流体温度降低, 这与流体包裹体测温结果 (主成矿期矽卡岩期平均温度为  $316^\circ\text{C}$ , 成矿后阶段平均温度为  $196^\circ\text{C}$ ) (杨毅, 2015) 相吻合。Ce 异常和 Eu 异常也可以反映成岩成矿的氧逸度 (肖成东等, 2002)。Ce 同样

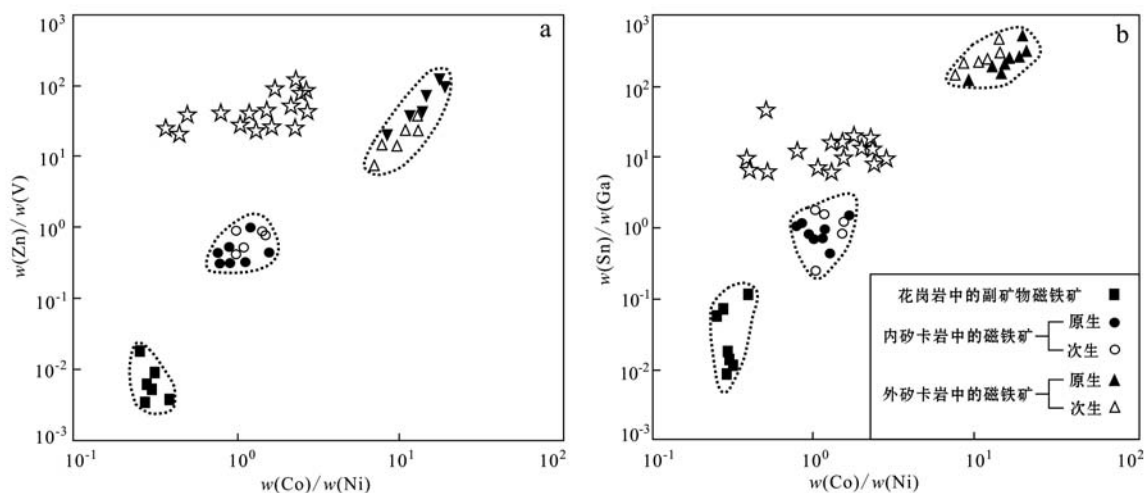


图 10 列廷冈铁矿床磁铁矿的  $\text{Zn}/\text{V}-\text{Co}/\text{Ni}$  (a) 和  $\text{Sn}/\text{Ga}-\text{Co}/\text{Ni}$  (b) 关系图(部分数据引自胡浩等, 2014)

Fig. 10  $\text{Zn}/\text{V}$  versus  $\text{Co}/\text{Ni}$  (a) and  $\text{Sn}/\text{Ga}$  versus  $\text{Co}/\text{Ni}$  (b) diagrams of different types of magnetite from the Lietinggang iron deposit (part of data after Hu Hao *et al.*, 2014)

属于变价元素, 分别是  $\text{Ce}^{3+}$  和  $\text{Ce}^{4+}$  两种价态。通常在氧化条件下,  $\text{Ce}^{3+}$  被氧化成  $\text{Ce}^{4+}$ , 而  $\text{Ce}^{4+}$  很难被溶解, 因此沉积物中呈现 Ce 正异常或无明显的负异常; 当处于次氧化或缺氧环境时, Ce 被活化并以  $\text{Ce}^{3+}$  形式释放到水体中, 导致沉积物中呈现 Ce 负异常 (Debaar *et al.*, 1985; 杨兴莲等, 2008; 张志欣等, 2011)。列廷冈铁多金属矿床矽卡岩期磁铁矿石均具有 Eu 正异常及无明显的 Ce 异常, 但热液期磁铁矿具有 Eu 负异常, 无明显 Ce 异常。故富 Eu 成矿流体在矽卡岩期的高温氧化环境下形成了矽卡岩型块状磁铁矿体; 而在热液期, 富 Eu 成矿流体在低温还原环境下形成了脉状和浸染状磁铁矿体及黄铜矿、辉钼矿、磁黄铁矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿等多种金属硫化物。

### 5.3 成矿物质来源

稀土元素属于不活泼元素, 地球化学性质具有相似性, 在矿化作用过程中类似于同位素的示踪性质, 研究矿石矿物及不同岩石中的稀土元素组成特征和配分形式, 成为解决成矿物质来源、成矿条件和成矿流体的有效手段之一 (Henderson, 1984; Frietsch *et al.*, 1995; 杨耀民等, 2004; 李厚民等, 2009)。Y 和  $\text{Ho}$  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 和 Greves (1989) 认为球粒陨石的  $\text{Y}/\text{Ho}$  值为 28, 岩浆岩、硅酸盐及碎屑沉积岩与球粒陨石的差别不大 (Bau and Dulski, 1995), 但在水溶液体系中其化学行为却发生分异。列廷冈铁多金属矿床矽卡岩期磁铁矿石和热液期磁铁

矿石的  $\text{Y}/\text{Ho}$  比值在 14~37 范围内变化, 平均值为 30.7, 比较接近岩浆岩的  $\text{Y}/\text{Ho}$  值, 暗示磁铁矿富集可能与岩浆的热液有关。前文已述花岗闪长岩和花岗斑岩与成矿关系密切。同样, 在  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}-(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$  图解 (图 11a) 中, 样品基本呈直线分布, 表现出一定的正相关性, 暗示花岗闪长岩、花岗斑岩和磁铁矿石存在明显的成因关系。而在  $\Sigma(\text{La}-\text{Nd})-\Sigma(\text{Sm}-\text{Ho})-\Sigma(\text{Er}-\text{Lu})$  图解 (图 11b) 中, 所有样品具有相关性和成因联系, 也暗示磁铁矿石的形成与花岗闪长岩及花岗斑岩这两种酸性岩浆岩有关, 推测矿区铁的成矿物质来源于花岗闪长岩及花岗斑岩岩浆的流体。

## 6 结论

(1) 列廷冈铁多金属矿床磁铁矿主要包括块状、脉状和浸染状磁铁矿 3 种类型, 其中, 块状磁铁矿主要形成于矽卡岩期的退化蚀变阶段, 脉状和浸染状磁铁矿主要形成于热液期的早期热液阶段, 并常交代早期矽卡岩矿物 (如石榴子石等)。3 种不同类型磁铁矿内均含有 Ti、Si、Ca 等次要元素以及 Na、K、V、Cr、Ni、Co 等多种可检测到的微量元素, 且主要发生了 Al、Mg、Mn 的类质同像置换。

(2) 磁铁矿微量稀土元素地球化学特征并结合  $\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}$ 、 $\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-(\text{MgO}+\text{MnO})$  和  $(\text{Ca}+\text{Al}+\text{Mn})-(\text{Ti}+\text{V})$ 、 $\text{Ni}/(\text{Cr}+\text{Mn})-(\text{Ti}+\text{V})$  磁铁矿成因判别图解综合表明, 本文磁铁矿均属于热液成因磁铁矿类。

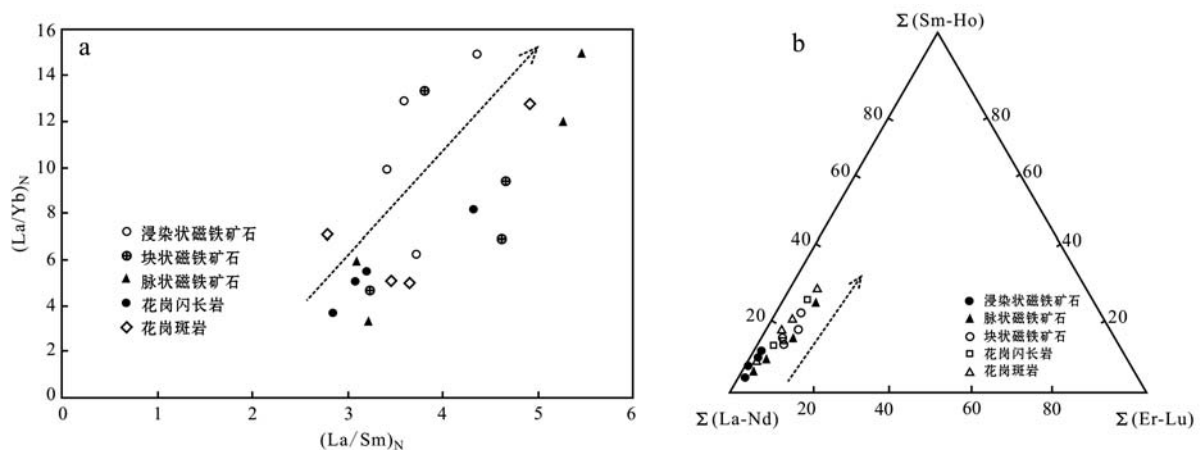


图 11 列廷冈铁矿床花岗闪长岩、花岗斑岩、磁铁矿石  $(La/Yb)_N$ - $(La/Sm)_N$ (a) 及  $\Sigma(La-Nd)$ - $\Sigma(Sm-Ho)$ - $\Sigma(Er-Lu)$  图解(b)(花岗闪长岩和花岗斑岩稀土数据引自杨毅等, 2015)

Fig. 11  $(La/Yb)_N$ - $(La/Sm)_N$ (a) and  $\Sigma(La-Nd)$ - $\Sigma(Sm-Ho)$ - $\Sigma(Er-Lu)$ (b) diagrams of the Lietinggang iron deposit (rare earth data of the granodiorite and granite after Yang Yi *et al.*, 2015)

(3) 富 Eu 成矿流体在矽卡岩期的高温氧化环境下形成了矽卡岩型块状磁铁矿, 在热液期则逐渐转变为低温还原环境, 形成脉状和浸染状磁铁矿及黄铜矿、辉钼矿、磁黄铁矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿等多种金属硫化物。花岗闪长岩和花岗斑岩与成矿关系最密切, 且主要的铁来源于这两种岩浆岩体的流体成分。

**致谢** 野外工作中得到了拉萨普信矿业及西藏地质调查院的大力支持, 电子探针实验过程中得到了长安大学刘民武老师及许丽丽老师的热心帮助, 审稿过程中得到了匿名审稿人对本文提出宝贵修改意见。在此一并表示衷心感谢!

## References

- Anders E and Greves N. 1989. Abundances of the elements: Meteoritic and solar[J]. *Geochemica et Cosmochemica Acta*, 53: 197~214.
- Bau M. 1991. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and significance of the oxidation state of europium[J]. *Chemical Geology*, 93: 219~230.
- Bau M and Dulski P. 1995. Comparative study of Yttrium and rare earth element behaviors in fluorine-rich hydrothermal fluids[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 119: 213~223.
- Chen Guangyuan, Sun Daisheng and Yin Huian. 1987. Mineralogy and Prospecting Mineralogy[M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1~874(in Chinese with English abstract).
- Cheng Shunbo, Pang Yingchun and Cao Liang. 2008. Genesis of Mengya's skarn-type lead-zinc deposit, Tibet[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 3: 50~57(in Chinese with English abstract).
- Dare S A S, Barnes S J, Beaudoin G and Meric J. 2012. Are the "magnetite lava flows" of El Laco(Chile) magmatic? Comparison of trace elements in magnetite with other magmatic Fe-oxide deposits[A]. *Mineralogical Magazine, Goldschmidt 2012 Conference Abstracts*[C]. 1 620.
- Debaar H J W, Bacon M P and Brewer P G. 1985. Rare earth elements in the pacific and Atlantic oceans[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49: 1 943~1 956.
- Deer W A, Howie R A and Zussman J. 1992. An Introduction to Rock-forming Minerals[M]. New York: Longman, Harlow, Wiley, 1~696.
- Ding Zhenju, Yao Shuzhen, Liu Congqiang, *et al.* 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).
- Du Xin, Yan Changhai, Chen Junkui, *et al.* 2010. Geological feature of the Yagula Pb-Zn-polymetallic deposit in Tibet[J]. *Geological Survey and Research*, 33(4): 257~266(in Chinese with English abstract).
- Duan Chao, Li Yanhe, Yuan Shunda, *et al.* 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).
- Dupuis C and Beaudoin G. 2011. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types[J]. *Mineralium Deposits*, Doi: 10.1007/s 00126~011~0334~y.
- Fu Qiang, Yang Zhusen, Zheng Yuanchuan, *et al.* 2014. Ar-Ar age of phl-

- ogopite from the Longmala copper-iron-lead-zinc deposit in Tibet and its geodynamic significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(2): 283~293(in Chinese with English abstract).
- Fei Guangchun, Duo Ji, Wen Chunqi, *et al.* 2011. S, Pb and Sr isotopic compositions for tracing sources of ore-forming materials in Dongzhongla lead-zinc deposit in Tibet[J]. *Mineral Petrology*, 31(4): 52~57(in Chinese with English abstract).
- Frietsch D R and Perdahl J A. 1995. Rare earth elements in apatite and magnetite in Kiruna-type iron ores and some other iron ore types[J]. *Ore Geology Reviews*, 9(6): 489~510.
- Gao Yiming, Chen Yuchuan, Tang Juxing, *et al.* 2011. Re-Os dating of molybdenite from the Yagula porphyry molybdenum deposit in Gongbo'gyamda, Tibet, and its geological significance[J]. *Geological Bulletin Of China*, 30(7): 1 027~1 036(in Chinese with English abstract).
- Hass J R, Shock E L and 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]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59(21): 4 329~4 350.
- Henderson P. 1984. *Rare Earth Element Geochemistry*[M]. New York: Elsevier Science Publishers B V., 10.
- Hong Wei, Zhang Zuoheng, Zhao Jun, *et al.* 2014. Mineralogy of the Changnuoer iron deposit in western Tianshan mountains, Xinjiang, and its geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(2): 191~211(in Chinese with English abstract).
- Hou Lin, Ding Jun, Deng Jun, *et al.* 2013. Geochemical characteristic of magnetites from the Yinachang Fe-Cu-Au-REE deposit of Wuding area, central Yunnan province, and their metallogenic significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(2): 154~166(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Gao Yongfeng, Meng Xiangjin, *et al.* 2004. The miocene porphyry copper belt of Gangdise, Tibet: causes adakitic porphyry and tectonic controll[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 239~248(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Pan Guitang, Wang Anjian, *et al.* 2006b. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: III. mineralisation in late~collisional formation setting[J]. *Mineral Deposits*, 25(5): 521~543(in Chinese).
- Hu Hao, Duan Zhuang, Luo Yan, *et al.* 2014. Trace element systematic of magnetite from the Chengchao iron deposit in the Daye district: A laser ablation ICP-MS study and insights into ore genesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(5): 1 292~1 306(in Chinese with English abstract).
- Klinkhammer G P, Elderfield J M, *et al.* 1994. Geochemical implications of rare element patterns in hydrothermal fluid from mid-ocean ridges[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58(23): 5 105.
- Li Houmin, Wang Denghong, Zhang Changqing, *et al.* 2009. Characteristics of trace and rare earth elements in minerals from some typical lead-zinc deposits of Shanxi province[J]. *Mineral Deposits*, 28(4): 434~448(in Chinese with English abstract).
- Lin Shizheng. 1982. A Contribution to the chemistry, origin and evolution of magnetite[J]. *Mineral Petrol.*, 3: 166~174(in Chinese).
- Lindsley D H. 1976. The Crystal chemistry and structure of oxide minerals as exemplified by the Fe-Ti oxide[A]. Ruble I D. *Oxide Minerals*[C]. Reviews in Mineralogy, Mineralogical Society of America, 1~60.
- Nadoll P. 2009. Geochemistry of magnetite from hydrothermal ore deposits and host rocks: case studies from the proterozoic belt supergroup, Cu+Mo porphyry + skarn and climax-Mo deposits in the western United States[D]. PhD. Dissertation. University of Aukland, 1~238.
- Pan Guitang, Mo Xuanxue, Hou Zengqian, *et al.* 2006. Spatial-temporal framework of the Gangdese orogenic Belt and its evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 521~533(in Chinese with English abstract).
- Pan Zhaolu. 1984. *Crystallography and Mineralogy*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~274(in Chinese with English abstract).
- Singoyi B, Danyushevsky L, Davidson G J, *et al.* 2006. Determination of trace elements in magnetites from hydrothermal deposits using the LA-ICP-MS Technique[J]. Denver, USA: SEG Keystone Conference, CD~ROM.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basin*[C]. Geological Society(London)Special Publication, 42: 313~345.
- Shiga Y. 1988. Silician magnetite from the Kamaishi mine[J]. *Mining Geology*, 38(211): 437~440(in Chinese).
- Shimazaki H. 1998. On the occurrence of silician magnetites[J]. *Resource Geology*, 48(1): 23~29(in Chinese).
- Tang Juxing, Li Fengji, Li Zhijun, *et al.* 2010. Time limit for formation of main geological bodies in Xiongcuo copper-gold deposit, Xietongmen County, Tibet: evidence from zircon U-Pb ages and Re-Os age of molybdenite[J]. *Mineral Deposits*, 29(3): 461~475(in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Wang Liqiang, Zheng Wenbao, *et al.* 2014. Ore Deposits metallogenic regularity and prospecting in the eastern section of the Gangdese metallogenic belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 12: 2 545~2 555(in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Zheng Wenbao, Chen Yuchuan, *et al.* 2013. Prospecting breakthrough of the deep porphyry ore body and its significance in Jiamia copper polymetallic deposit, Tibet, China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(4): 1 100~1 110(in Chinese with English abstract).
- Wang Kuiren. 1989. *Earth and the Universe Minerageny*[M]. Hefei: An-

- hui Education Publishing, 1~544(in Chinese with English abstract).
- Wang Liqiang, Tang Juxing, Deng Jun, *et al.* 2015. The Longmala and Mengya's skarn Pb-Zn deposits, Gangdese region, Tibet: evidence from U-Pb and Re-Os geochronology for formation during early India-Asia collision[J]. *International Geology Review*, 57(14): 1 825~1 842(in Chinese with English abstract).
- Wang Liqiang, Tang Juxing, Zheng Wenbao, *et al.* 2014. Study on metallogeny of main molybdenum Polymetallic deposits in the eastern section of the Gangdese metallogenic belt[J]. *Geological Review*, 60(2): 363~379(in Chinese with English abstract).
- Xiao Chengdong and Liu Xuewu. 2002. REE geochemistry and origin of skarn garnets from eastern inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 29(3): 311~316(in Chinese with English abstract).
- Xu Guofeng and Shao Jielian. 1979. The Typomorphic characteristics of magnetite and its practical significance[J]. *Geology and Exploration*, 3: 30~37(in Chinese with English abstract).
- Yang Yi. 2015. The Study on Geological Characteristics of Lietinggang Iron Polymetallic Deposit, Tibet and Metallogenic Regularity of Typical Deposit in the North Gangdese Metallogenic Belt[D]. Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Yang Yi, Duo Ji, Liu Hongfei, *et al.* 2014. Re-Os dating of molybdenite from the Lietinggang iron polymetallic deposit of Tibet and its geological significance[J]. *Geology in China*, 41(5): 1 554~1 564(in Chinese with English abstract).
- Yang Yi, Duo Ji, De Xiyangzong, *et al.* 2015. Zircon U-Pb dating and Hf isotope composition of intrusions in the Lietinggang iron polymetallic deposit in Tibet and their geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(3): 1~13(in Chinese with English abstract).
- Yang Fuquan, Mao Jingwen, Xu Lingang, *et al.* 2007. REE geochemistry of the Mengku iron deposit, Xinjiang, and its indication for iron mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2 443~2 456(in Chinese with English abstract).
- Yang Yaomin, Tu Guangchi and Hu Ruizhong. 2004. REE geochemistry of Yingchang Fe-Cu-REE deposit in Yunnan province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 24(3): 301~308(in Chinese with English abstract).
- Yang Xinglian, Zhu Maoyan, Zhao Yuanlong, *et al.* 2008. REE geochemical characteristics of the ediacaran lower cambrian black rock series in eastern Guizhou[J]. *Geological Review*, 54(1): 3~15(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongtao, Chen Renyi and Han Fanglin. 2004. Reunderstanding of metallogenical geological of porphyry copper deposits in China[J]. *Mineral Deposits*, 23(2): 150~163(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhixin, Yang Fuquan, Chai Fengmei, *et al.* 2011. A study of REE geochemistry of Wutubulake iron deposit in Altay, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 30(1): 87~102(in Chinese with English abstract).
- Zhao Jingsong, Qiu Xuelin, Zhao Bin, *et al.* 2007. REE geochemistry of mineralized skarns from Daye to Wushan region, China[J]. *Geochimica*, 36(4): 400~412(in Chinese with English abstract).
- Zhao Junxing, Qin Kezhang, LI Guangming, *et al.* 2015. The exhumation history of collision-related mineralizing systems in Tibet: insights from thermal studies of the Sharang and Yaguila deposits, Central Lhasa[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 1 043~1 061.
- Zheng Youye, Duo Ji, Wang Ruijiang, *et al.* 2007. New advances in the study of the gigantic Gangdise porphyry copper metallogenic zone, Tibet[J]. *Geology in China*, 34(2): 324~334(in Chinese with English abstract).
- Zheng Youye, Sun Xiang, Gao Shunbao, *et al.* 2015. Metallogenesis and the minerogenetic series in the Gangdese polymetallic copper Belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 103(2015): 23~39.
- Zhong Kanghui, Yao Dan, Duo Ji, *et al.* 2013. Structural features of Yeba tectonic group in Jiamal Gyama-Qulong area of Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(1): 75~86(in Chinese with English abstract).
- Zhou M F, Chen W T, Wang C Y, *et al.* 2013. Two stages of immiscible liquid separation in the formation of Panzhihuatype Fe-Ti-V oxide deposits, SW China[J]. *Geoscience Frontiers*, 4(5): 481~502.
- Zhu Dicheng, Mo Xuanxue, Pan Guitang, *et al.* 2008. Petrogenesis of the early cretaceous mafic rocks from the cona area of the eastern Tethyan Himalaya in south Tibet: interaction between the incubating Kerguelen plume and the eastern greater india lithosphere? [J]. *Lithos.*, 100(1~4): 147~173.
- Zhu Dicheng, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, *et al.* 2009. Permian and early cretaceous tectonomagmatism in Southern Tibet and Tethyan evolution: new perspective[J]. *Earth Science Frontiers*, 16(2): 1~15.
- Zhu Dicheng, Pan Guitang, Mo Xuanxue, *et al.* 2007. Petrogenesis of volcanic rocks in the Sangxiu formation, central segment of Tethyan Himalaya: A probable example of plume-lithosphere interaction[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29(2~3): 320~335.

## 附中文参考文献

- 程顺波, 庞迎春, 曹 亮. 2008. 西藏蒙亚啊砂卡岩铅锌矿床的成因探讨[J]. *华南地质与矿产*, 3: 50~57.
- 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, 1~874.
- 丁振举, 姚书振, 刘丛强, 等. 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]. *地球科学进展*, 19(4): 792~798.

- 杜 欣, 燕长海, 陈俊魁, 等. 2010. 西藏亚贵拉铅锌多金属矿床的地质特征[J]. 地质调查与研究, 33(4): 257~266.
- 段 超, 李延河, 袁顺达, 等. 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.
- 费光春, 多 吉, 温春齐, 等. 2011. 西藏洞中拉铅锌矿床 S、Pb、Sr 同位素组成对成矿物质来源的示踪[J]. 矿物岩石, 31(4): 52~57.
- 付 强, 杨竹森, 郑远川, 等. 2014. 西藏龙玛拉 Cu-Fe-Pb-Zn 多金属矿床金云母 Ar-Ar 定年及其地球动力学意义[J]. 岩石矿物学杂志, 33(2): 283~293.
- 高一鸣, 陈毓川, 唐菊兴, 等. 2011. 西藏工布江达地区亚贵拉铅锌钼矿床辉钼矿 Re-Os 测年及其地质意义[J]. 地质通报, 30(7): 1 027~1 036.
- 洪 为, 张作衡, 赵 军, 等. 2012. 新疆西天山查岗诺尔铁矿床矿物学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 31(2): 191~211.
- 侯 林, 丁 俊, 邓 军, 等. 2013. 滇中武定迤纳厂铁铜矿床磁铁矿元素地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 32(2): 154~166.
- 侯增谦, 高永丰, 孟祥金, 等. 2004. 西藏冈底斯中新世斑岩铜矿带: 埃达克质斑岩成因与构造控制[J]. 岩石学报, 20(2): 239~248.
- 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 等. 2006b. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用[J]. 矿床地质, 25(5): 521~543.
- 胡 浩, 段 壮, Luo Yan, 等. 2014. 鄂东程潮铁矿床磁铁矿的微量元素组成及其矿床成因意义[J]. 岩石学报, 30(5): 1 292~1 306.
- 李厚民, 王登红, 张长青, 等. 2009. 陕西几类重要铅锌矿床的矿物微量元素和稀土元素特征[J]. 矿床地质, 28(4): 434~448.
- 林师整. 1982. 磁铁矿矿物化学、成因及演化的探讨[J]. 矿物学报, 03: 166~174.
- 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 等. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. 岩石学报, 22(3): 521~533.
- 潘兆橧. 1984. 结晶学与矿物学(下册)[M]. 北京: 地质出版社, 1~274.
- 唐菊兴, 黎凤喆, 李志军, 等. 2010. 西藏谢通门县雄村铜金矿主要地质体形成的时限: 锆石 U-Pb、辉钼矿 Re-Os 年龄的证据[J]. 矿床地质, 29(3): 461~475.
- 唐菊兴, 王立强, 郑文宝, 等. 2014. 冈底斯成矿带东段矿床成矿规律及找矿预测[J]. 地质学报, 12: 2 545~2 555.
- 唐菊兴, 郑文宝, 陈毓川, 等. 2013. 西藏甲玛铜多金属矿床深部斑岩矿体找矿突破及其意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 43(4): 1 100~1 111.
- 王立强, 唐菊兴, 郑文宝, 等. 2014. 西藏冈底斯成矿带东段主要钼多金属矿床成矿规律研究[J]. 地质论评, 60(2): 363~379.
- 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.
- 肖成东, 刘学武. 2002. 东蒙地区矽卡岩石榴石稀土元素地球化学及其成因[J]. 中国地质, 29(3): 311~316.
- 徐国风, 邵洁涟. 1979. 磁铁矿的标型特征及其实际意义[J]. 地质与勘探, 3: 30~37.
- 杨 毅. 2015. 西藏列廷冈铁多金属矿床地质特征及冈底斯北缘成矿规律研究[D]. 成都理工大学.
- 杨 毅, 多 吉, 德西央宗, 等. 2015. 西藏列廷冈铁多金属矿侵入岩锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素组成及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 34(3): 1~13.
- 杨 毅, 多 吉, 刘鸿飞, 等. 2014. 西藏列廷冈铁多金属矿床辉钼矿 Re-Os 定年及其地质意义[J]. 中国地质, 41(5): 1 554~1 564.
- 杨富全, 毛景文, 徐林刚, 等. 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): 2 443~2 456.
- 杨兴莲, 朱茂炎, 赵元龙, 等. 2008. 黔东南震旦系一下寒武统黑色岩系稀土元素地球化学特征[J]. 地质论评, 54(1): 3~15.
- 杨耀民, 涂光炽, 胡瑞忠. 2004. 迤纳厂稀土铁铜矿床稀土元素地球化学[J]. 矿物学报, 24(3): 301~308.
- 张洪涛, 陈仁义, 韩芳林. 2004. 重新认识中国斑岩铜矿的成矿地质条件[J]. 矿床地质, 23(2): 150~163.
- 张志欣, 杨富全, 柴凤梅, 等. 2011. 心境阿尔泰乌吐布拉克铁矿床稀土元素地球化学研究[J]. 矿床地质, 30(1): 87~102.
- 赵劲松, 邱学林, 赵 斌, 等. 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.
- 郑有业, 多 吉, 王瑞江, 等. 2007. 西藏冈底斯巨型斑岩铜矿带勘查研究最新进展[J]. 中国地质, 34(2): 324~334.
- 钟康惠, 姚 丹, 多 吉, 等. 2013. 西藏甲玛-驱龙地区叶巴岩组构造学特征[J]. 地球学报, 34(1): 75~86.