

滇中武定迤纳厂铁铜矿床磁铁矿元素地球化学特征及其成矿意义

侯林^{1,2}, 丁俊², 邓军¹, 彭惠娟³

(1. 地质过程与国家资源重点实验室, 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083;
2. 成都地质矿产研究所, 四川 成都 610081; 3. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要: 武定迤纳厂矿床位于我国云南省中部, 在大地上处于扬子板块西缘, 康滇地轴云南段, 是滇中具有代表性的元古代铁-铜-金-稀土矿床。其矿化作用分为岩浆气液期、交代成矿期、热液成矿期和成矿后热液期 4 个期次, 其中前 3 个期次是铁成矿的主要期次, 分别以角砾状磁铁矿、浸染状磁铁矿和粗粒脉状磁铁矿为代表。各类磁铁矿含有一定量的 SiO₂、Cr₂O₃、Al₂O₃、MgO 等, 角砾状磁铁矿的主元素成分与铁成分比值最高, 其次为浸染状磁铁矿, 最低为脉状磁铁矿。不同类型的磁铁矿微量元素变化很大, 浸染状磁铁矿稀土配分具四重效应, 角砾状磁铁矿和粗粒脉状磁铁矿稀土配分为右倾型。成矿早期磁铁矿的形成受岩浆作用影响强烈, 含铁的岩浆导致围岩碎裂, 形成了早期角砾状矿石, 交代成矿期的铁质主要源于岩浆演化晚期分异形成的富铁流体, 富铁流体与围岩发生强烈的物质交换, 导致大量铁质沉淀。随着矿化作用的进行, 热液作用逐渐增强, 加之外界流体的逐渐加入, 对之前形成的磁铁矿进行改造, 使其具有热液成因的表象特征。从矿物成分体现出的矿床成因上看, 该矿床属于岩浆隐爆-交代型成因, 与世界知名的 IOCG 型矿床有相似之处。

关键词: 磁铁矿; 电子探针; ICP-MS; 迤纳厂铁-铜-金-稀土矿床; 滇中; IOCG

中图分类号: P578.4⁺6; P575.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)02-0154-13

Geochemical characteristics of magnetites from the Yinachang Fe-Cu-Au-REE deposit of Wuding area, central Yunnan Province, and their metallogenic significance

HOU Lin^{1,2}, DING Jun², DENG Jun¹ and PENG Hui-juan³

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, China; 3. Chinese Academy of Geological Sciences, Institute of Mineral Resources, Beijing 100037, China)

Abstract: The Yinachang deposit is located in central Yunnan Province and geotectonically lies along the southern Kangdian axis and on the southwest margin of the Yangtze block. It is a typical Proterozoic Fe-Cu-Au-REE deposit in this area. The ore-forming process can be divided into four stages: magma stage, metasomatism-mineralization stage, hydrothermal ore-forming stage and post-mineralization stage, among which the first 3 stages constituted the dominant period for the precipitation of Fe, represented respectively by breccia magnetite, disseminated magnetite and grained veinlet magnetite. Magnetite of the 3 kinds contains certain amounts of SiO₂, Cr₂O₃, Al₂O₃ and MgO, and the breccia magnetite has the highest ratio between major elements and Fe, fol-

收稿日期: 2012-11-10; 修订日期: 2013-01-14

基金项目: 中国地质调查局地调项目(1212011085162); 云南武定地区铁铜矿远景调查资助项目(1212011120640)

作者简介: 侯林(1985-), 男, 博士研究生, 主要从事区域成矿学方面的研究, E-mail: houlin_aaron@163.com

owed by disseminated magnetite and veinlet magnetite. Magnetites of different types show remarkable differences in trace elements content. The distribution of rare earth elements in disseminated magnetite has lanthanide tetrad effect, while the distribution of the breccia magnetite and the grained veinlet magnetite is right-oblique. The formation of the magnetite at Stage 1 was considerably controlled by magmatic activity, and the upwelling of Fe-hosting magma caused the deformation of wall rock and the precipitation of the breccia magnetite. Fe-bearing fluid was separated from the magma at the metasomatism stage, and went through a composition exchange with the wall rock, which led to the precipitation of large quantities of iron. The addition of outer fluid at the 3rd stage reformed the magnetite, making the magnetite more similar to that of hydrothermal origin. According to the composition of the magnetite, the deposit has a magma-metasomatism mechanism, similar to things of the IOCG deposit.

Key words: magnetite; electron microprobe; ICP-MS; Yinachang Fe-Cu-Au-REE deposit; central Yunnan; IOCG

滇中地区位于我国西南腹地,南北长约 500 km,东西宽近 200 km,面积约 100 000 km²。区内分布有大量的 Fe-Cu ± Au ± REE 矿床(图 1),主要赋存于古元古界和中元古界地层中,这些矿床的发现、开发历史都很悠久,但在矿床成因方面却一直没有完全弄清。20 世纪 60 年代以前,一般认为成矿与基性岩浆热液有关,是热液顺层交代而成(花友仁, 1959);60 年代末到 70 年代初,人们开始注意到矿体,尤其是铜矿分布的层位性,于是提出沉积-变质学说(转引自杨时蕙, 1982);70 年代中期有人在矿体围岩中发现了火山岩,于是又提出火山沉积-变质学说(转引自杨时蕙, 1982);80 年代,通过对磁铁矿内部结构进行研究,认为交代成矿是磁铁矿形成的主要原因(杨时蕙, 1982);90 年代,结合国际成矿理论,杨耀民(2003)、杨耀民等(2004, 2005a, 2005b)将其归结为与海底火山喷发相关的和海底喷气沉积矿床(SEDEX)型矿床。当地学者更根据其矿床名称对成矿模式进行命名,有“大红山式”、“拉拉式”、“东川式”、“稀矿式”、“桃园式”、“烂泥坪式”、“凤山式”等,名称繁多,实际上很多模式在控矿条件、富集规律和成因机理等方面都有相似之处,可能属于同一套成矿系统。侯林等(2013a, 2013b)通过一段时间的总结研究,提出了“滇中 IOCG 成矿系统”的研究新思路,对该地区的成矿模式研究有一定的启发,但对铁铜矿床中铁质的具体来源及其富集和沉淀机制等问题,还有待进一步研究。

武定迤纳厂铁-铜-金-稀土矿床位于滇中地区中部,是该地区元古代铁铜矿的典型代表,成矿过程

具有多阶段的特征,其矿石类型多样,涵盖该地区同类型矿床。目前,对于迤纳厂铁铜矿尚缺乏系统的矿物学研究,已有研究结果也存在争议(杨时蕙, 1982)。随着地质科学研究技术的发展,单矿物的元素地球化学特征在成矿流体、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。磁铁矿作为铁矿床中最主要的矿石矿物,其地球化学成分特征的变化和规律是一个重要的矿床成因指示剂,对磁铁矿进行来源和成因的研究对于滇中同类型矿床成矿模型的完善具有重要的意义(徐国凤等, 1979;林师整, 1982;陈光远等, 1987; Singoyi *et al.*, 2006; Dupuis & Beaudoin, 2011)。本文在详细的野外调查研究和室内鉴定工作的基础上,选择迤纳厂矿床不同阶段不同类型磁铁矿为研究对象,采用电子探针和单矿物 ICP-MS 微量元素分析测试方法,对其成分特征进行研究,探讨其在成矿过程中的演化,反演矿床成矿作用过程,为该矿床成矿模式研究提供资料。

1 矿床地质特征

矿区位于武定县西,直距 17 km,东西长 8 km,南北宽 4 km,面积 32 km²^①。矿区地层主要为早中元古代东川群(过去称为下昆阳群)4 个组的变质碳酸岩、变质碎屑岩建造,其中因民组上部变质碎屑岩和落雪组白云岩地层为主要的赋矿层位(图 1)。外围分布晚中元古代昆阳群(过去称为上昆阳群)、震旦系、寒武系以及侏罗系地层。矿区处于因民-大尖

① 云南省地质局第四地质队, 1979. 云南省武定县迤纳厂铁铜矿区详勘地质报告(第二期)。

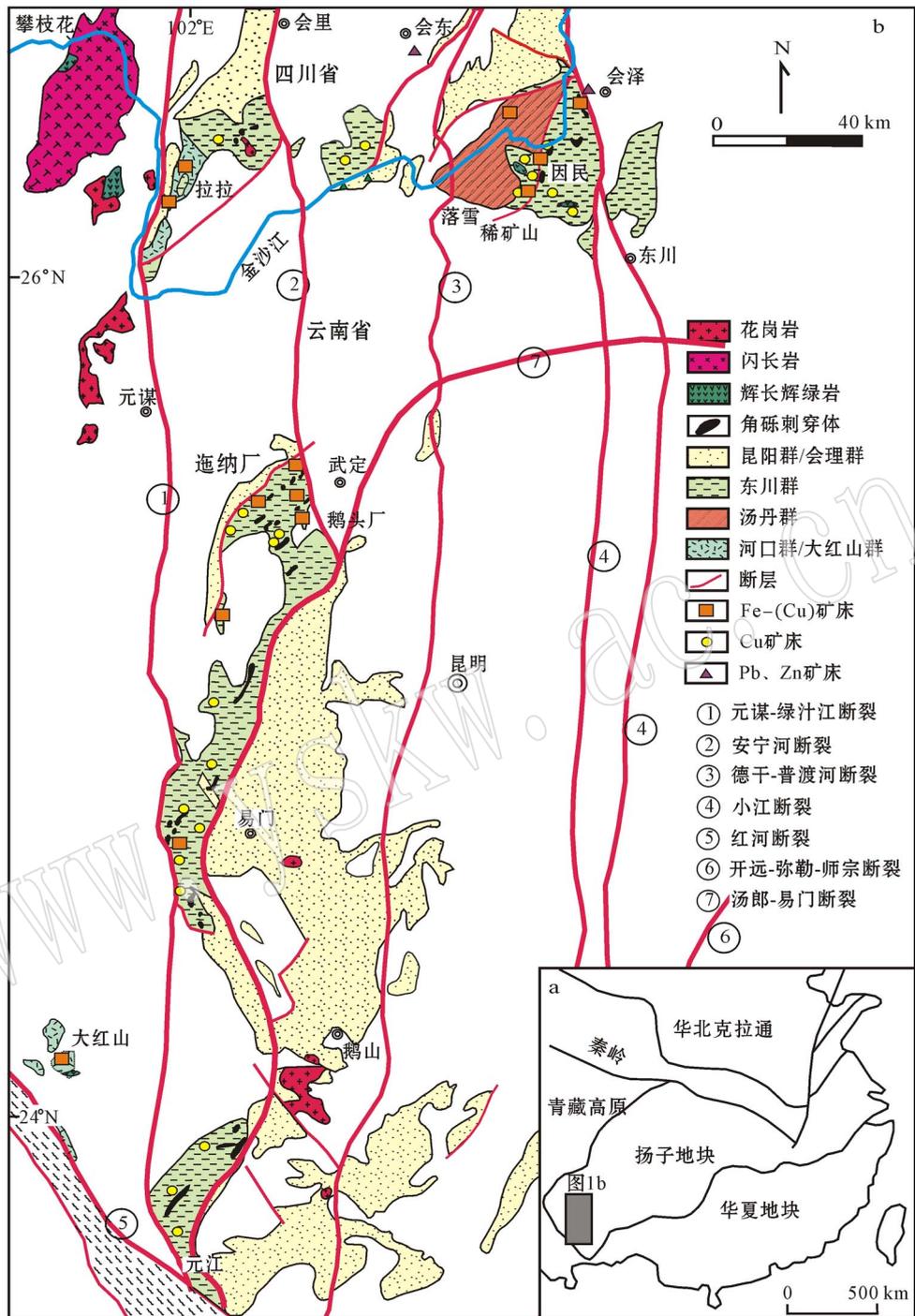


图 1 滇中地质构造矿产图(据侯林等, 2013a)

Fig. 1 Schematic geological-structural map of central Yunnan Province, showing distribution of iron copper deposits (modified after Hou Lin *et al.*, 2013a)

山断裂的派生体-核桃箐逆冲断裂西侧, 断层下盘为向西倾伏的 EW 向复式背斜构造(图 2)。在复式背斜的轴部和断层的交汇部位, 常见有以岩浆质为胶结物的岩浆角砾岩, 其周围往往富集铁铜矿体。区域上岩浆岩分布较为复杂, 但岩体规模均较小, 包括

元古宙中酸性斑岩、基性次火山岩、钠长细晶岩和晋宁期辉长辉绿岩以及少量的燕山期辉绿岩。矿区内围岩蚀变强烈且具有区带性, 矿区外围及周边主要分布以钠化为主的碱性蚀变, 蚀变矿物以钠长石为主(图 3b、4a); 层状矿体周边具有强烈的类似于矽卡

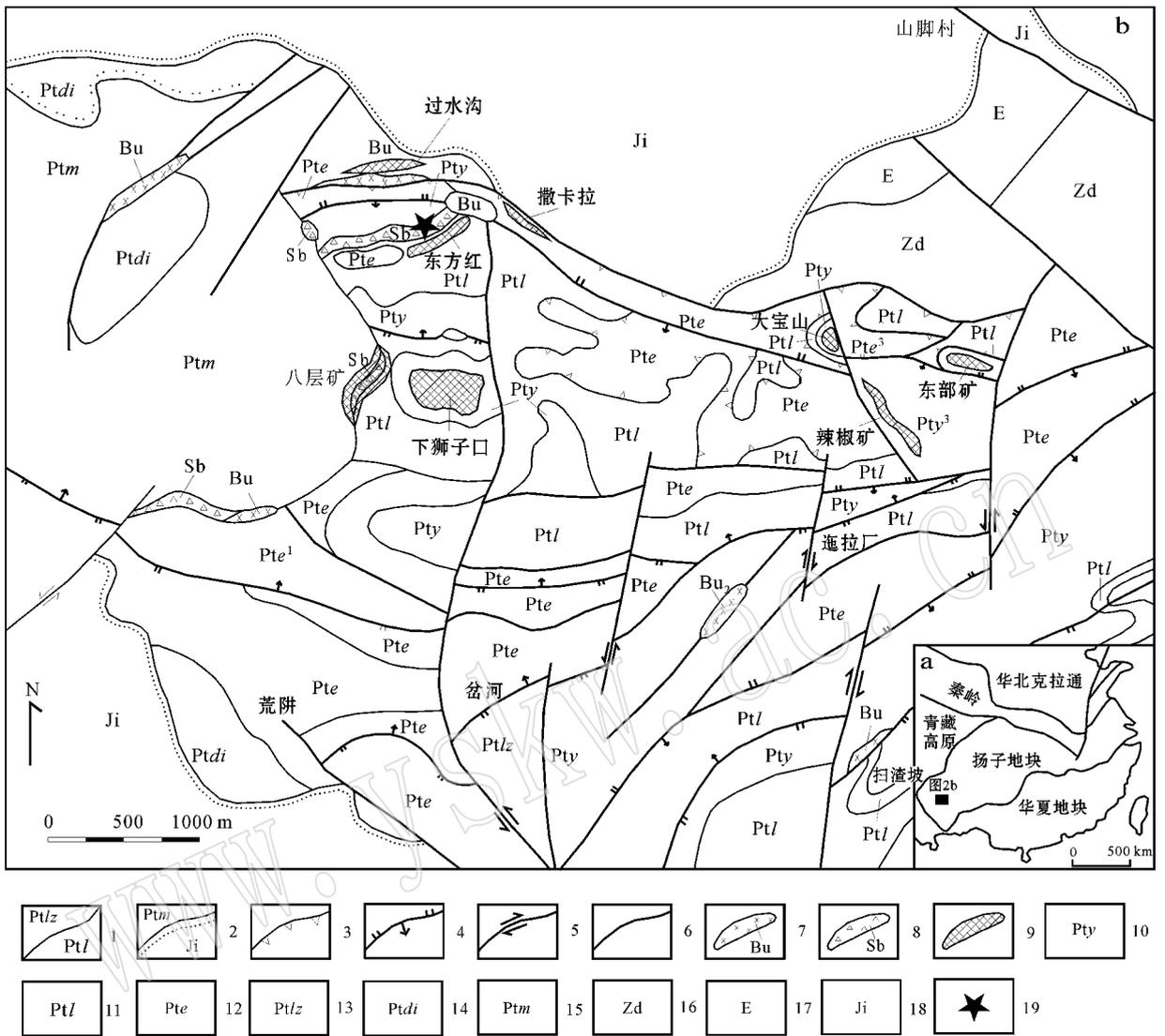


图2 迤纳厂矿区地质图(据云南省地质局第四地质队^①)

Fig.2 Geological map of the Yinachang ore district(modified after No.4 Geological Party of Yunnan Bureau of Geology^①)

1—整合接触界线;2—不整合接触界线;3—推覆构造;4—逆断层;5—走滑断层;6—断层;7—辉绿岩;8—角砾岩;9—矿体;10—中元古代东川群因民组;11—中元古代东川群落雪组;12—中元古代东川群鹤头厂组;13—中元古代东川群绿枝江组;14—中元古代昆阳群大营盘组;15—中元古代昆阳群美党组;16—震旦系;17—寒武系;18—侏罗系;19—采样位置

1—conformity;2—unconformity;3—nappe structure;4—trust fault;5—normal fault;6—fault;7—dolerite;8—braccia;9—ore body;10—Yinmin Formation of Mesoproterozoic Dongchuan Group;11—Luoxue Formation of Mesoproterozoic Dongchuan Group;12—E'touchang Formation of Mesoproterozoic Dongchuan Group;13—Lüzhijiang Formation of Mesoproterozoic Dongchuan Group;14—Dayingpan Formation of Mesoproterozoic Kunyang Group;15—Meidang Formation of Mesoproterozoic Kunyang Group;16—Sinian;17—Cambrian;18—Jurassic;19—sampling site

岩化的交代蚀变,蚀变矿物包括石榴子石和黑云母(图4d、4e);另外在脉状矿体周围分布中低温蚀变,包括绢云母化、绿泥石化和硅化等。

迤纳厂矿区共有8个矿段。其中大宝山、辣椒

矿、东部矿3个矿段分布于东部,称东部矿;东方红、下狮子口、八层矿、过水沟、撒卡拉5个矿段分布于西部,称为西部矿。两个矿带总展布长4.5 km,宽1~1.7 km。矿体均赋存于因民组中上部铁白云石碳

① 云南省地质局第四地质队, 1979. 云南省武定县迤纳厂铁铜矿区详勘地质报告(第二期)。

酸盐岩地层和角砾岩刺穿体中,产出严格受构造和岩性控制,呈角砾状、似层状、透镜状、脉状分布(图 2)。矿体上下盘围岩主要为灰绿色变斑状石榴子石黑云母片岩、石英二云片岩等,与矿体呈渐变过渡的整合接触关系,矿体沿走向和倾向有时出现有膨缩、分支、复合现象。矿区总共有 58 个矿体,一般长 400~700 m,最长>1 000 m,厚 3.93~4.31 m,宽 200 m。平均含铜 0.85%~0.97%,含铁 41.93%~44.53%。稀土元素主要富集在浸染状铁铜矿石中,沿矿体的走向、倾向和垂直方向含量变化不大。金主要以粒间金和裂隙金的形式与脉状铁铜矿石共生,其产出严格受脉状矿石的控制。

矿石的主要构造包括角砾状构造、块状构造、纹层状构造、浸染状构造、条痕状构造、片状定向构造、透镜状角砾构造以及细脉状构造和眼球状构造等;主要的结构包括粒状变晶结构、包嵌结构和交代结构等。矿石的矿物成分复杂,共计 40 多种,大部分产于矿体内,部分产于蚀变带和围岩。主要的矿石矿物有磁铁矿、菱铁矿、赤铁矿、镜铁矿、黄铜矿、黄

铁矿、辉钼矿、辉铜矿等;主要的脉石矿物有石英、萤石、方解石、钠长石、黑云母、铁铝榴石、磷灰石、独居石、氟碳铈矿、绿泥石等。

根据矿石结构构造、矿物组合和产出状态,可将磁铁矿石分为 3 种类型:角砾状磁铁矿石(图 3a、3b)、浸染状磁铁矿石(图 3c、3d)和粗粒脉状磁铁矿石(图 3e、3f)。其中,角砾状磁铁矿石分布于角砾岩内部,其基质为含长英质成分的磁铁矿,捕获的角砾成分复杂,包括以碳酸盐岩、板岩和变砂岩为主的变质沉积岩角砾和以长英质为主的变质岩岩浆岩角砾,角砾也具有磁铁矿化、钠长石化的特征(图 3b、4a);浸染状磁铁矿石以似层状、透镜状分布于白云岩中,磁铁矿呈浸染状发育于因民组顶部和落雪组的白云岩中(图 3c、3d、4b),常表现为磁铁矿层(氧化后为赤铁矿)和黄铜黄铁矿层的交替产出,伴随大量的稀土矿物如磷灰石(图 4c),具有明显的交代特征,在矿体顶底板常见 20 cm 厚的蚀变带,带内见各种热液交代脉石矿物如石榴石、黑云母、萤石、石英等(图 4d、4e),但未见辉石;粗粒脉状磁铁矿石分

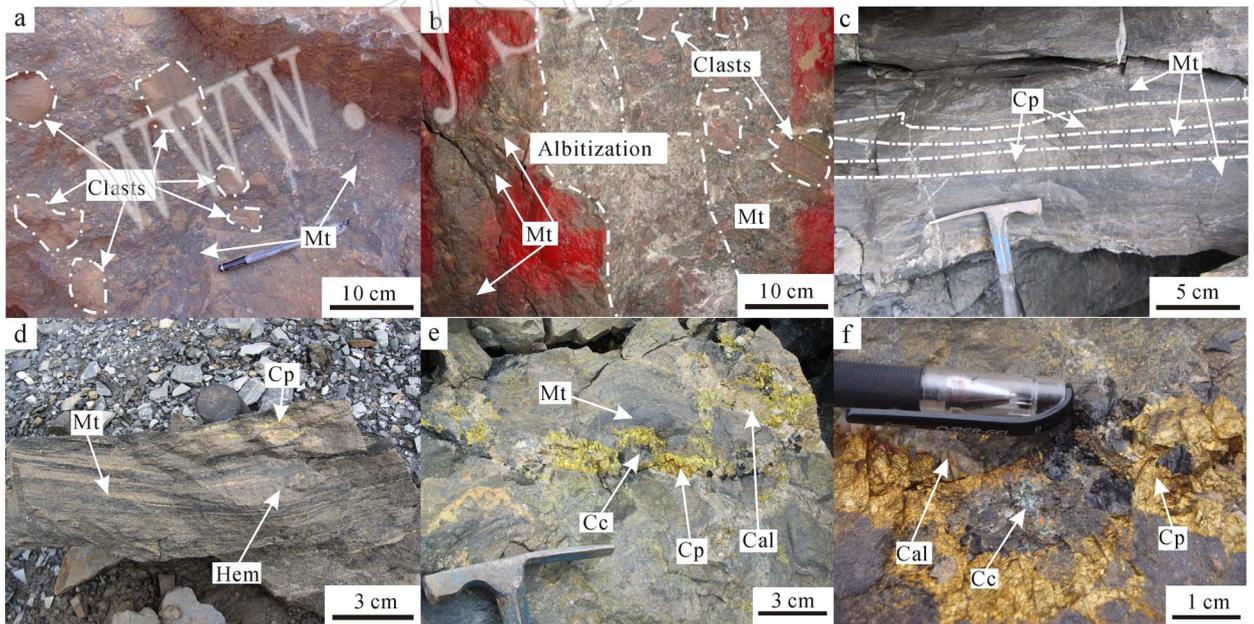


图 3 迤纳厂矿床矿石野外照片

Fig. 3 Field photos of ores from the Yinachang deposit

a—角砾状磁铁矿; b—角砾状磁铁矿周围的强烈钠化; c—顺层展布的浸染状磁铁矿; d—似层状磁铁矿、赤铁矿; e—粗粒脉状磁铁矿脉切穿早期矿石; f—脉状磁铁矿与硫化物共生; Mt—磁铁矿; Cla—角砾; Sp—长石; Cp—黄铜矿; Hem—赤铁矿; Cc—辉钼矿; Cal—方解石

a—breccia magnetite; b—strong albitization around breccia magnetite; c—disseminated magnetite layer; d—layered magnetite and hematite; e—coarse-grained magnetite veinlet cutting through early ore; f—magnetite associated with sulfide; Mt—magnetite; Cla—clast; Sp—feldspar; Cp—chalcocopyrite; Hem—hematite; Cc—chalcocite; Cal—calcite

布于矿化中后期脉体中(图 3e、3f、4f),常切穿早期形成的角砾状磁铁矿石和浸染状磁铁矿石,磁铁矿呈中-粗粒自形发育,与硫化物如黄铜矿、辉铜矿、辉钼矿共生(图 4g、4h),自然金在此类矿石中常见,并以粒间金、裂隙金的形式存在于各种硫化物中(图 4g、4h)。从不同矿石间穿切关系来看,角砾状磁铁矿石形成时间最早,浸染状磁铁矿石形成于中期,粗粒磁铁矿脉穿切角砾状矿石及浸染状矿石(3e、4f)。

2 样品采集与测试方法

在野外地质调查和室内分析的基础上,将迤纳厂铁铜矿床成矿划分为 4 个期次(侯林等, 2013a): 岩浆活动期、交代成矿期、热液成矿期和成矿期后。其中,前 3 个期次、尤其是第 2 期交代成矿期为铁的主成矿期。本文采集了 3 类矿石作为测试对象:角砾状磁铁矿石(DFH3-TY2)、浸染状磁铁矿石(DFH3-TY3)和粗粒脉状磁铁矿石(DFH3-TY4)分别代表岩浆活动期、交代成矿期和热液成矿期。

首先将采集的样品制成光薄片,在显微镜下鉴定后,进行电子探针测试。电子探针成分分析工作

在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室完成,测试仪器为 JEOL-JXA-8230,工作条件为:加速电压 15 kV,电流 20 nA,束斑直径 5 μm 。

从采集的样品中分选磁铁矿单矿物每件 5 g 以上进行等离子质谱实验,实验在武汉地质矿产研究所完成,使用仪器为 Thermo Element II 等离子质谱仪。

3 分析结果

从电子探针分析测试结果(表 1)可知,武定迤纳厂铁铜矿床磁铁矿 FeO 含量为 89.15%~95.10%,其含量相对稳定;除 FeO 之外,各类磁铁矿含有一定量的 SiO_2 (0.00~1.60%)、 Cr_2O_3 (0.00~0.12%)、 Al_2O_3 (0.02%~0.36%)、 MgO (0.00~0.29%),协变图解(图 5)显示,角砾状磁铁矿石的这 4 类元素含量明显高于浸染状磁铁矿石和粗粒脉状磁铁矿石;另外,个别磁铁矿矿石中含有少量的 Na_2O (0.00~0.12%)、 TiO_2 (0.00~0.18%)、 P_2O_5 (0.00~0.06%)、 MnO (0.00~0.04%)、 V_2O_3 (0.00~0.07%),随着成矿过程的进行,这些元素表现出

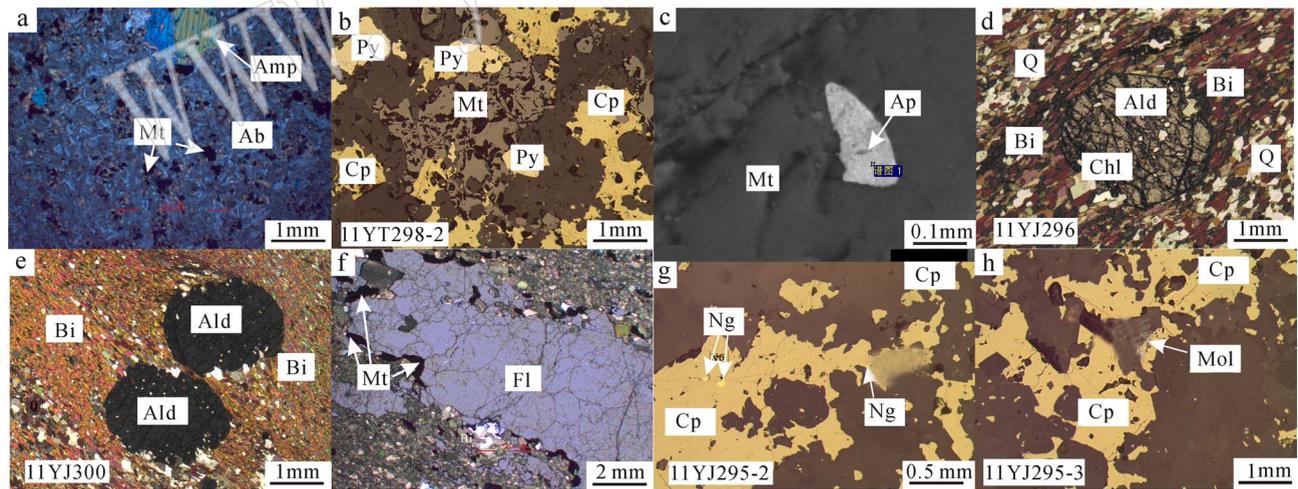


图 4 迤纳厂矿床矿石显微照片

Fig. 4 Photos of ores from the Yinachang deposit

a—角砾状磁铁矿石伴随强烈的钠化; b—浸染状磁铁矿石被后期硫化物脉穿切; c—磁铁矿内部的磷灰石; d、e—与浸染状磁铁矿伴生的黑云母与石榴子石,注意其具有定向性,说明受后期改造强烈; f—粗粒磁铁矿化萤石脉; g、h—粗粒脉状磁铁矿与各种硫化物伴生; Mt—磁铁矿; Ab—钠长石; Amp—角闪石; Py—黄铁矿; Cp—黄铜矿; Ap—磷灰石; Ald—石榴子石; Q—石英; Bi—黑云母; Fl—萤石; Mol—辉钼矿

a—breccia magnetite ores accompanied by strong albitization; b—disseminated magnetite ores cut by latered sulfide veins; c—apatite in magnetite; d, e—biotite and garnet in company with magnetite, note that the orientation indicates late-stage strong reformation; f—fine-grained magnetite in fluorite vein; g, h—fine-grained magnetite accompanied by various sulfides; Mt—magnetite; Ab—albite; Amp—hornblende; Py—pyrite; Cp—chalcopyrite; Ap—apatite; Ald—garnet; Q—quartz; Bi—biotite; Fl—fluorite; Mol—molybdenite

表 1 武定迤纳厂铁铜矿床磁铁矿电子探针成分特征表

 $w_B/\%$

Table 1 PIXE major elements characteristics of magnetite from the Yimachang Fe-Cu deposit, Wuding County

样品号	样品类型	Ne ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	SiO ₂	CaO	FeO	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Cr ₂ O ₃	NiO	V ₂ O ₅	Total
DFH3-Ty2-1		0.00	0.01	0.08	0.00	0.26	0.05	92.10	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	92.51
DFH3-Ty2-2		0.00	0.00	0.13	0.00	0.14	0.00	93.25	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	93.53
DFH3-Ty2-3		0.00	0.04	0.11	0.00	0.13	0.00	92.33	0.11	0.01	0.00	0.04	0.00	0.00	92.76
DFH3-Ty2-4		0.02	0.14	0.22	0.00	0.70	0.00	91.36	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	92.46
DFH3-Ty2-5	角砾状	0.00	0.00	0.05	0.01	0.09	0.00	94.16	0.08	0.00	0.00	0.05	0.01	0.02	94.46
DFH3-Ty2-6	磁铁矿	0.00	0.29	0.18	0.00	1.60	0.00	91.04	0.00	0.06	0.01	0.08	0.04	0.04	93.35
DFH3-Ty2-7		0.01	0.13	0.18	0.00	1.32	0.00	92.19	0.11	0.00	0.03	0.01	0.00	0.02	93.99
DFH3-Ty2-8		0.12	0.20	0.36	0.02	1.19	0.01	89.15	0.08	0.00	0.03	1.15	0.00	0.00	92.31
DFH3-Ty2-9		0.00	0.09	0.19	0.01	0.78	0.00	89.80	0.07	0.00	0.02	0.64	0.00	0.00	91.59
DFH3-Ty2-10		0.00	0.00	0.13	0.01	0.00	0.00	92.30	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	92.45
DFH3-Ty3-1		0.03	0.01	0.13	0.00	0.18	0.00	92.04	0.20	0.03	0.02	0.00	0.00	0.07	92.72
DFH3-Ty3-2		0.04	0.01	0.12	0.00	0.13	0.00	92.72	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	93.05
DFH3-Ty3-3		0.02	0.00	0.06	0.00	0.02	0.00	93.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	93.90
DFH3-Ty3-4		0.00	0.02	0.03	0.02	0.12	0.00	92.25	0.16	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	92.65
DFH3-Ty3-5	浸染状	0.02	0.03	0.09	0.02	0.16	0.00	92.40	0.03	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	92.77
DFH3-Ty3-6	磁铁矿	0.05	0.00	0.11	0.01	0.00	0.00	93.20	0.14	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	93.53
DFH3-Ty3-7		0.03	0.01	0.10	0.00	0.15	0.00	93.17	0.09	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	93.56
DFH3-Ty3-8		0.02	0.00	0.09	0.00	0.04	0.00	93.16	0.18	0.02	0.00	0.00	0.04	0.00	93.55
DFH3-Ty3-9		0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	92.69	0.00	0.00	0.04	0.05	0.00	0.00	92.89
DFH3-Ty3-10		0.04	0.03	0.11	0.00	0.17	0.00	93.26	0.03	0.01	0.03	0.04	0.00	0.01	93.72
DFH3-Ty4-1		0.03	0.03	0.18	0.00	0.15	0.00	93.17	0.06	0.02	0.01	0.01	0.00	0.02	93.67
DFH3-Ty4-2		0.00	0.00	0.13	0.00	0.04	0.00	95.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	95.20
DFH3-Ty4-3		0.00	0.01	0.14	0.00	0.02	0.00	95.10	0.00	0.00	0.01	0.00	0.05	0.06	95.38
DFH3-Ty4-4		0.00	0.00	0.02	0.00	0.10	0.00	93.61	0.00	0.03	0.01	0.03	0.00	0.02	93.80
DFH3-Ty4-5	粗粒脉状	0.02	0.00	0.10	0.00	0.09	0.00	93.07	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	93.30
DFH3-Ty4-6	磁铁矿	0.03	0.00	0.10	0.00	0.06	0.00	94.27	0.00	0.03	0.00	0.01	0.01	0.01	94.52
DFH3-Ty4-7		0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	94.15	0.00	0.00	0.02	0.01	0.06	0.01	94.30
DFH3-Ty4-8		0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	94.01	0.03	0.00	0.04	0.00	0.01	0.05	94.17
DFH3-Ty4-9		0.00	0.03	0.11	0.00	0.03	0.00	92.71	0.00	0.02	0.02	0.01	0.00	0.03	92.96
DFH3-Ty4-10		0.02	0.03	0.13	0.00	0.05	0.00	94.29	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	94.57

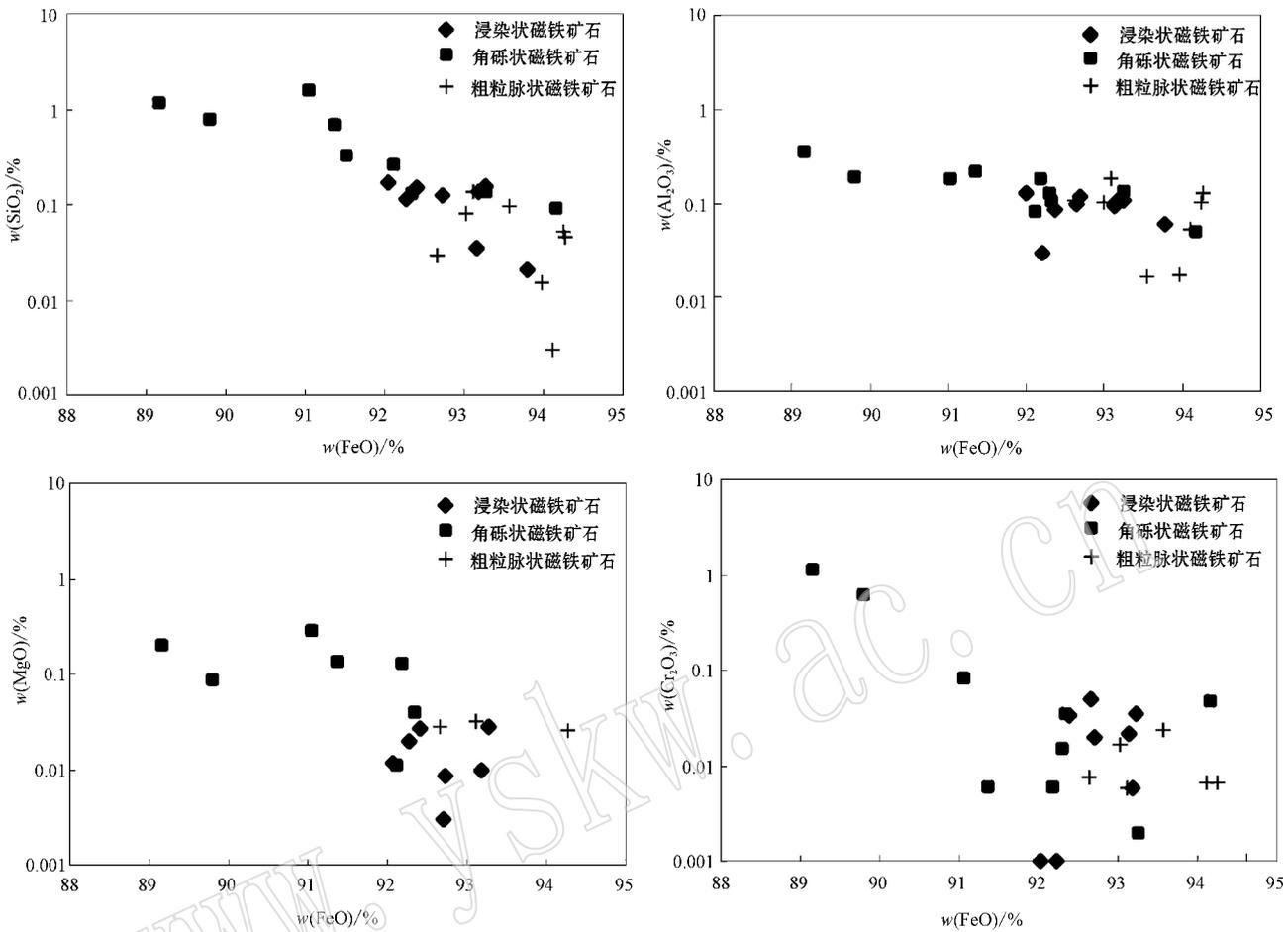


图 5 武定迤纳厂铁铜矿床各类型矿石磁铁矿主要元素成分特征

Fig. 5 Compositions of major elements in magnetite from various types of ore in the Yinachang deposit, Wuding County

在浸染状矿石中的含量高于在另外两类矿石中含量的规律。整体上看,角砾状磁铁矿石的其他主要元素成分与铁成分比值最高,其次为浸染状磁铁矿,最低为脉状磁铁矿。

在磁铁矿单矿物 ICP-MS 微量稀土元素分析表(表 2)中可见,不同类型磁铁矿的微量元素和稀土元素含量变化很大。首先从微量元素来看,角砾状磁铁矿含有相对较高的 Mo、Cr 和较低的 Co、Ni、V、Ga、Rb、Pb、Th、U、Y 等元素;浸染状磁铁矿含有相对较高的 Co、Ni、V、Ga、Mo、Nb、Ta、U 和较低的 Mo、Cr、Sr、Zr、Ba 等元素;粗粒脉状磁铁矿含有相对较高的 Rb、Sr、Zr、Cs、Ba、Hf、Pb、Y 和较低的 Mo、Nb、Ta。稀土元素方面,角砾状磁铁矿稀土含量最低(平均 13.20×10^{-6}),富集轻稀土元素,亏损重稀土元素,并有明显的正 Eu 异常,表现为典型的右倾;浸染状磁铁矿稀土元素含量最高(平均 $44.93 \times$

10^{-6}) ,其中 La、Pr、Eu、Tb、Ho、Tm、Lu 含量均为最高,但其变化很大,轻重稀土含量大致持平;粗粒脉状磁铁矿稀土总量中等(平均 31.05×10^{-6}),Ce、Nd、Er、Yb、Y 含量均较高,且轻稀土明显高于重稀土,表现出明显的右倾。

4 讨论

4.1 磁铁矿成因分析

磁铁矿属于尖晶石族,其晶体化学分子式为 AB_2X_4 , A 组主要阳离子为 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Ni^{2+} 等;B 组主要阳离子为 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Ti^{4+} 、 Cr^{3+} 等(Lindsley, 1976; 潘兆鲁, 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 等二十多种元素。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。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 $TiO_2 - Al_2O_3 - MgO$ 成因图解,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-中型岩浆磁铁矿、酸性-碱性岩浆磁铁矿。徐国凤等(1979)对各种成因类型的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的铁矿床中磁铁矿的标型化学组分特征,将成因类型分为岩浆矿床、接触交代矿床、热液交代矿床和区域变质矿床。林师整(1982)根据3 000多个磁铁矿化学成分数据制作了 $TiO_2 - Al_2O_3 - (MgO + MnO)$ 磁铁矿成因三角图解(图6),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、接触交代型、矽卡岩型和沉积变质型。Dupuis 和 Beaudoir(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7)。段超等(2012)利用这些图解,对宁芜矿集区凹山铁矿床磁铁矿进行微区分析后,得到了该矿床受岩浆控制强烈的结论,说明该图解具有一定的实效性。

迤纳厂铁铜矿床中不同类型磁铁矿成分不尽相同,且随着矿化阶段的演化表现出一定的规律。在 $TiO_2 - Al_2O_3 - (MgO + MnO)$ 图解(图6)中,角砾状

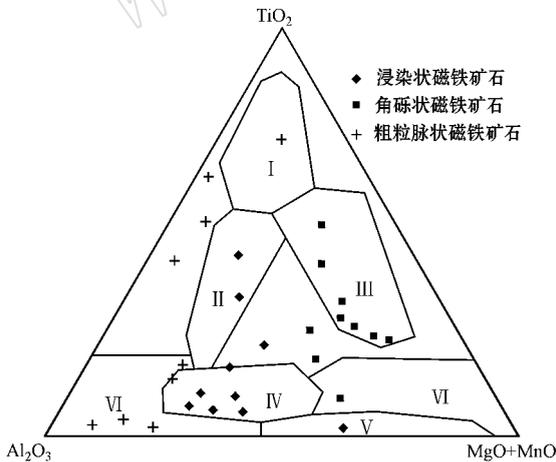


图 6 $TiO_2 - Al_2O_3 - (MgO + MnO)$ 磁铁矿成因三角图解
 Fig. 6 $TiO_2 - Al_2O_3 - (MgO + MnO)$ magnetite genetic classification diagram
 I—副矿物型; II—岩浆型; III—火山岩型; IV—接触交代型;
 V—矽卡岩型; VI—沉积变质型
 I—accessory mineral type; II—magmatic type; III—volcanic type;
 IV—metasomatic type; V—skarn type; VI—diagenetic metamorphism type

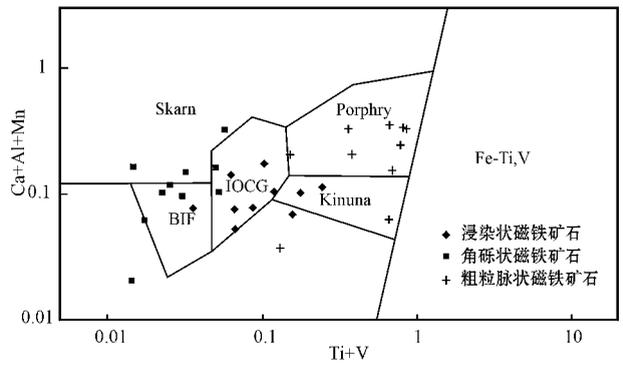


图 7 磁铁矿 $(Ca + Al + Mn) - (Ti + V)$ 成因分类图解
 Fig. 7 $(Ca + Al + Mn) - (Ti + V)$ magnetite genetic classification diagram

磁铁矿 Ti 含量变化较大,推测是由于在角砾中地壳和地幔物质不均一所致,相对富集 Mg 和 Mn 使其落入火山岩型和沉积变质型的范围,浸染状磁铁矿 Ti 含量较低,略微富集 Al,在图中主要处于 II 岩浆型和 IV 接触交代型范围内,粗粒脉状磁铁矿 Ti 含量变化大且较为富集 Al,说明其物质来源与地壳有很大关系,其投点也大多落入沉积变质型。在 Dupuis 和 Beaudoir(2011)建立的针对各种类型矿床的磁-赤铁矿成因分类图解(图7)中,角砾状磁铁矿投点大部分位于 BIF 成因区域,表明其受火山作用影响明显,浸染状磁铁矿主要集中于 IOCG 成因区域,接近 Kiruna(IOCG 矿床的一种)区域,粗粒脉状磁铁矿的投点均落入了斑岩成因区域,可能是这类磁铁矿在热液成矿过程中受到了围岩的影响。

从微量元素的表现来看,浸染状磁铁矿的 C_o 含量集中变化于 $17.30 \times 10^{-6} \sim 28.30 \times 10^{-6}$ 之间,接近岩浆型铁矿床 (30×10^{-6}) 与热液(矽卡岩)型铁矿床 ($70 \times 10^{-6} \sim 247 \times 10^{-6}$) (徐国凤等,1979) 的含量,表明其具有受岩浆控制的特征,而角砾状磁铁矿和粗粒脉状磁铁矿的 C_o 含量很低,分别变化于 $2.25 \times 10^{-6} \sim 3.23 \times 10^{-6}$ (角砾状磁铁矿) 和 $2.00 \times 10^{-6} \sim 6.68 \times 10^{-6}$ (粗粒脉状磁铁矿) 之间,远低于浸染状磁铁矿,说明 C_o 元素大部分来自于围岩,在交代浸染作用发生后,围岩中的 C_o 也消耗殆尽。各种磁铁矿的 Sc 含量均极低(均低于检出限,故未上表),低于徐国凤等(1979)统计的岩浆型矿床 (14.22×10^{-6}) 和热液(矽卡岩)型铁矿床 (1.26×10^{-6}) 范围,表现出其受后期热液交代而使 Sc 含量急剧降低的特征;在整个演化过程中,磁铁矿的高场强元素 P、Th、Ta、Ti 表现出相似的变化特征(图 8a),不

品间含量并没有较大范围的变化。由于这类具有相似分配系数的元素受磁铁矿平衡状态下主量元素含量及物理化学条件的强烈制约,这些元素与 Fe 元素的含量相对稳定,表明其成矿过程中尽管表现为多

阶段性和不同的特征,但总体上拥有相对一致的成矿物质来源和成因(Nadoll, 2009)。这一系列元素特征表明,磁铁矿石前期均具有岩浆特征,但受到后期热液作用改造。

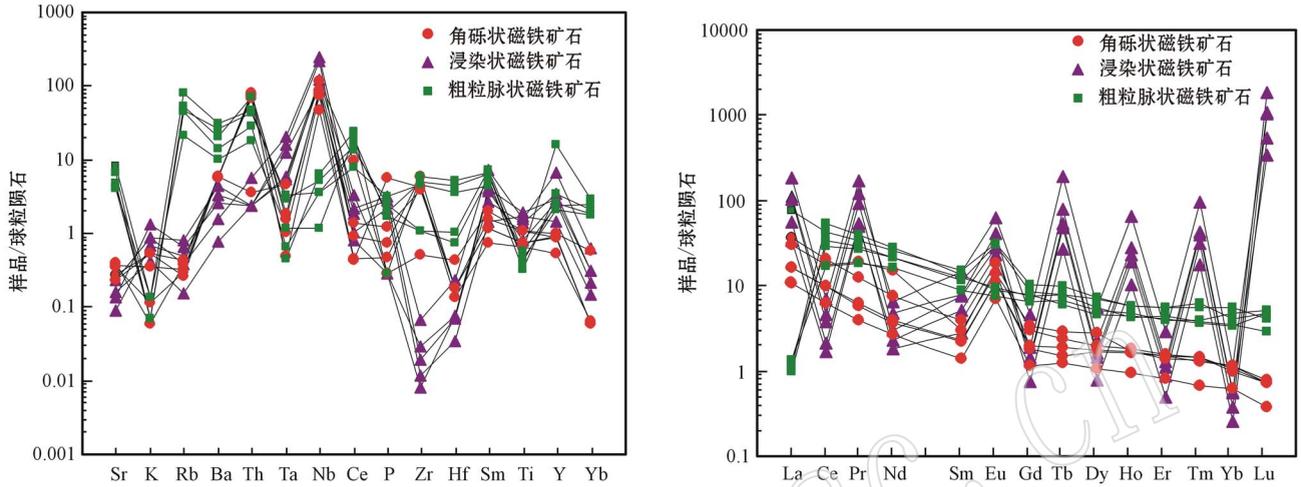


图 8 磁铁矿单矿物微量元素(a)和 REE 元素(b)球粒陨石标准化配分图

Fig. 8 Trace elements spider diagram (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of magnetite samples

角砾状磁铁矿石稀土元素总量最低,表现出明显的右倾特征并有正的 Eu 异常(图 8b),与矿区所采岩角砾岩、石榴子石黑云片岩表现一致,表明其来源上的一致性;浸染状磁铁矿石稀土元素含量变化较大,且表现出“四重效应”,说明其是在正过铝质高 F 岩浆熔体向热液流体转换阶段的产物,即稀土元素在熔体-流体相之间发生分异而成;粗粒脉状磁铁矿石稀土总量高于角砾状磁铁矿,表现为略微亏损 Eu 的近水平右倾,说明在热液成矿阶段,随着热液型磁铁矿的形成,轻重稀土的含量也被再次分配。

综上所述,迤纳厂铁铜矿床在成矿早期中磁铁矿的形成受岩浆作用影响强烈,铁质主要源于岩浆演化后期形成的富铁流体,由于隐爆作用为矿床的就位提供了空间,形成了早期角砾状矿石;第二期交代作用是铁富集的主导作用,富铁流体与围岩发生强烈的物质交换,导致大量铁质沉淀;随着矿化作用的进行,热液作用逐渐增强,对之前形成的磁铁矿进行改造,使其具有热液成因的表象特征。从矿床成因上看,该矿床属于岩浆隐爆-交代型成因,与世界知名的 IOCG 型矿床有相似之处。

4.2 滇中元古代区域成矿作用的讨论

迤纳厂矿床作为一组与岩浆-热液活动紧密相关的矿床组合,以其特征鲜明的矿床成因类型代表

着滇中地区一带大量的元古代铁-铜-金-稀土矿床。前已述及,不同学者在对该矿床物质来源和成因机制方面存在很多争论,主要分为两派:一种观点认为铁质主要来源于岩浆分异,是富含铁质的岩浆流体在与碳酸岩发生交代作用的过程中,铁质沉淀下来(杨时惠, 1982);另一种观点认为铁质来源于海底火山-次火山的喷溢,铁质以一种类似喷流沉积的作用沉淀(杨耀民, 2003; 杨耀民等, 2004, 2005a, 2005b)。这两种观点共存和争议了几十年,一直没有一个确定的结论,主要原因就是在矿物学和流体化学方面的研究不够精细。

笔者与项目组成员自进入该地区开展工作以来,以迤纳厂矿床为典型矿床,开展了较为精细的矿床学研究(周邦国等, 2012; 杨斌等, 2012; 王子正等, 2012; 王生伟等, 2013; 郭阳等, 2013; 侯林等, 2013a, 2013b),取得了一定的认识。从区域地质上看,经过大比例尺矿区填图,始终未找到古喷流口;从矿床地质上看,迤纳厂矿床的铁矿体均呈似层状、透镜状分布,矿体周围蚀变带内交代强烈,具有明显的交代特征;侯林等(2013b)通过流体包裹体研究,在岩浆角砾岩体中发现了熔流包裹体,这是岩浆不混溶的直接证据,表明交代成矿期的岩浆流体直接来源于岩浆;本次研究,通过对磁铁矿单矿物主微量

稀土成分的精细测定和分析,确定了铁元素的岩浆来源和其在各成矿期的地球化学行为,还原了磁铁矿的交代成因。通过总结,本文赞同杨时蕙(1982)的观点,认为迤纳厂矿床的铁成矿与岩浆侵位的交代作用具有密不可分的成因关系。

从滇中开展元古代地质科研至今,一直有学者认为,在1.6~1.7 Ga的滇中处于一个裂谷拉张环境(龚琳等,1996;周邦国等,2012;侯林等,2013a;王生伟等,2013;郭阳等,2013)。然而,这个裂谷的中心所处位置,发育程度及其对成矿的贡献尚存不同的认识。最新的观点(侯林等,2013a;王生伟等,2013;郭阳等,2013)认为,该裂谷为一个与地幔柱相关的裂谷构造,其形成过程类似于热液的上涌,由3条互呈120°的断裂组成。正是在这样的拉张作用下,在滇中各地广泛沉积了东川群(因民组-绿汁江组)地层,尤其是因民组和落雪组(1.5~1.7 Ga)的碳酸岩地层。地幔柱的上涌必然伴随着下地壳的重熔和各种性质岩浆的侵位,这些岩浆带来了成矿必须的物质,尤其是铁质。在岩浆流体出溶过程中,铁大量富集于出溶流体,形成了富含成矿物质的岩浆热液,这种热液与因民组和落雪组白云岩发生交代作用,使铁发生沉淀并富集成矿。这一由地幔柱上涌引发下地壳重熔并分异出岩浆流体与围岩交代成矿的模式,与著名的奥林匹克坝拉张型IOCG矿床有很多的相似之处,可作为典型矿床代表,开展滇中元古代IOCG成矿系统研究,对建立滇中找矿新模式具有十分重要的意义。

5 结论

(1) 武定迤纳厂铁-铜-金-稀土矿床位于滇中腹地,其磁铁矿类型包括角砾状、浸染状和粗粒脉状,分别代表岩浆活动期、交代成矿期和热液成矿期3个铁成矿期次。

(2) 各类磁铁矿含有一定量的SiO₂、Cr₂O₃、Al₂O₃、MgO等元素,角砾状磁铁矿的主元素成分与铁成分比值最高,其次为浸染状磁铁矿,最低为脉状磁铁矿;不同类型的磁铁矿微量元素变化很大,浸染状磁铁矿稀土配分具四重效应,角砾状磁铁矿和粗粒脉状磁铁矿稀土配分为右倾型。

(3) 成矿早期磁铁矿的形成受岩浆作用影响强烈,含铁的岩浆导致围岩碎裂,形成了早期角砾状矿石,交代成矿期的铁质主要源于岩浆演化晚期分异

形成的富铁流体,富铁流体与围岩发生强烈的物质交换,导致大量铁质沉淀,随着矿化作用的进行,热液作用逐渐增强,加之外界流体的逐渐加入,对之前形成的磁铁矿进行改造,使其具有热液成因的表象特征。

(4) 从矿物成分体现出的矿床成因上看,该矿床属于岩浆隐爆-交代型成因,与世界知名的IOCG型矿床有相似之处。

References

- Chen Guangyuan, Sun Daisheng and Yin Huian. 1987. Genesis Mineralogy and Prospecting Mineralogy [M]. Chongqing: Chongqing Press, 1~874 (in Chinese with English abstract).
- Deer W A, Howie R A and Zussman J. 1992. An Introduction to Rock-forming Minerals [M]. New York: Longman, Harlow, Wiley, 1~696.
- 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 Deposita, Doi: 10.1007/s00126-011-0334-y.
- Gong Lin and He Yite. 1996. Proterozoic Rift Copper Deposits in Dongchuan, Yunnan Province [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1~250 (in Chinese).
- Guo Yang, Yang Bin, Zhou Bangguo, et al. 2013. The Geochemical characteristics of the platinum group elements in Xi-Jiaping of Dongchuan area, Yunnan [J]. Journal of Mineral and Petrology, in Chinese with English abstract.
- Hou Lin, Ding Jun, Deng Jun, et al. 2013a. Zircon LA-ICP-MS dating and its geological significance of the magmatic breccia from yinachang iron-copper deposit, Wuding county, Yunnan province [J]. Geological Bulletin of China (in press, in Chinese with English abstract).
- Hou Lin, Ding Jun, Deng Jun, et al. 2013b. Characteristics of the ore-forming fluid and metallogenesis of Yinachang Fe-Cu-Au-REE deposit, Wuding, Yunnan province, China [J]. Acta Petrologica Sinica (in press, in Chinese with English abstract).
- Hua Youren. 1959. Discussion on strata and regional structures in Dongchuan Cu deposit [J]. Geological Review, 19(4): 155~162 (in Chinese with English abstract).
- Lin Shizheng. 1982. A contribution to the chemistry, origin and evolution of magnetite [J]. Acta Mineralogica Sinica, (3): 166~174 (in Chinese with English abstract).
- Lindsley D H. 1976. The crystal chemistry and structure of oxide minerals as exemplified by the Fe-Ti oxides [A]. Ruble II ID. Oxide Minerals 3 [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-porphry + skarn and climax-Mo deposits in the western United States[D]. Ph.D. Dissertation. University of Auukland, 1~238.
- Pan Zhaolu. 1984. Crystallography and Mineralogy[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~274(in Chinese).
- Singoyi B, Danyusheksy 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 Kerstone Conference, CD-ROM.
- Wang Shengwei, Sun Xiaoming, Liao Zhengwen, *et al.* 2013. Geochemistry and its geological implication of peoleoproterozoic diabase from Dongchaun copper deposit, Yunnan provinced[J]. Acta Geologica Sinica(in press, in Chinese with English abstract).
- Wang Zizheng, Zhou Bangguo, Guo Yang, *et al.* 2012. Geochemistry and zircon U-Pb dating of Tangtang granite in the western margin of the Yangtze Platform[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 31(5): 652~662(in Chinese with English abstract).
- Xu Guofeng and Shao Jielian. 1979. The typomorphic characteristics of magnetite and its siphignacnc[J]. Geology and Prospecting, (3): 30~37(in Chinese with English abstract).
- Yang Bin. Zhou Bangguo, Guo Yang, *et al.* 2012. The geochemical characteristics, petrogenesis and geological significance of the basalts in Xijiaping of Dongchuan area, Yunnan[J]. Journal of Mineral and Petrol, 32(2): 74~80(in Chinese with English abstract).
- Yang Shihui. 1982. An approach to the genesis of magnetite deposit, Yinachang, Yunan, from the internal structures of magnetite[J]. Bull. Chengdu Inst. Geol. M. R., Chinese Acad. Geol. Sci., 3: 137~147(in Chinese with English abstract).
- Yang Yaomin. 2003. Study on geochemistry of Fe-Cu-REE deposit in Kunyang group in mid-Proterozoic-examples by the Yinachang Fe-Cu-REE deposit[D]. Ph.D dissertation of Chinese Academy of Science, 1~90(in Chinese with English abstract).
- Yang Yaomin, Tu Guangchi and Hu Ruizhong. 2004. REE geochemistry of Yinachang Fe-Cu-REE deposit in Yunnan provinced[J]. Acta Mineralogica Sinica, 24(3): 301~308(in Chinese with English abstract).
- Yang Yaomin, Tu Guangchi, Hu Ruizhong, *et al.* 2005a. Sm-Nd isotope geochronology and geologic significance of Yinachang Fe-Cu-REE deposit, Wuding[J]. Chinese Science Bulletin, 50(12): 1 253~1 258(in Chinese with English abstract).
- Yang Yaomin, Tu Guangchi, Hu Ruizhong, *et al.* 2005b. Sulfur isotope geochemistry characteristics of Yinachang REE-Fe-Cu deposit[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 23(supp.): 90(in Chinese with English abstract).
- Zhou Bangguo, Wang Shengwei, Sun Xiaoming, *et al.* 2012. SHRIMP U-Pb age and its geological implication of zircons in diabase dyke swarm from Dongchuan area, Yunnan provinced[J]. Geological Review, 58(2): 359~368(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 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.
- 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.
- 龚琳, 何毅特. 1996. 云南东川元古宙裂谷型铜矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1~250.
- 郭阳, 杨斌, 周邦国, 等. 2013. 云南东川奚家坪玄武岩的铂族元素地球化学[J]. 矿物岩石(待刊).
- 侯林, 丁俊, 邓军, 等. 2013a. 云南武定迤纳厂铁矿岩角砾岩锆石 U-Pb 年龄及其意义[J]. 地质通报(待刊).
- 侯林, 丁俊, 邓军, 等. 2013b. 云南武定迤纳厂铁-铜-金-稀土矿床成矿流体特征与成矿作用[J]. 岩石学报(待刊).
- 花友仁. 1959. 对东川铜矿地层划分和区域构造的探讨[J]. 地质论评, 19(4): 155~162.
- 林师整. 1982. 磁铁矿矿物化学、成因及演化的探讨[J]. 矿物学报, (3): 166~174.
- 潘兆橧. 1984. 结晶学与矿物学(下册 I) [M]. 北京: 地质出版社, 1~274.
- 王生伟, 孙晓明, 廖震文, 等. 2013. 云南东川铜矿区古元古代辉绿岩地球化学及其地质意义[J]. 地质学报(待刊).
- 王子正, 周邦国, 郭阳, 等. 2012. 扬子地台西缘淌塘花岗岩的地球化学特征及锆石 U-Pb 定年[J]. 岩石矿物学杂志, 31(5): 652~662.
- 徐国凤, 邵洁连. 1979. 磁铁矿的标型特征及其实际意义[J]. 地质与勘探(3): 30~37.
- 杨斌, 周邦国, 郭阳, 等. 2012. 云南东川奚家坪玄武岩的地球化学特征、成因及其地质意义[J]. 矿物岩石, 32(2): 74~80.
- 杨时蕙. 1982. 从磁铁矿内部结构探讨云南迤纳厂铁矿床的成因[J]. 中国地质科学院成都地质矿产研究所所刊, 3: 137~147.
- 杨耀民. 2003. 中元古代昆阳群 Fe-Cu-REE 矿床地球化学研究—以武定迤纳厂矿床为例[D]. 北京: 中科院研究生院, 1~90.
- 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.
- 杨耀民, 涂光炽, 胡瑞忠, 等. 2005a. 武定迤纳厂 Fe-Cu-REE 矿床 Sm-Nd 同位素年代学及其地质意义[J]. 科学通报, 50(12): 1 253~1 258.
- 杨耀民, 涂光炽, 胡瑞忠, 等. 2005b. 迤纳厂稀土-铁-铜矿床硫同位素地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 23(增刊): 90.
- 周邦国, 王生伟, 孙晓明, 等. 2012. 云南东川望厂组熔结凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其意义[J]. 地质论评, 58(2): 359~368.