



滇西北衙金多金属矿床磁铁矿元素地球化学 特征及其对成矿作用的制约^{*}

李俊, 丁俊, 牛浩斌, 宁括步, 王鹏, 任飞

(中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘要 北衙金多金属矿床处于扬子地台西缘, 是与喜马拉雅期富碱斑岩具有紧密成因联系的典型矿床代表。文章在详实的野外地质工作和室内研究基础上, 将北衙矿床中铁矿的成矿作用划分为早期气液交代阶段和晚期富铁质流体贯入充填阶段。电子探针和 ICP-MS 分析表明, 磁铁矿主量元素具有富 Si, 贫 Ti、V、Mn、Mg 的特征, 微量元素 Th、Sr、Zr 含量较低, Cs、U 相对富集, 一致的高场强元素(Zr、Hf、Nb、Ta)变化特征。研究表明, 磁铁矿与区域内基性-超基性岩浆无关, 其形成与矿区中酸性富碱岩浆密切相关。矿区中的铁矿床存在早期气液交代型和晚期贯入充填型 2 种矿化类型。早期交代成矿作用并不是北衙矿床中铁的唯一供给机制, 还存在岩浆演化后期富铁流体贯入充填的成矿方式。

关键词 地球化学; 磁铁矿; 北衙金多金属矿床; 滇西

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

Geochemical characteristics of magnetite from Beiya gold polymetallic deposit in western Yunnan and its constraint on mineralization

LI Jun, DING Jun, NIU HaoBin, NING KuoBu, WANG Peng and REN Fei

(Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract

The Beiya gold-polymetallic deposit located in western Yangtze Block is a typical alkali-rich intrusion-related deposit formed during Himalayan epoch. Based on detailed field geological investigation and mineralogical and petrological study, the authors divided the ore-forming process into two stages: Early metasomatic mineralization stage and late melt-filling stage. Electronic microprobe and ICP-MS analyses of magnetite show that magnetite in the Beiya deposit is poor in Ti, V, Mn, Mg and rich in Si. Trace elements in magnetite are rich in Cs, U but depleted in Th, Sr, Zr. The values of high field strength elements (Zr, Hf, Nd, Ta) within the magnetite of two mineralization stages are consistent. Geological characteristics and magnetite geochemistry indicate that the Beiya iron deposit is associated with the intermediate to acidic alkali-rich magma rather than with the basic rocks or ultra basic rocks, that metasomatism is not the only mechanism of iron deposition, and the intrusion of the iron-enriched melt derived from magma might also have had to do with mineralization.

Key words: geochemistry, magnetite, Beiya gold-polymetallic deposit, western Yunnan Province

^{*} 本文得到中国地质调查局项目(编号: 121201010000150014)、四川省基金项目(编号: 2014JQ0025)、中国地质调查局三维填图试点项目(编号: 1212011220249)和中国地质调查局地调项目(编号: 12120114013501)的联合资助

第一作者简介 李俊, 男, 1987年生, 硕士, 主要从事区域成矿学方面的研究。Email: cdljunwonder@163.com

收稿日期 2014-12-24; 改回日期 2016-01-04。秦思婷编辑。

作为中国著名的超大型金矿床,前人对北衙矿床的地质特征、富碱斑岩特征及源区、流体包裹体等方面做了大量工作(刘建云,2004;刘显凡等,2004;徐受民,2007;肖晓牛等,2009a;李勇,2009),但对北衙矿床铁矿的成因存在争议。部分学者研究认为北衙铁矿床属于矽卡岩型和浅层热液型的复合成因矿床,成矿事件受控于整个斑岩成矿系统(肖晓牛等,2009b,2011);也有学者认为北衙矿床是与喜马拉雅期富碱斑岩有关的矽卡岩型矿床,气液交代作用是矿区铁矿最主要的矿床成因类型(和文言等,2012);而 Xu 等(2007)认为矿区存在熔浆成因的铁矿,成矿可能与基性岩浆活动有关(徐兴旺等,2006b,2007; Xu et al., 2007)。因此,研究和分析北衙矿床的铁矿成因机制和矿质来源是矿床研究工作的关键。由于矿区缺乏系统的矿物学研究,对铁矿成因和成矿物质来源等认识缺乏充分证据,而磁铁矿作为矿区中最主要的矿石矿物,其地球化学成分的变化规律是矿床成因研究的重要指示剂。本次工作在详细的野外调查研究和室内鉴定的基础上,选取北衙矿床不同阶段、不同类型磁铁矿为研究对象,采用电子探针和单矿物 ICP-MS 微量元素测试方法,对其成分特征进行研究,追溯其成矿物质来源并探讨矿区铁矿成因类型。

1 地质背景

北衙矿区位于德格-中甸陆块、扬子陆块、兰坪-思茅陆块 3 个 I 级构造单元结合部东侧(图 1),夹于金沙江-红河断裂、宾川-程海断裂和丽江-木里断裂之间,构造环境属于大陆环境,具张性裂谷特征。矿区地处扬子准地台西缘的丽江台缘拗陷褶皱带,属云南扬子成矿区中南段的大理-丽江成矿集中区。区内上震旦统和寒武系、奥陶系分布零星,主要出露二叠系—第四系。区域内构造活动频繁,构造变形复杂,总体断裂方向近南北,也发育近东西向构造。由于喜马拉雅期印度板块向欧亚板块的俯冲碰撞引发印度板块与扬子板块相向俯冲作用,导致区内形成大规模的走滑断裂和拉分盆地以及富碱斑岩侵位,并伴随一系列矿床形成。这条分布于盐源-丽江断陷盆地内的陆内斑岩成矿带是与金沙江-哀牢山斑岩带联系密切又相对独立的斑岩成矿带,被认为是喜马拉雅期印-亚陆陆碰撞造山成岩成矿作用在该地区应力转换阶段的远程响应。斑岩带与区内金、铁、

银、铜、铅、锌等矿化关系密切,控制众多矿床、矿点的产出和分布(徐兴旺等,2006a;薛传东等,2008)。

2 矿床地质特征

矿区总体受北北东向的向斜构造控制,向斜核部多被全新统、更新统沉积物覆盖,两翼受断裂及岩浆侵入的影响发育小褶皱(图 2)。矿区主要见晚古生代至中生代地层出露,由古到新依次为上二叠统峨眉山玄武岩($P_2\beta$)、下三叠统青天堡组(T_1)黄绿色-紫色碎屑岩、中三叠统北衙组(T_2b)灰岩及白云岩、新近系(N_2s)河湖相沉积以及全新统(Q)含砾黏土层角度不整合覆盖其上。北衙组碳酸盐岩为矿区主要的赋矿地层,北衙组中下部(T_2b^{1+2})呈灰色、浅灰色,中厚层瘤状、蠕虫状(生物碎屑)灰岩及泥质灰岩,局部夹砂泥质碎屑岩薄层,以及向上渐变为互层产出的灰色、深灰色砂质白云岩和微晶白云岩(T_2b^3);北衙组上部(T_2b^4)则为灰白色微晶白云岩与浅灰色含粒屑白云岩。

区内多为张性和张扭性断裂,主要包括北东向、南北向和东西向。北东向和近南北向断裂构造属成矿前断裂和同生断裂,是富碱岩浆侵入和流体运移的通道,也是重要的容矿构造,其对岩体空间展布及矿化的规模起着严格的控制作用。向斜西翼的万洞山矿段,地层受富碱岩浆底辟上涌作用,以岩体为中心形成似穹窿构造,岩体接触带和断层破碎带是重要的控矿构造;“穹窿”周围次级断裂、地层顺层滑脱带及裂隙节理也在一定程度上控制着矿化规模、产状和富集程度。晚期东西向断裂发育对早期矿体起破坏作用。

喜马拉雅期富碱岩浆的侵位与北衙矿床在时间、空间、成因上联系密切,主要呈岩株及岩脉状产出,主要有石英正长斑岩、黑云正长斑岩、煌斑岩等。矿区存在成矿期和成矿晚期 2 期岩浆活动,晚期岩浆活动多为煌斑岩、黑云正长斑岩脉(3.66~3.78 Ma)侵位于东西向断裂中,与成矿关系不大。根据野外产状和接触穿插关系,成矿期的斑岩可划分为 2 个岩浆活动阶段,其中,早阶段石英正长斑岩[锆石 U-Pb 年龄(38.51 ± 0.46) Ma]与矿区 Fe 的成矿密切相关,而稍晚阶段的石英正长斑岩[锆石 U-Pb 年龄(36.19 ± 0.07) Ma]则表现为全岩硅化和金属硫化物矿化,对早期矿体中 Au 的叠加成矿贡献大。

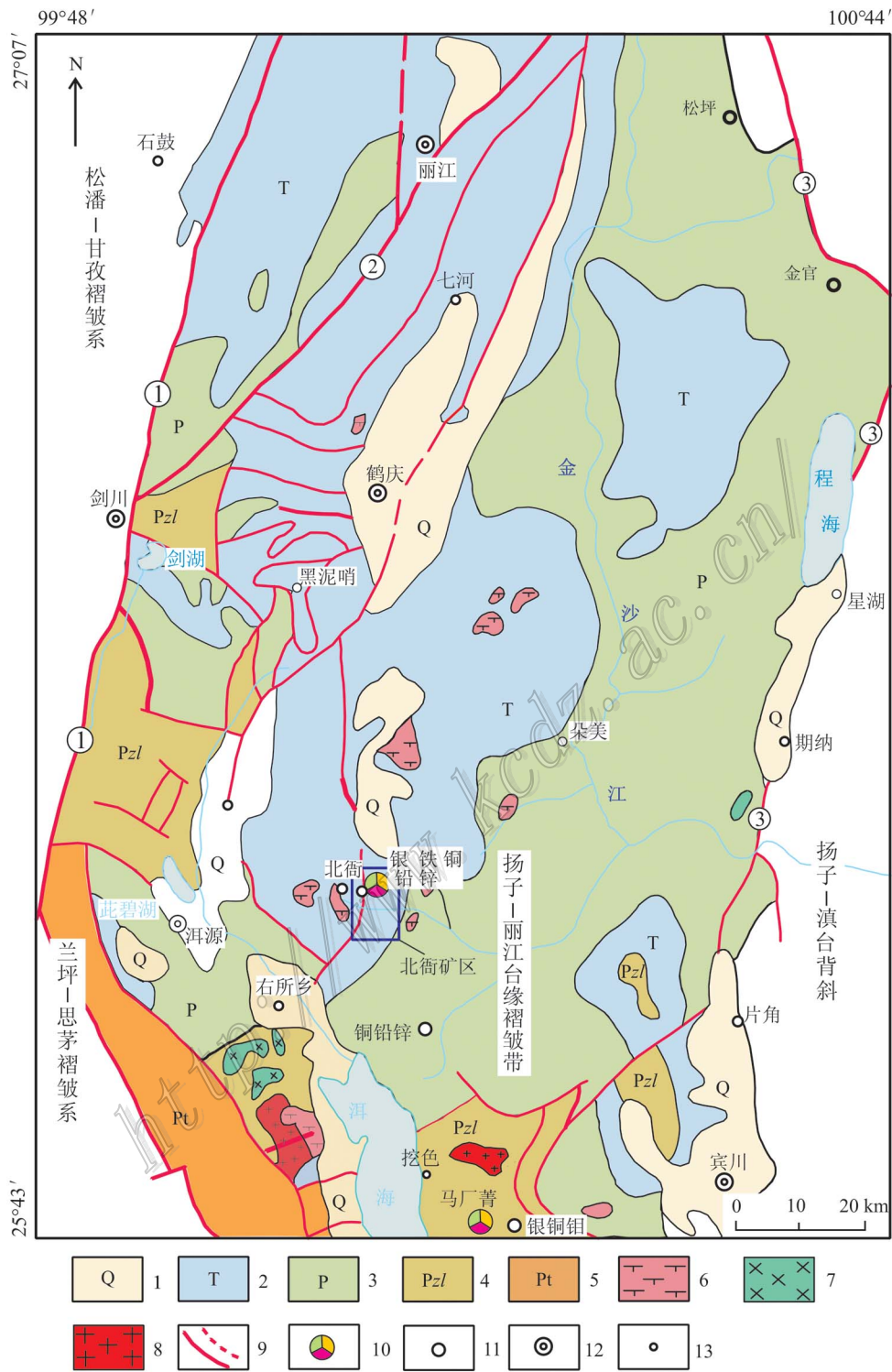


图 1 滇西地区区域地质及矿产分布图(据云南省区域地质志,1990 修改)

1—第四系; 2—三叠统; 3—二叠统; 4—下古生界; 5—元古界; 6—正长斑岩; 7—基性岩; 8—花岗岩; 9—断裂及推测断裂;
10—大型矿床(点); 11—中小型矿床(点); 12—市县; 13—乡
①—金沙江-红河断裂; ②—丽江-木里断裂; ③—程海-宾川断裂; ④—永胜-祥云断裂

Fig. 1 Regional geological map and deposit distribution of western Yunnan (modified after Regional Geology of Yunnan Province, 1990)

1—Quaternary; 2—Triassic; 3—Permian; 4—Lower Paleozoic; 5—Proterozoic; 6—Orthophyre; 7—Basic rock; 8—Granite; 9—Fault and inferred fault; 10—Large deposit (spot); 11—Small and medium-sized deposit (spot); 12—Cities and counties; 13—Village
①—Jinshajiang-Honghe fault; ②—Lijiang-Muli fault; ③—Chenghai-Binchuan fault; ④—Yongsheng-Xiangyun fault

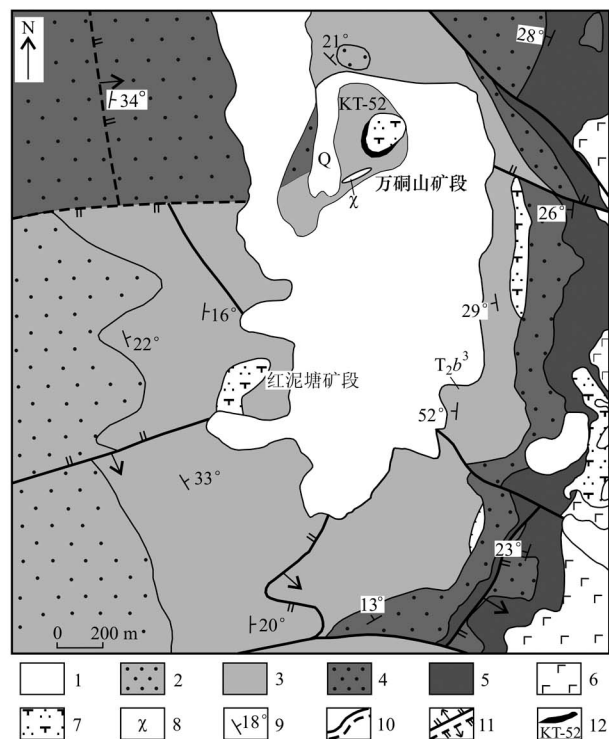


图2 北衙金多金属矿床矿区地质图

1—第四系含砾黏土层; 2—北衙组四段白云岩; 3—北衙组三段砂质白云岩; 4—北衙组一、二段灰岩; 5—青天堡组砂岩; 6—峨眉山玄武岩; 7—石英正长斑岩; 8—煌斑岩脉; 9—产状; 10—实测及推测界线; 11—实测及推测断层; 12—矿体及其编号

Fig. 2 Geological map of the Beiya gold-polymetallic deposit
1—Quaternary gravel clay layer; 2—Beiya Formation, 4th member dolomite; 3—Beiya Formation, 3rd member dolomite; 4—Beiya Formation, 1st and 2nd member limestone; 5—Qingtianbao Formation, sandstone; 6—Emeishan basalt; 7—Quartaorthophyre; 8—Lamprophyre vein; 9—Attitude; 10—Measured and inferred geological boundaries; 11—Measured and inferred faults; 12—Orebody and its serial number

按矿(化)体形成及产出特征划分,由岩体中心向外围依次有斑岩型铜金矿化(体)、条带状矽卡岩铁铜金矿体、脉状及囊状充填贯入型铁金矿体。原生矿近地表部分多形成褐铁矿、赤铁矿等氧化矿,部分矿体风化剥蚀形成残坡积型铁金矿。如矿区56#勘探线剖面图(图3)所示,矿体总体围绕岩体为中心产出,其中,矽卡岩矿体严格受接触带控制,港湾状部位最为发育;充填贯入型矿体呈规模不等的脉状、囊状于断层破碎带、斑岩、围岩内裂隙、层间破碎带及溶洞内充填成矿;而岩体内部斑岩型铜金矿化因

矿化较分散未能圈出矿体。结合矿区最新矿产调查研究工作,将北衙矿床划分为以下几个成因类型。

(1) 气液交代成矿作用及矽卡岩型铜金铁矿床

矽卡岩型矿床是北衙矿区最主要的矿床类型,现已发现的铜金铅锌矿体多属这种成因类型,部分铁矿体也与该类矿床成因相关。矽卡岩成因矿体严格受岩体接触带构造控制,呈不规则的似层状、透镜状,矿体连续性较好。根据蚀变、矿物组合特征可进一步划分为:①早期矽卡岩期铁矿化,呈团状、条带状产于斑岩和围岩接触带的矽卡岩蚀变带中,金属矿物以为磁铁矿为主,与石榴子石、透辉石等矽卡岩矿物共生;②晚期石英硫化物成矿期,以硅化、碳酸盐化蚀变为主,金属矿物主要为黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿等金属硫化物。金以黄铁矿为主要载金矿物呈脉状、囊状(粒状集合体)充填于早期铁矿裂隙或风化孔洞内,近地表多以氧化的褐铁矿存在,形成“蜂窝状”磁铁矿-赤铁矿石,以致存在黄铁矿、黄铜矿等金属硫化物叠加的矿石类型普遍金品位较高(不含黄铁矿的磁铁矿石 $w(\text{Au})$ 为0.27~2.32 g/t,含黄铁矿的磁铁矿-赤铁矿石 $w(\text{Au})$ 为9.13~34.50 g/t,“蜂窝状”氧化的褐铁矿石 $w(\text{Au})$ 为17.90~30.20 g/t)。因此,金应与晚期的黄铁矿、黄铜矿等金属硫化物同期成矿。

(2) 岩浆成矿作用及斑岩型矿化

这类成矿主要发育于矿区斑岩体内部,目前尚未圈出有规模的矿体。矿石类型为细脉状、细脉浸染状和星点状矿化斑岩,金属矿物为黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿和辉铜矿等。

(3) 与铁质流体相关的矿床

北衙矿区除了发育于接触带的矽卡岩型铁矿,而且有相当一部分铁矿呈不规则脉状穿插分布于不同岩性地层中,沿破碎带、构造裂隙或岩溶洞穴充填,并含有围岩和斑岩的捕虏体。矿石多以致密块状构造、似流动构造的磁赤铁矿为主。过去研究人员多认为其为热液型铁矿,但热液性质和成因不明,而徐兴旺等(2006b)认为其具有熔浆型铁矿的特征,成矿可能与基性-超基性岩相关。

总的来说,各成因类型矿床随矿化空间分布不

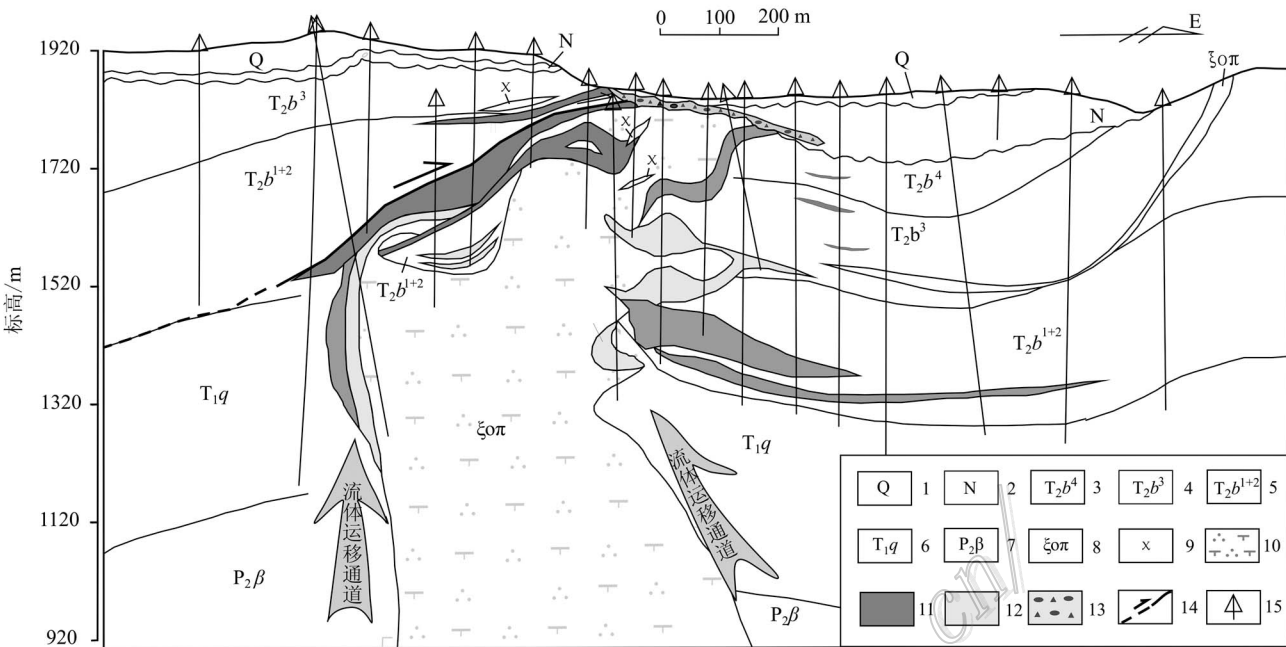


图3 北衙金多金属矿床56[#]勘探线剖面及矿体类型图

- 1—第四系更新统灰质角砾岩; 2—新近系河湖相沉积; 3—中三叠统北衙组四段白云岩; 4—中三叠统北衙组三段砂屑白云岩;
5—中三叠统北衙组一二段灰岩; 6—下三叠统青天堡组砂岩; 7—二叠系玄武岩; 8—喜马拉雅期石英正长斑岩; 9—煌斑岩脉;
10—正长斑岩; 11—充填型矿体; 12—砂卡岩矿体; 13—残坡积型矿体; 14—断层; 15—钻孔

Fig. 3 Geological section along No. 56 exploration line and deposit types in the Beiya gold-polymetallic deposit

- 1—Quaternary Pleistocene Series breccia; 2—Neogene fluvial-lacustrine sediments; 3—Middle Triassic Beiya Formation, 4th member dolomite;
4—Middle Triassic Beiya Formation, 3rd member dolomite; 5—Middle Triassic Beiya Formation, 1th and 2th member limestone; 6—Lower Triassic Qingtianbao Formation; 7—Emeishan basalt; 8—Himalayan quartz-orthophyre; 9—Lamprophyre dike; 10—Orthophyre; 11—Fill-in type ore-body; 12—Skarn type orebody; 13—Residual and diluvial type orebody; 14—Fault; 15—Drill hole

同而变化,不同期次和不同类型矿床既可独立出现,也可相互叠置形成复合型矿床。

北衙矿区露天开采深度已达200 m,大面积的隐伏矿体剥露面提供了丰富且直观的矿床研究素材(图4a)。根据野外地质调查和室内分析,将北衙矿区铁矿分为早期气液交代砂卡岩成矿期和晚期富铁流体充填贯入成矿期。其中,早期交代型铁矿体多见于深部钻孔岩芯岩体接触带部位,在斑岩港湾状接触部位最为发育(图4b)。接触带具有典型接触交代砂卡岩带,铁矿石与砂卡岩蚀变带在时空关系上联系紧密。而晚期铁矿体与围岩呈截然接触关系,与岩体接触无蚀变带发育,灰岩、白云质灰岩发生接触变质和重结晶形成大理岩(图4c~e)。这类矿体具有充填贯入的结构构造及接触关系,且表现出捕虏体、流动构造、接触热变质等显著的贯入特征。矿区铁矿石结构构造特征见图5。根据矿区铁矿成矿特征将北衙矿床划分为交代型和贯入型2种类型(表1)。

3 磁铁矿元素地球化学特征

3.1 样品采集制备及分析

在野外地质调查工作基础上,分别于北衙矿区万硐山矿段(08P-b26-6、08P-b38、08P-b39、08P-b71、08P-b76、dc014b1、dc199-1、dc1042、dc1052、DC2003b1、wd-nhb10、lj-lw2、WDS-b1、WDS-b2)和55[#]勘探线(55ZK30b2、55ZK30b3)、56[#]勘探线(56ZK7-1b5、56ZK7-1(238 m))、60[#]勘探线(60ZK7(307 m)、60ZK7(360 m))、79[#]勘探线(79ZK4)、马头湾(jkmtw-b4-1、jkmtw-b4-3)等地采集矿石和钻孔岩芯样品23件,根据野外特征将样品分为交代型和贯入型2类,分别代表北衙矿区2期铁矿。共制备磁铁矿单矿物样品15件,磨制探针片19件,测试矿物电子探针微区分析点52个。

样品粉碎和单矿物挑选在河北省廊坊区域地质矿产调查研究所实验室完成,将样品用大锤粉碎,并

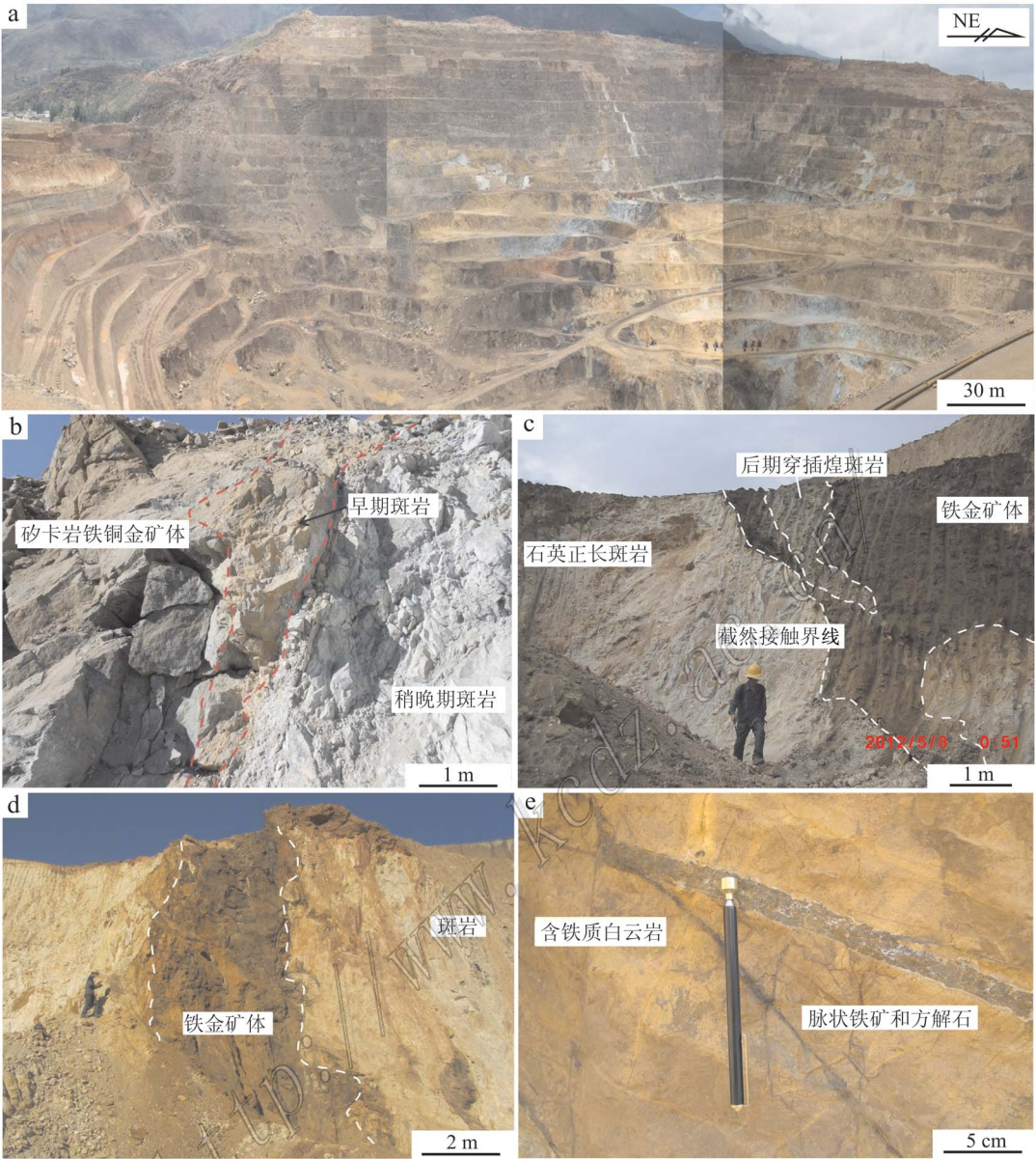


图 4 北衙矿区万洞山矿段矿床特征

a. 北衙矿区万洞山采场全景图; b. 早期(石英正长)成矿斑岩接触带发育矽卡岩化蚀变及磁铁矿化,随后为稍晚期斑岩侵入接触; c. 贯入充填特征铁矿体与斑岩呈截然接触关系; d. 斑岩内断裂裂隙部位产出的贯入充填特征铁金矿体,接触部位无热液交代; e. 围岩(白云岩)裂隙中的铁矿脉及伴生方解石

Fig. 4 Characteristics of orebody in the Wandongshan ore block of the Beiya deposit

a. Photo of Wandongshan stope from the Beiya deposit; b. Skarn iron-copper-gold orebody in the contact zone between porphyry (earlier) and dolomite, porphyry (later) that intruded into porphyry (earlier); c. Sharp contact between porphyry and iron body of fill-in type; d. Fill-in type iron orebody in the cranny of porphyry, without metasome in the contact zone; e. Iron vein and associated calcite in fractures of wall rock (dolomite)

清水冲洗晾干,然后将其在玛瑙研钵中研磨至 40 目左右,淘洗烘干,在双目镜下挑选纯度可达 99% 以上的磁铁矿单矿物。单矿物稀土和微量元素测试工作在国家地质实验测试中心完成,分析仪器为等离子质谱 X-series,执行标准 DZ/T0223-2001,采用方法为酸

溶法,分析误差小于 5%,检测限为 0.05×10^{-6} 。探针片磨制工作由成都地质矿产研究所实验测试中心完成,将样品磨至 $80 \mu\text{m}$ 并抛光制成探针片,偏光显微镜下观察矿物形态特征、共生关系,圈定磁铁矿单矿物目标靶区并拍摄镜下照片,后将探针片镀碳以达

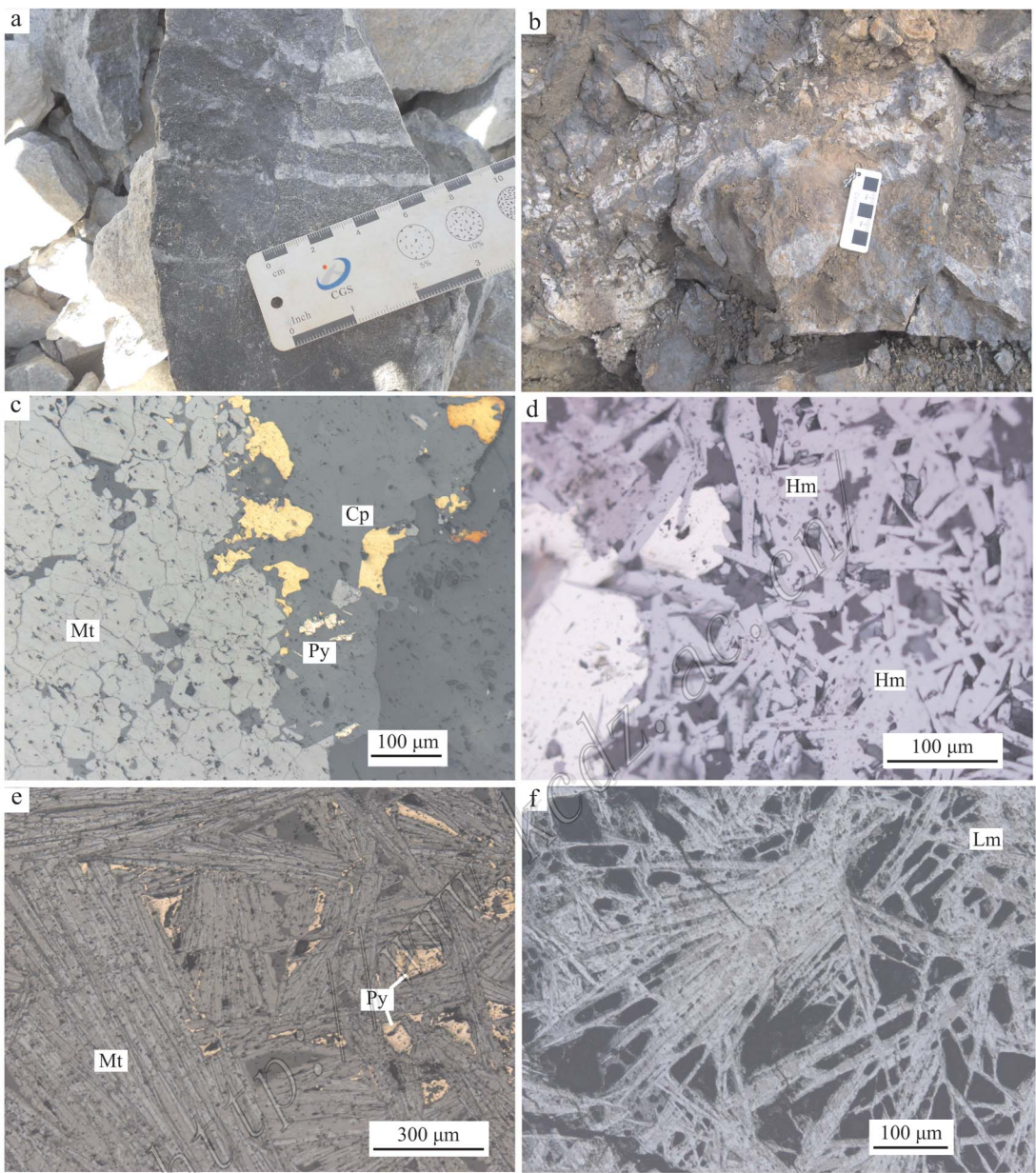


图 5 北衙矿区矿石特征及矿物显微镜下照片

a. 砂卡岩矿石,石榴子石、透辉石等高温交代矿物伴生磁铁矿、黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿,矿石遭后期石英脉穿插; b. 充填特征磁铁矿石,似定向流动贯入构造,捕掳早期斑岩角砾; c. 自形-半自形磁铁晶体间隙充填黄铜矿、黄铁矿; d. 自形-半自形板状赤铁矿; e. 自形-半自形穆磁铁矿,为赤铁矿还原条件下转化产物,保留赤铁矿晶形; f. 放射状褐铁矿
Mt—磁铁矿; Py—黄铁矿; Cp—黄铜矿; Hm—赤铁矿; Lm—褐铁矿

Fig. 5 Photos of iron ores and photomicrographs of minerals of different types in the Beiya deposit

a. Skarn ores, minerals wrapping magnetite, Chalcopyrite, pyrite, pyrrhotite. skarn affected by later silicon vein; b. Flow-like structure of fill-in type Fe ores with porphyry inside; c. Microscope photos of magnetite, chalcopyrite, pyrite; d. Euhedral-subhedral platy hematite crystals; e. Euhedral-subhedral martite transformed from hematite in reducing environment; f. Radial limonite crystals

Mt—Magnetite; Py—Pyrite; Cp—Chalcopyrite; Hm—Hematite; Lm—Limonite

到导电性质。电子探针显微分析(EPMA)在中国地质大学(武汉)地质过程与矿床资源国家重点实验室电子探针实验室完成,所用仪器为日本 JEOL 公司生产的电子探针显微分析仪(Electron ProbeMicroAnylyzer),仪器型号为 JXA-8100。实验条件为加速电压 15 kV,电流 20 nA,束斑直径 5 μm,摄谱时间 10 s。

表 1 北衙矿区交代型和贯入型铁矿床地质特征
Table 1 Geological features of metasomatism type and filling type iron ores in the Beiya deposit

类型	交代型	充填贯入型
产出位置	深部岩体局部接触带	构造破碎带、断裂构造、岩溶孔洞以及岩体或围岩中节理裂隙等容矿空间
矿体形态	受接触带产状控制,呈带状、团状	严格限制于构造空间,多呈囊状、脉状、细脉、网脉
成矿特征	矿体与围岩发育典型矽卡岩蚀变分带,多发育于矽卡岩蚀变带内。伴生矿物常见石榴子石、透辉石、绿帘石等。矿石为浸染状、致密块状磁铁矿,常伴生黄铜矿、黄铁矿、菱铁矿等金属矿物	与岩体和围岩界线多为港湾状,界线截然,显示较明显贯入成矿特征,无接触交代蚀变现象。矿石多为致密块状磁铁矿,可见发育流动或旋卷构造、气孔构造,基本无伴生金属矿物
矿化规模	厚度数十厘米到几米	受构造限制,厚几米至十多米,也可见毫米级细脉充填成矿

3.2 分析结果

磁铁矿探针测试分析数据见表 2,磁铁矿单矿物主量元素以 TFeO 为主[$\omega(\text{TFeO})$ 为 87.48%~92.02%],另外还有 SiO_2 、 MnO 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 、 CaO 、 Cr_2O_3 等。 $\omega(\text{SiO}_2)$ 较高,且变化较大(0.11%~3.12%); $\omega(\text{TiO}_2)$ 最高为 0.74%,最低至 0.01%,多集中于 0.05%~0.20%; $\omega(\text{MgO})$ 和 $\omega(\text{MnO})$ 较低[$\omega(\text{MgO})$ 平均为 0.08%, $\omega(\text{MnO})$ 低于 0.01%]; $\omega(\text{V}_2\text{O}_3)$ 低于检测限 0.1‰; $\omega(\text{Cr}_2\text{O}_3)$ 为 0.01%~0.14%,总体具有富 Si,贫 Ti、 V_2O_3 、Mn、Mg 的特征。 TFeO-SiO_2 相关图(图 6)显示,磁铁矿中铁含量与 SiO_2 呈明显的反相关关系,随着矿物中的硅质增加,Fe 含量下降,说明相对基性的成矿环境更适合铁矿形成,较酸性条件不利于铁的富集沉淀。

由磁铁矿 ICP-MS 稀土、微量元素分析结果(表 3、表 4)可以看出,磁铁矿含 Rb、Nb、Sc、U、V、Ti、Co、Ni、Cr 等。根据 Sun 等(1989)球粒陨石标准,磁铁矿稀土、微量元素配分模式见图 7、图 8。各样品微量元素组分有一定差异,但总体特征相似,并具有一致的 HFSE 变化特征(Zr、Hf、Nb、Ta)。总体看,各样品具有高 Cs、U 含量,相对亏损 Th、Sr、Zr、Ti 的特征。矿物中 $\omega(\text{Ti})$ 偏低, $\omega(\text{Ti})$ 集中于 $16.80 \times 10^{-6} \sim 1735.00 \times 10^{-6}$; $\omega(\text{Ni})$ 平均为 94.24×10^{-6} ; $\omega(\text{Co})$ 为 $0.13 \times 10^{-6} \sim 77.90 \times 10^{-6}$, $\omega(\text{V})$ 平均 70.08×10^{-6} 。磁铁矿样品的 ΣREE 较低,贯入充填特征的磁铁矿 ΣREE 为 $2.81 \times 10^{-6} \sim 11.70 \times 10^{-6}$ (平均 6.81×10^{-6}),LREE/HREE 比值为 1.01~7.42 [$(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=0.94 \sim 3.85$ ($\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=0.91 \sim 12.47$],轻稀土元素富集,重稀土元素亏损,并有弱负 Eu 异常,表现为平缓右倾(图 7a);交代特征的磁铁矿 ΣREE 为 $5.18 \times 10^{-6} \sim 13.92 \times 10^{-6}$ (平

均 8.64×10^{-6}),LREE/HREE 比值为 0.70~3.54, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=0.56 \sim 5.00$ ($\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=0.53 \sim 4.58$, Eu 异常多表现为弱负异常,个别表现为正异常,具有平缓略微左倾的特征(图 7b)。

3.3 讨论

标型矿物的主量、微量元素组分特征及差异在一定程度上反映了成矿物质来源、成矿环境和成矿过程的不同(陈光远,1989;Rusk et al., 2011; Singoyi et al., 2006)。前人研究多认为与基性-超基性岩相关的磁铁矿 $\omega(\text{SiO}_2)$ 极低、 $\omega(\text{TiO}_2)$ 均大于 0.5%甚至达到 10%以上,中酸性岩相关磁铁矿的 $\omega(\text{TiO}_2)$ 明显偏低(0.10%~0.80%)。与基性-超基性岩相关磁铁矿的 $\omega(\text{V}_2\text{O}_3)$ 较高(0.78%),与中酸性岩相关磁铁矿的 $\omega(\text{V}_2\text{O}_3)$ 极低(徐国风等,1979;王奎仁,1989)。北衙矿床中,磁铁矿的 $\omega(\text{SiO}_2)$ 较高(平均 1.54%), $\omega(\text{TiO}_2)$ 为 0.05%~0.20%, $\omega(\text{V}_2\text{O}_3)$ 低于检测限 0.1‰,具有高硅、低钛、低钒的特征,且磁铁矿中 MgO、MnO 含量较低,明显区别于同超基性和基性岩浆相关的磁铁矿[$\omega(\text{MgO})$ 为 0.38%~6.27%, $\omega(\text{MnO})$ 为 0.11%~1.01%],指示其与基性-超基性岩浆相关铁矿不同。

早期成矿阶段的气液交代特征为磁铁矿元素轻、重稀土元素比值多 ≤ 1 ,具有平缓略微左倾的特征,成矿晚期阶段贯入充填特征磁铁矿样品的轻稀土元素富集,重稀土元素亏损,表现为缓右倾的特点(图 7)。肖晓牛等(2009a)对北衙矿区钻孔中含矿石英脉和方解石脉中流体包裹体的成分研究表明,北衙矿床气液交代成矿期成矿热液具有高温、高盐度、富 Cl 的特点。毕献武等(2004)研究认为,在发生热液活动和交代作用时,矿物中微量元素会发生较明显的分异,Cl 离子优先络合 LREE,而 F 离子则易与 HREE 结合,可见富 Cl 流体的参与通过络合 LREE 元素而富集迁移大量轻稀土元素。因而不难

表 2 北衙金多金属矿床磁铁矿电子探针测试数据
Table 2 Major element data of magnetite by electron microprobe analysis in the Beiya gold-polymetallic deposit

样品测试号	类型	w(B)/%												总和
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFeO	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	
56ZK7-1b5 #1	贯入型	0.21	0.05	0.05	91.71	67.50	31.00	—	0.01	—	—	—	0.01	98.80
56ZK7-1b5 #2	贯入型	0.33	0.03	0.10	91.59	67.20	31.10	—	0.05	—	0.03	0.03	0.03	98.90
56ZK7-1b5 #3	贯入型	0.32	0.08	0.05	91.59	67.20	31.10	—	0.06	—	0	0.03	0.04	98.90
55ZK30b3 #1	贯入型	1.30	0.39	0.23	90.60	64.30	32.80	—	0.06	—	0.06	0.03	0.03	99.10
55ZK30b3 #2	贯入型	2.12	0.26	0.22	89.61	62.20	33.60	—	0.07	—	0.08	0.04	0.07	98.70
55ZK30b3 #3	贯入型	0.11	0.23	0.13	90.51	66.60	30.60	—	0.06	—	0.08	0.02	0.02	97.80
wd-nhb10 #1	贯入型	1.64	0.03	0.13	89.45	63.30	32.50	—	0.01	—	0.02	0.02	0	97.60
wd-nhb10 #2	贯入型	2.50	0.05	0.05	89.11	61.60	33.70	—	0.04	—	0.05	—	0.02	98.00
wd-nhb10 #3	贯入型	3.12	0.07	0.07	88.77	60.20	34.60	—	0.08	—	—	—	0.03	98.20
08p-b76 #1	贯入型	0.81	0.06	0.11	91.46	66.23	31.86	0.01	0.05	—	0.08	0.01	0.07	99.29
08p-b76 #2	贯入型	2.41	0.04	0.07	89.50	62.02	33.70	—	0.06	—	0.02	—	0.04	98.35
08p-b76 #3	贯入型	2.47	0.08	0.09	89.92	62.16	33.98	—	0.05	—	—	0	—	98.83
60ZK7(360 m) #1	贯入型	0.37	0.03	0.08	91.78	67.31	31.21	—	0.05	—	0.05	0.01	0.05	99.16
60ZK7(360 m) #2	贯入型	0.67	0.05	0.10	92.02	66.95	31.78	—	0.06	—	—	0.01	—	99.62
08P-b26-6 #1	贯入型	0.42	0.06	0.07	91.69	67.16	31.26	—	0.07	—	—	0	0.07	99.10
08P-b26-6 #2	贯入型	1.26	0.04	0.04	91.00	65.15	32.37	—	0.03	—	0.03	—	0.02	98.93
08P-b26-6 #3	贯入型	2.55	0.04	0.07	89.39	61.64	33.93	—	0.02	—	0.03	—	0.01	98.28
08P-b71 #1	贯入型	1.40	0.07	0.11	90.65	64.58	32.53	—	0.04	—	0.03	0.01	—	98.77
55ZK30b2 #1	贯入型	1.40	0.07	0.07	91.31	65.10	32.74	—	0.04	—	0.09	—	0	99.49
55ZK30b2 #2	贯入型	1.37	0.05	0.18	90.94	64.92	32.52	—	0.07	0.04	—	0.02	0.02	99.18
dc014b1 #2	贯入型	0.29	0.07	0.16	91.70	67.30	31.15	—	0.05	—	—	—	0.02	99.04
08p-b38 #1	贯入型	0.84	0.39	0.41	89.22	63.97	31.65	—	0.08	—	0.02	0.06	—	97.43
08p-b38 #2	贯入型	0.21	0.12	0.13	91.84	67.51	31.09	—	0.05	—	—	—	0.04	99.15

注：“—”表示样品检测结果低于仪器检测限。

续表 2
Cont. Table 2

样品测试号	类型	w(B)/%													总和
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFeO	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃		
dc1052#3	贯入型	0.30	0.12	0.30	90.10	65.97	30.74	—	0.06	—	0.02	0.03	0.02	97.56	
dc1052#4	贯入型	1.32	0.74	0.24	87.96	61.87	32.28	—	0.13	—	0.02	0.06	0.04	96.71	
79ZK4#1	贯入型	0.57	0.14	0.05	90.46	65.91	31.15	—	0.09	—	—	0.01	—	97.92	
79ZK4#2	贯入型	1.84	0.05	0.06	90.38	63.65	33.10	—	0.04	—	—	—	0.01	98.74	
lj-1w2#1	交代型	0.54	0.01	0.21	91.62	63.40	33.40	—	0.05	—	—	—	0.06	99.20	
lj-1w2#2	交代型	2.29	0.06	0.14	89.88	62.40	33.70	0.03	0.02	—	0.07	—	0.03	98.80	
lj-1w2#3	交代型	0.19	0.05	0.25	91.52	67.30	31.00	—	—	—	—	0.01	—	98.80	
dc1042#1	交代型	1.59	0.05	0.09	89.89	63.89	32.40	—	0.22	—	—	0.02	0.25	98.50	
dc1042#2	交代型	2.01	0.04	0.17	90.46	63.40	33.41	—	0.06	—	0.02	0.01	0.02	99.13	
60ZK7(307 m)#1	交代型	2.92	0.22	0.58	88.38	60.22	34.19	0.01	0.21	0.28	0.03	0.09	0.14	98.88	
60ZK7(307 m)#2	交代型	2.22	0.09	0.34	88.86	61.96	33.11	—	0.16	0.17	0.16	0.11	0.06	98.37	
60ZK7(307m)#3	交代型	1.46	0.03	0.15	90.45	64.40	32.51	—	0.07	—	0.04	0.02	0.02	98.70	
jkntwb4-1#1	交代型	0.33	0.08	0.14	91.59	67.14	31.09	0.02	0.08	—	0.04	0.04	0.04	98.99	
jkntwb4-1#2	交代型	0.73	0.09	0.21	90.78	66.08	31.32	0.06	0.15	0.12	0.01	0.02	0.01	98.79	
jkntwb4-1#3	交代型	0.13	0.04	0.07	92.19	68.08	30.93	—	0.08	—	—	—	0.02	99.35	
jkntw-b4-3#1	交代型	0.39	0.04	0.12	92.14	67.55	31.35	—	0.07	—	—	0.01	—	99.54	
jkntw-b4-3#2	交代型	0.64	0.08	0.20	90.88	66.26	31.26	—	0.15	0.08	0.08	0.02	0.02	98.79	
jkntw-b4-3#3	交代型	0.36	0.05	0.10	91.93	67.54	31.16	0.03	0.12	—	0.05	—	0.01	99.40	
08P-b39#2	交代型	2.00	0.05	0.14	90.29	63.25	33.38	—	0.04	—	0.06	0.02	—	98.94	
08P-b39#3	交代型	1.18	0.03	0.08	90.36	64.83	32.02	—	0.05	—	—	—	—	98.19	
dc199-1#1	交代型	2.65	0.04	1.03	87.48	60.56	32.99	0.05	0.31	0.62	0.11	0.09	—	98.44	
dc199-1#3	交代型	1.04	0.01	0.21	91.39	65.98	32.02	0.06	0.08	0.09	0.08	0.02	0.03	99.61	

注：“—”表示样品检测结果低于仪器检测限。

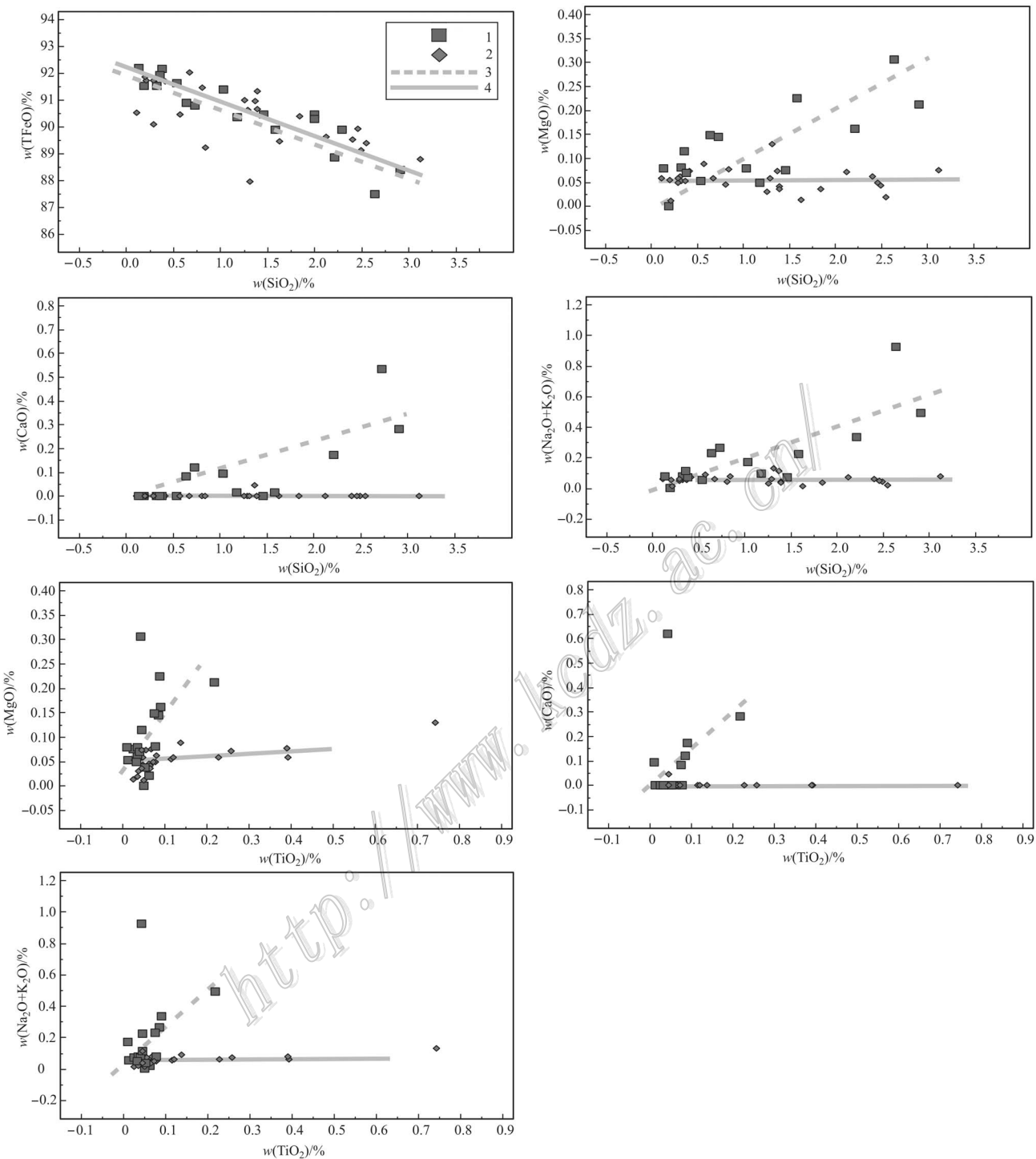


图 6 北衙金多金属矿床磁铁矿主量元素协变图解

1—交代型磁铁矿；2—贯入型磁铁矿；3—交代型磁铁矿协变趋势；4—贯入型磁铁矿协变趋势

Fig. 6 Covariation diagram of major oxides of magnetite by electron microprobe analysis in the Beiya gold-polymetallic deposit

1—Metasomatism type magnetite; 2—Filling type magnetite; 3—Variation trend of metasomatism type magnetite; 4—Variation trend of filling type magnetite

解释成矿早期阶段交代型铁矿较晚期铁矿相对亏损 LREE, 也暗示晚期贯入充填型铁矿与早期富 Cl 流

体气液交代成矿过程方面的差异。

磁铁矿的Ti/V比值因具有标型意义也常被作为

表 3 北衙金多金属矿床磁铁矿稀土元素测试数据结果表
Table 3 Rare element analyses (ICP-MS) of magnetite from the Beiya gold-polymetallic deposit

样品号	类型	$w(B)/10^{-6}$														LREE/HREE	
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	
08P-b26-6	贯入型	1.87	4.64	0.57	2.58	0.59	0.06	0.42	0.08	0.46	0.07	0.21	-	0.15	-	11.70	7.42
08p-b71	贯入型	0.65	1.50	0.20	1.10	0.44	0.10	0.53	0.12	0.78	0.14	0.38	-	0.33	-	6.27	1.75
dc1052	贯入型	0.97	1.28	0.26	1.33	0.50	0.11	0.59	0.14	0.90	0.18	0.51	0.06	0.40	0.06	7.29	1.57
08P-b38	贯入型	0.51	1.22	0.18	1.12	0.54	0.13	0.69	0.16	1.20	0.24	0.66	0.09	0.56	0.08	7.38	1.01
55ZK30-b3	贯入型	1.33	3.06	0.36	1.67	0.39	0.06	0.39	0.07	0.47	0.09	0.26	-	0.21	-	8.36	4.61
dc014-b1	贯入型	0.77	1.36	0.13	0.59	0.20	0.06	0.20	-	0.22	-	0.11	-	0.07	-	3.71	5.18
wcd-nbb10	贯入型	0.47	0.95	0.13	0.72	0.30	0.12	0.36	0.07	0.43	0.08	0.20	-	0.14	-	3.97	2.10
55ZK30-b2	贯入型	0.40	0.74	0.08	0.41	0.15	0.05	0.20	-	0.33	0.06	0.19	-	0.20	-	2.81	1.87
WDS-b1	贯入型	1.12	2.17	0.28	1.58	0.68	0.33	0.96	0.21	1.46	0.29	0.85	0.11	0.74	0.10	10.88	1.31
WDS-b2	贯入型	0.87	1.63	0.19	1.03	0.36	0.18	0.40	0.08	0.50	0.09	0.25	-	0.16	-	5.74	2.88
56ZK7-1b5	交代型	0.65	1.57	0.27	1.92	1.16	0.16	1.62	0.36	2.55	0.53	1.56	0.19	1.22	0.16	13.92	0.70
56ZK7-1(238 m)	交代型	0.43	1.05	0.14	0.96	0.48	0.51	0.66	0.15	1.05	0.21	0.60	0.08	0.49	0.07	6.88	1.08
60ZK7(307 m)	交代型	0.63	1.40	0.15	0.77	0.27	0.07	0.32	0.08	0.60	0.13	0.39	0.05	0.32	-	5.18	1.74
dc199-1	交代型	1.10	2.14	0.24	1.01	0.22	0.10	0.24	0.06	0.42	0.10	0.30	-	0.24	-	6.17	3.54
dc2003-b1	交代型	0.58	1.38	0.23	1.48	0.90	0.19	1.33	0.32	2.08	0.39	1.09	0.13	0.82	0.11	11.03	0.76

注：“-”表示样品检测结果低于仪器检测限。

表 4 北衙金多金属矿床磁铁矿微量元素测试数据结果表
Table 4 Trace element analyses (ICP-MS) of magnetite from the Beiya gold-polymetallic deposit

样品号	类型	$w(B)/10^{-6}$												
		Y	Rb	Sr	Ba	Cs	Ga	Nb	Ta	Zr	Hf	Th	V	Cr
08P-b26-6	贯入型	1.56	2.39	6.06	25.50	0.24	18.50	0.25	—	0.68	0.06	0.09	11.20	15.90
08p-b71	贯入型	3.87	4.29	7.11	15.50	1.09	24.50	0.56	0.07	1.69	0.08	0.26	36.30	31.40
dc1052	贯入型	4.80	1.66	5.39	9.19	0.61	27.50	2.23	0.09	3.79	0.09	0.78	43.10	22.60
08P-b38	贯入型	5.87	5.39	4.82	18.20	0.96	27.10	0.93	0.06	2.48	0.07	0.31	45.10	27.00
55ZK30b3	贯入型	2.05	1.68	1.48	2.97	0.10	51.90	6.04	0.22	2.82	0.36	0.42	368.00	41.60
dc014-b1	贯入型	0.93	1.63	2.93	26.10	0.33	15.40	0.23	—	0.89	0.09	0.08	47.50	37.50
wd-nhb10	贯入型	2.02	1.36	3.86	9.18	0.49	18.30	0.49	—	1.19	—	0.10	20.50	29.20
55ZK30b2	贯入型	1.56	0.56	2.66	5.34	0.05	18.00	1.17	—	4.11	0.11	0.38	189.00	4.35
WDS-b1	贯入型	7.55	10.60	5.41	10.20	1.42	21.60	1.23	0.06	3.69	0.11	0.17	31.00	11.70
WDS-b2	贯入型	2.81	0.48	6.75	15.10	0.16	9.75	0.45	0.05	3.74	0.08	—	38.90	10.10
56ZK7-1b5	交代型	15.10	0.80	21.80	118.00	0.39	37.00	0.80	0.09	6.29	0.18	0.18	31.00	11.80
56ZK7-1(238 m)	交代型	6.04	0.30	2.81	97.10	—	2.70	0.06	—	0.43	—	—	2.83	1.99
60ZK7(307 m)	交代型	3.05	0.56	4.12	9.54	0.24	22.80	1.42	0.07	2.75	0.12	0.27	22.60	24.80
dc199-1	交代型	3.05	5.18	14.80	25.10	0.54	29.80	1.73	0.12	50.50	1.40	0.42	56.10	43.10
jkmwrb4-1	交代型	0.38	1.19	3.96	22.30	0.20	88.70	3.85	0.10	8.63	0.23	0.12	79.50	37.60
dc2003-b1	交代型	10.50	0.94	15.30	7.90	0.24	30.60	0.77	0.07	3.68	0.09	0.15	27.80	27.60
jkmwrb4-3	交代型	0.51	2.33	1.55	25.30	0.05	13.60	0.61	—	1.20	—	0.16	141.00	5.82

注：“—”表示样品检测结果低于仪器检测限。

续表 4
Cont. Table 4

样品号	类型	$w(B)/10^{-6}$										V/Ti	Ni/Co	Ti/V
		Co	Ni	Sc	U	Ti	Sb	Ag	Cu	Zn	W			
08P-b26-6	贯入型	1.94	708.00	1.74	1.29	44.40	9.05	62.40	2.86	96.20	175.00	0.25	364.95	3.96
08p-b71	贯入型	3.80	32.40	2.88	2.32	75.70	10.20	1.97	19.70	26.00	107.00	0.48	8.53	2.09
dc1052	贯入型	1.80	85.20	2.03	2.38	234.00	7.87	1.10	71.00	244.00	29.10	0.18	47.33	5.43
08P-b38	贯入型	0.65	81.70	2.32	2.70	90.10	7.38	2.90	44.00	30.80	20.90	0.50	125.69	2.00
55ZK30b3	贯入型	77.90	131.00	5.45	1.15	1735.00	1.01	0.12	18.80	61.70	326.00	0.21	1.68	4.71
dc014-b1	贯入型	2.25	346.00	1.44	1.70	28.90	16.10	12.20	176.00	156.00	234.00	1.64	153.78	0.61
wd-nbb10	贯入型	3.73	30.60	1.58	2.15	56.10	14.00	3.80	114.00	95.00	56.90	0.37	8.20	2.74
55ZK30b2	贯入型	8.15	8.56	1.30	0.43	259.00	2.96	2.02	120.00	89.10	45.50	0.73	1.05	1.37
WDS-b1	贯入型	1.51	30.30	1.65	1.80	101.00	4.96	3.97	154.00	187.00	103.00	0.31	20.07	3.26
WDS-b2	贯入型	6.13	20.80	1.65	2.33	45.00	12.10	5.45	265.00	115.00	43.70	0.86	3.39	1.16
56ZK7-1b5	交代型	0.44	11.10	1.78	0.95	174.00	7.88	3.24	15.10	44.20	22.30	0.18	25.23	5.61
56ZK7-1(238 m)	交代型	0.13	4.47	1.12	—	16.80	0.35	0.09	6.49	52.20	0.69	0.17	34.38	5.94
60ZK7(307 m)	交代型	0.17	41.70	1.65	2.38	232.00	7.76	145.00	10.90	203.00	188.00	0.10	245.29	10.27
dc199-1	交代型	5.24	10.30	4.85	0.76	950.00	0.88	1.00	21.00	35.10	2.08	0.06	1.97	16.93
jkntwb4-1	交代型	5.38	10.30	1.99	1.67	662.00	1.25	1.74	35.20	34.10	147.00	0.12	1.91	8.33
dc2003-b1	交代型	0.51	42.20	2.07	1.58	142.00	9.67	2.64	4.88	34.40	181.00	0.20	82.75	5.11
jkntwb4-3	交代型	41.10	7.46	1.04	0.74	128.00	0.43	0.45	4.82	144.00	8.01	1.10	0.18	0.91

注：“—”表示样品检测结果低于仪器检测限。

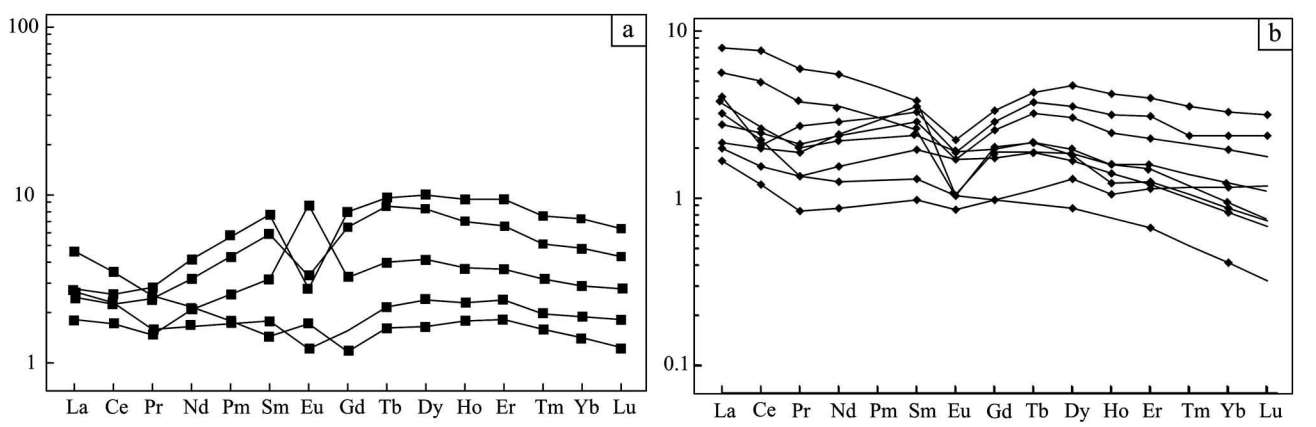


图 7 北衙矿区磁铁矿稀土元素配分曲线
a. 交代型磁铁矿；b. 贯入型磁铁矿
Fig. 7 REE pattern of magnetite in the Beiya deposit
a. Metasomatism type magnetite; b. Filling type magnetite

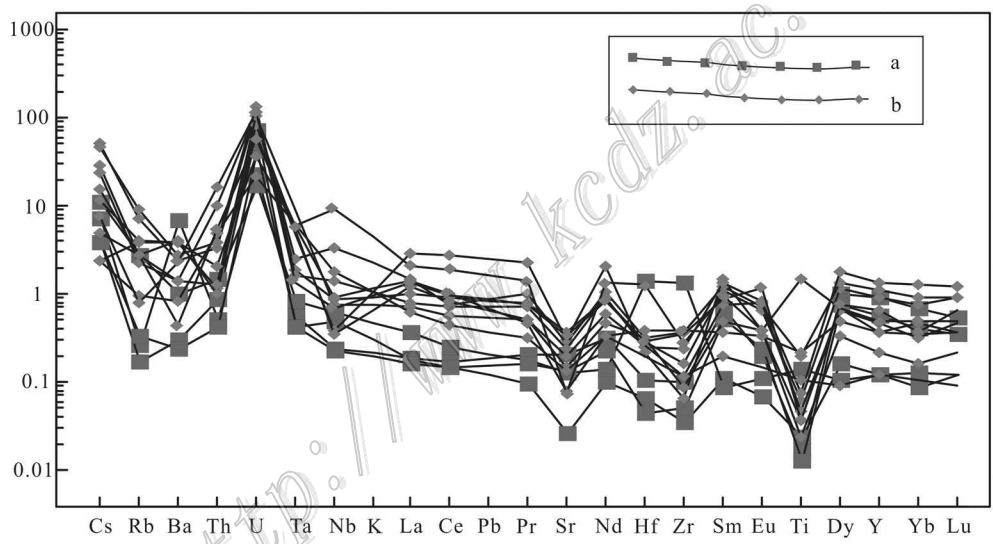


图 8 北衙矿区磁铁矿微量元素测试值蛛网对照图
a—交代型磁铁矿；b—贯入型磁铁矿
Fig. 8 Spider diagrams of trace elements from different magnetites in the Beiya deposit
a—Metasomatism type magnetite; b—Filling type magnetite

判断矿床成因的重要指示剂(徐国风等, 1979; 王奎仁, 1989; 陈光远等, 1989), 一般认为岩浆成因磁铁矿的 Ti/V 比值往往明显小于气液交代成因矿物。磁铁矿中 Ni 含量也是衡量成矿过程及成因的一个重要标志, 前人多认为岩浆成因磁铁矿的 $w(\text{Ni})$ 较高($100 \times 10^{-6} \sim 440 \times 10^{-6}$), 而气液交代成因磁铁矿中 $w(\text{Ni})$ 通常偏低(平均 30×10^{-6})。北衙矿床磁铁矿样品中, 交代型磁铁矿 Ti/V 比值较大(5.0~16.9), 显著区别于贯入充填型磁铁矿比值(1.30~3.30), 且前者 $w(\text{Ni})$ 平均为 21.90×10^{-6} , 远小于后者(平均 161.50×10^{-6}), 不同阶段和类型的磁铁矿样品 Ti/V 比值标型和 Ni 含量的差异在一定程度上也指示了两者的成矿过程及成因的不同。

前人研究证明, TiO_2 在磁铁矿中普遍存在, 其含量与形成的温度、压力密切相关, 无论在成岩作用或是成矿作用过程中, 随着温度和压力的降低, 磁铁矿单矿物 TiO_2 组分含量都是从高到低方向演化, 反映出其对不同地质作用具有明显的专属性(陈光远,

1987)。北衙矿床与富碱斑岩以及钙镁质碳酸盐岩围岩(北衙组灰岩、白云岩)关系密切,从北衙矿床磁铁铁矿主量元素协变图(图 6)可以看出,随着磁铁铁矿中 TiO_2 和 SiO_2 含量减少(即成矿作用的进行),交代型磁铁铁矿和贯入充填特征的磁铁铁矿表现出了明显不同的变化趋势:交代型样品的 TiO_2 、 SiO_2 含量与 CaO 、 MgO 、 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 含量呈线性正相关关系,暗示在成矿早期阶段,温度和压力等环境参数对于成矿气液流体的物质交代置换的约束;贯入充填特征的磁铁铁矿样品中 $w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{CaO})$ 、 $w(\text{Na}_2\text{O}) + w(\text{K}_2\text{O})$ 与 $w(\text{TiO}_2)$ 、 $w(\text{SiO}_2)$ 无相关关系,投点多呈密集团状和水平线状,矿物组分始终较稳定,表明稍晚期磁铁铁矿成矿与气液交代关系不大,成矿流体为相对较封闭的体系,矿质运移沉淀过程中没有其他物质进入或带出,其成矿与前者交代型磁铁铁矿有显著差异。

陈光远(1987)分析和统计了中国几千个典型矿床中磁铁铁矿单矿物化学分析的数据,提出磁铁铁矿的 $\text{Ti}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}$ 成因图解。林师整(1982)在前人图解的基础上,统计分析中国及世界上近 3000 个磁铁铁矿单矿物数据,作出 $\text{Ti}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-(\text{MgO} + \text{MnO})$ 三角成因图解。将北衙矿区磁铁铁矿电子探针分析数据投入林师整(1982)的 $\text{Ti}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-(\text{MgO} + \text{MnO})$ 成因三角图(图 9)中,可见交代型样品的数据投点基本分布于矽卡岩型(V)和接触交代型(IV)趋势区,印证了北衙矿床早期阶段磁铁铁矿的气液交代成因性;而贯入充填型磁铁铁矿明显区别于前者,除极少数散落在其他区间,投点基本处于岩浆型(II)区域,暗示其成因与早期成矿阶段的岩浆和氣液交代成矿作用关系不大,成因机制上同岩浆型矿床有一定共同点,可能与深源岩浆晚期演化分异有关。

北衙矿床中不同成矿阶段和不同类型的磁铁铁矿成分不尽相同,却也显示了一定的变化规律。

矿区各样品磁铁铁矿主量元素均具有贫 Ti、 V_2O_5 、Mn、Mg,富 Si 的特征,且两类磁铁铁矿的微量元素具有相似的蛛网曲线和一致的高场强元素(Zr、Hf、Nb、Ta)变化特征(图 8),指示北衙不同阶段和不同类型的铁矿具有相同的成矿物质来源,且具有连续演化的特征。

综上所述,根据成矿特征将北衙矿床铁矿成矿划分为早期气液交代成矿和后期富铁质流体贯入充填成矿,2 期铁矿具有相同的成矿物质来源,与富碱中酸性岩浆有密切成因联系。但在成矿过程和成因上具有较明显的差异,成矿早期阶段铁矿属矽卡岩成因,其形成主要受气液交代作用影响,伴随水

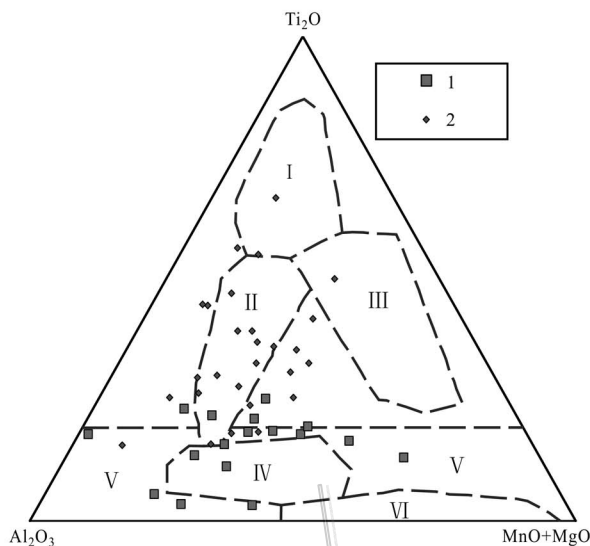


图 9 磁铁铁矿 $\text{Ti}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-(\text{MgO} + \text{MnO})$ 三角成因图解
(据林师整, 1982)

1—交代型磁铁铁矿; 2—贯入型磁铁铁矿; I—副矿物型; II—岩浆型; III—火山岩型; IV—接触交代型; V—矽卡岩型; VI—沉积变质型

Fig. 9 Genetic diagram of magnetite (after Lin, 1982)

1—Metasomatism type magnetite; 2—Filling type magnetite; I—Accessory mineral type; II—Magmatic type; III—Volcanic type; IV—Metasomatism type; V—Skarn type; VI—Sedimentary-metamorphism type

岩反应和大量矽卡岩矿物的生成而铁质大量析出沉淀;而晚期的成矿事件则以岩浆作用为主导,富铁质流体贯入充填于构造破碎带、断裂等构造薄弱空间。

4 成矿作用过程约束

北衙金多金属矿床地处扬子地台西缘以及青藏高原东缘的三江地区,青藏高原碰撞造山过程晚期,该地区深大断裂发生大规模走滑拉分以及印度大陆与扬子地块的相向俯冲和斜向碰撞,引发加厚下地壳的部分熔融和大规模的岩浆活动。北衙矿床在时空上受控于区内喜马拉雅期岩浆-热液成矿事件,是喜马拉雅期印度板块和欧亚板块陆陆碰撞造山带成矿作用在东南缘构造转换带的远程响应(薛传东等, 2008)。

北衙矿区铁矿床的产出规模较大,成矿物质来源及成因机制长期存在争议,主要有热液型、矽卡岩型和熔浆型等观点。肖晓牛等(2011)研究认为,北衙矿区铁矿床属于矽卡岩型和浅层热液型的复合成因矿床,成矿事件受控于整个斑岩热液成矿系统;和

文言等(2012)认为,北衙矿区铁矿床是与喜马拉雅期富碱斑岩有关的矽卡岩型矿床,气液交代作用是矿区铁矿最主要的成矿过程,而 Xu 等(2007)认为矿区存在熔浆成因的铁矿,其成矿可能与基性岩浆活动有关(徐兴旺等,2006b,2007;Xu et al.,2007)。

在对北衙矿区铁矿床特征的研究中,笔者划分出的 2 期铁矿在产出位置、接触关系以及矿石结构构造方面不同,磁铁矿的元素地球化学特征也存在一定差异。前述研究表明,早期成矿与气液交代关系密切,是矽卡岩成因,而晚期铁矿发育高温气液充填特征,岩浆作用为主导,以富铁流体贯入形式成矿。早期矿质来自侵入岩浆气液交代作用,为矿床供给铁,但这种地质作用不是北衙矿床形成的唯一供给机制。晚期成矿物质主要源于富铁质流体,前人研究认为这种富铁质流体贯入成矿的铁质主要源自岩浆分异、演化后期的高温气液充填成矿(吴言昌,1998)。赵斌等(1993)进行的高温高压熔融结晶实验也为高温富铁流体的形成提供了有力的理论依据。

北衙矿床作为矽卡岩-高温气液充填成因矿床,矿源和成因方面均与富碱岩浆直接相关。北衙地区深部富含铁质的高温高压碱性岩浆在内、外动力的共同作用下,在有利的导岩深断裂的配合下,上侵入富含钙质的北衙组碳酸盐岩地层。岩浆析出大量含矿热液与围岩发生气液交代作用,于接触带附近形成接触交代(矽卡岩)型矿体,同时,岩浆顶部发生的气液隐爆作用和岩体冷凝收缩造成的有利构造部位或虚脱部位为后期矿体的就位提供了空间。在岩浆分异、演化后期,岩浆在高位岩浆房通过顶蚀和捕掳灰岩(白云质灰岩),铁氧化物从硅酸盐熔体中分离演化形成高温富铁质气液流体,在梯度压力的动力驱使下,沿通道往低压方向迅速集中,温度和压力的迅速降低以及 pH 值和 E_h 值的变化,促使大量铁的络合物分解沉淀(陈艳等,2012),于早期围岩和岩体中破碎带、虚脱空间、裂隙带等部位以充填贯入方式成矿。

5 结 论

(1) 矿区磁铁矿具有类似的微量元素蛛网曲线和一致的高场强元素(Zr 、 Hf 、 Nb 、 Ta)变化特征,指示北衙不同特征和不同期次的铁矿拥有同一成矿物质来源。

(2) 北衙矿床磁铁矿矿物具有贫 Ti、V、Mn、Mg,富 Si 的特征,明显区别于基性-超基性岩浆相关铁矿,指示其成因上与基性-超基性岩浆关系不大,与富碱中酸性岩浆相关。

(3) 北衙矿床铁矿成矿过程包括早期气液交代和后期富铁质流体贯入充填 2 期。单矿物地球化学特征表明,早期铁矿属矽卡岩成因,其形成主要受气液交代作用影响,晚期的成矿事件则以岩浆作用为主导。

志 谢 本次研究工作在野外地质调查期间得到了云南黄金集团北衙分公司领导和前辈的大力支持,在研究和成文过程中得到了尹福光、范文玉、李佑国、林方成研究员的有益指点和启示,文章修改过程中得到了侯林博士的帮助,匿名审稿专家对文章提出了非常宝贵的修改意见,在此向上述专家、同仁表示衷心感谢。

References

- Bi X W, Hu R Z, Peng J T and Wu K X. 2004. REE and HFSE geochemical characteristics of pyrites in Yaoan gold deposit: Tracing ore forming fluid signatures[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 23(1): 1-4 (in Chinese with English abstract).
- Chen G Y. 1987. *Genetic mineralogy and prospecting mineralogy*[M]. Chongqing: Chongqing Press. 1-874 (in Chinese).
- Chen G Y, Shao W and Sun D S. 1989. *Genetic mineralogy of gold deposits in Jiaodong region with emphasis on gold prospecting*[M]. Chongqing: Chongqing Press. 1-70 (in Chinese).
- Chen Y and Zhang Z C. 2012. Study on source, transport and the enrichment mechanism of iron in iron skarn deposits[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 31(5): 889-897 (in Chinese with English abstract).
- He W Y, Yu X H, Mo X X, He Z H, Li Y, Huang X K and Su G S. 2012. Genetic types and the relationship between alkalirich intrusion and mineralization of Beiya gold-polymetallic ore field, western Yunnan Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1401-1412 (in Chinese with English abstract).
- Li Y. 2011. The metallogenic geochemistry and significance of prospecting of gold polymetallic ore concentration area in Beiya in western Yunnan Province (Thesis of Master's degree [D]). Supervisor: Yu X H. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with Eng-

- lish abstract).
- Lin S Z. 1982. A contribution to the chemistry , origin and evolution of magnetite[J]. *Acta Mineralogica Sinica* ,(3): 166-174(in Chinese with English abstract).
- Liu J Y. 2004. Geologic features and ore prospecting significances of lamprophyre in Beiya gold district[J]. *Gold Geological* , 10(1): 20-23(in Chinese with English abstract).
- Liu X F , Liu J D , Zhang G J , Yang Z X , Wu D C and Li Y G. 2004. Isotopic geochemistry of rock mass and ore-vein from alkali-rich porphyry type deposits in western Yunnan , China[J]. *Bulletin of Mineralogy , Petrology and Geochemistry* , 23(1): 32-39(in Chinese with English abstract).
- Rusk B , Oliver N , Brown A , Lilly R and Jungmann D. 2009. Barren magnetite breccias in the Cloncurry region , Australia ; comparisons to IOCG deposits[A]. In : Williams P J , ed. *Smart science for exploration and mining* [C]. Townsville : Proc. 10th Biennial Meeting. 656-658.
- Singoyi B , Danyushevsky L , Davidson G J , Large R and Zaw K. 2006. Determination of trace elements in magnetites from hydrothermal deposits using the LA-ICP-MS technique[EB]. Denver , USA : SEG Keystone Conference , CD-ROM.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts : Implications for the mantle composition and processes[A]. In : Saunders A D and Norry M J , eds. *Magmatism in ocean Basin*[C]. Geological Society. London : London Special Publication. 313-345.
- Wang K R. 1989. *Earth and universe genetic mineralogy*[M]. Hefei : Anhui Educational Publishing House. 1-210(in Chinese).
- Wu Y C and Chang Y F. 1998. On the magmatic skarn[J]. *Earth Science Frontiers* ,(4): 291-301(in Chinese with English abstract).
- Xiao X N , Yu X H , Mo X X , Huang X K and Li Y. 2009a. A study of fluid inclusion from Beiya gold-polymetallic deposit in western Yunnan[J]. *Earth Science Frontiers* , 16(2): 250-261(in Chinese with English abstract).
- Xiao X N , Yu X H , Mo X X , Yang G L , Li Y and Huang X K. 2009b. Geochemistry , zircon SHRIMP U-Pb dating and origin of alkali-rich porphyries in Beiya area , north Erhai Lake , western Yunnan , China[J]. *Geological Bulletin of China* , 28(12): 1786-1803(in Chinese with English abstract).
- Xiao X N , Yu X H , Mo X X , Huang X K and Li Y. 2011. Geochemical characteristics of metallogenesis in the gold-polymetallic deposit in Beiya , western Yunnan Province[J]. *Geology and Prospecting* , 47(2): 170-179(in Chinese with English abstract).
- Xu G F and Shao J L. 1979. The typomorphic characteristics of magnetite and its significance[J]. *Geology and Prospecting* ,(3): 30-37(in Chinese with English abstract).
- Xu S M. 2007. Metallogenic modeling of the Beiya gold deposit in western Yunnan and its relation to the Cenozoic alkali-rich porphyries(Thesis of doctoral degree) [D]. Supervisor : Mo X X and Zeng P S. Beijing : China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Xu X W , Cai X P , Song B C , Zhang B L , Ying H R , Xiao Q B and Wang J. 2006a. Petrologic , chronological and geochemistry characteristics and formation mechanism of alkaline porphyries in the Beiya gold district , western Yunnan[J]. *Acta Petrologica Sinica* , 22(3): 631-642(in Chinese with English abstract).
- Xu X W , Cai X P , Zhang B L , Liang G H , Du S J and Wang J. 2006b. Genetic types of Beiya gold deposit in western Yunnan[J]. *Mineral Deposits* , 25(Supp.): 201-204(in Chinese with English abstract).
- Xu X W , Cai X P and Xiao Q B. 2007. Porphyry Cu-Au and associated polymetallic Fe-Cu-Au deposits in the Beiya area , western Yunnan Province , South China[J]. *Ore Geology Reviews* ,(31): 224-246.
- Xu X W , Cai X P , Zhang B L , Liang G H , Du S J and Wang J. 2007. Genetic types and framework model of Beiya gold ore district in western Yunnan[J]. *Mineral Deposits* , 26(3): 249-264(in Chinese with English abstract).
- Xue C D , Hou Z Q , Liu X , Yang Z M , Liu Y Q and Hao B W. 2008. Petrogenesis and metallogenesis of the Beiya gold-polymetallic ore district , northwestern Yunnan Province , China : Responses to the into-Asian collisional processes[J]. *Acta Petrologica Sinica* , 24(3): 457-472(in Chinese with English abstract).
- Yunnan Bureau of Geology and Mineral Resources. 1990. *Regional geological annals of Yunnan Province* [M]. Beijing : Geological Publishing House(in Chinese).
- Zhao B , Zhao J S and Zhang C Z. 1993. Experimental evidence of magmatic skarn[J]. *Chinese Science Bulletin* , 38(21): 1986-1989(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 吴开兴. 2004. 黄铁矿微量元素地球化学特征及其对成矿流体性质的指示[J]. *矿物岩石地球化学通报* , 23(1): 1-4.
- 陈光远. 1987. *成因矿物学与找矿矿物学* [M]. 重庆 : 重庆出版社.

- 1-874.
- 陈光远,邵伟,孙岱生. 1989. 胶东成因矿物学与找矿[M]. 重庆:重庆出版社. 1-70.
- 陈艳,张招崇. 2012. 矽卡岩型铁矿的铁质来源与迁移富集机理探讨[J]. 岩矿测试, 31(5): 889-897.
- 和文言,喻学惠,莫宣学,和中华,李勇,黄行凯,苏纲生. 2012. 滇西北銻金多金属矿田矿床成因类型及其与富碱斑岩关系初探[J]. 岩石学报, 28(5): 1401-1412.
- 李勇. 2009. 滇西北銻金多金属矿集区成矿地球化学特征及找矿意义(硕士学位论文[D]. 导师 喻学惠. 北京:中国地质大学. 1-55.
- 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.
- 刘建云. 2004. 云南北銻金矿煌斑岩地质特征及找矿意义[J]. 黄金地质, 10(1): 20-23.
- 刘显凡,刘家铎,张成江,阳正熙,吴德超,李佑国. 2004. 滇西富碱斑岩型矿床岩体和矿脉同位素地球化学研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, (23): 32-39.
- 王奎仁. 1989. 地球与宇宙成因矿物学[M]. 合肥:安徽教育出版社. 1-210.
- 吴言昌,常印佛. 1998. 关于岩浆矽卡岩问题[J]. 地学前缘, 5(4): 291-301.
- 肖晓牛,喻学惠,莫宣学,杨贵来,李勇,黄行凯. 2009a. 滇西北銻金多金属矿床流体包裹体研究[J]. 地学前缘, (2): 250-261.
- 肖晓牛,喻学惠,莫宣学. 2009b. 滇西洱海北部北銻地区富碱斑岩的地球化学锆石 SHRIMP U-Pb 定年及成因[J]. 地质通报, (28): 1786-1803.
- 肖晓牛,张少勇,李勇. 2011. 滇西北銻多金属矿床成矿模式初探[J]. 有色金属矿山部分, (63): 8-11.
- 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.
- 徐受民. 2007. 滇西北銻金矿床的成矿模式及与新生代富碱斑岩的关系(博士学位论文[D]. 导师 莫宣学,曾普胜. 北京:中国地质大学. 26-43.
- 徐兴旺,蔡新平,宋保昌,张宝林,应汉龙,肖骑彬,王杰. 2006a. 滇西北銻金矿区碱性斑岩岩石学、年代学和地球化学特征及其成因机制[J]. 岩石学报, 22(3): 631-642.
- 徐兴旺,蔡新平,张宝林,梁光河,杜世俊,王杰. 2006b. 滇西北銻金矿矿床成因类型[J]. 矿床地质, (S1): 201-204.
- 徐兴旺,蔡新平,张宝林,梁光河,杜世俊,王杰. 2007. 滇西北銻金矿矿床类型与结构模型[J]. 矿床地质, 26(3): 249-264.
- 薛传东,侯增谦,刘星,杨志明,刘勇强,郝百武. 2008. 滇西北北銻金多金属矿田的成岩成矿作用:对印-亚碰撞造山过程的响应[J]. 岩石学报, 24(3): 457-472.
- 云南省地质矿产局. 1990. 云南省区域地质志[M]. 北京:地质出版社.
- 赵斌,赵劲松,张重泽. 1993. 岩浆成因矽卡岩的实验依据[J]. 科学通报, 38(21): 1986-1989.