

磁铁矿单矿物研究现状、存在问题和研究方向

陈华勇, 韩金生

中国科学院 广州地球化学研究所, 矿物学与成矿学重点实验室, 广州 510640

摘要: 磁铁矿在自然界分布广泛, 是重要的成岩矿物和矿石矿物。磁铁矿的物理化学特征一直是研究的热点, 尤其是近年来随着单矿物激光 ICP-MS 测试技术的成熟, 利用磁铁矿的微量元素特征进行矿床成因机制研究已成为矿床学研究的前沿, 已取得一系列成果。本文对这些成果进行了综述和介绍, 同时也指出在开展这一研究中面临的主要问题, 如分析方法不一致, 缺乏重要的铁矿床类型实例, 物理结构研究薄弱和勘查应用研究亟待加强等, 并认为这些问题的解决应是今后开展磁铁矿研究的重要方向。

关键词: 磁铁矿; 物理化学特征; 存在问题; 研究方向

中图分类号: P578.4⁺6 文章编号: 1007-2802(2015)04-0724-07 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2015.04.006

Study of Magnetite: Problems and Future

CHEN Hua-yong, HAN Jin-sheng

Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

Abstract: Magnetite occurs widely in nature and acts as an important mineral for rock-forming and ore. Intensive studies have been conducted on its physical and chemical features. With the development of new technique on single mineral analysis, such as Laser ICP-MS, exploring the ore genesis using trace elements of magnetite is becoming a frontier field of ore deposit study, and numerous excellent results have been achieved in recent years. However, a series of problems have been recognized, such as the inconsistent of analytical methods, lack of important Fe deposit types, little attention on mineral structures and weak application on mineral exploration. Nonetheless, these problems also point out the directions for the future study on magnetite.

Key words: magnetite; physical and chemical features; problems; future study

1 磁铁矿在矿床学研究中的重要意义和研究现状

在各类不同岩性单元中, 从基性玄武质岩石到较氧化的酸性花岗岩类, 都含有较多的磁铁矿。磁铁矿也是重要的矿石矿物, 在全球已知的铁矿类型中, 除氧化作用较强的矿床外, 磁铁矿多为最主要的矿石矿物, 如岩浆作用形成的攀枝花钒钛磁铁矿、Kiruna 型磁铁矿; 岩浆热液作用形成的矽卡岩型磁铁矿、IOCG 型磁铁矿、海相火山岩型磁铁矿; 沉积作用形成的 BIF 磁铁矿等。而在很多其他类型矿床中(特别是岩浆热液矿床)虽然没有形成具有经济价值的磁铁矿体, 但仍发育相当数量的磁铁矿,

如斑岩型铜金矿中, 常可见磁铁矿脉和较发育的磁铁矿蚀变带。许多矽卡岩铜金矿床中磁铁矿常以蚀变矿物出现。由此可见, 磁铁矿是非常重要的金属矿物, 对岩石及矿床的成因具有重要指示意义, 它在不同成岩成矿系统中的广泛发育为进行成岩成矿机制研究提供了独特的研究窗口, 也为找矿勘查提供了有效手段。

磁铁矿作为重要成岩成矿矿物, 其物理和化学成分特征研究长期以来备受关注。对磁铁矿的矿物学研究可以追溯到 100 多年前(Bragg, 1915), 对于磁铁矿稳定性和化学成分的研究则也持续了半个多世纪(Ramdohr, 1957; Vincent and Phillips, 1954), 并且在上世纪 60~80 年代达到高潮(Bud-

收稿日期: 2015-04-21 收到, 2015-05-13 改回

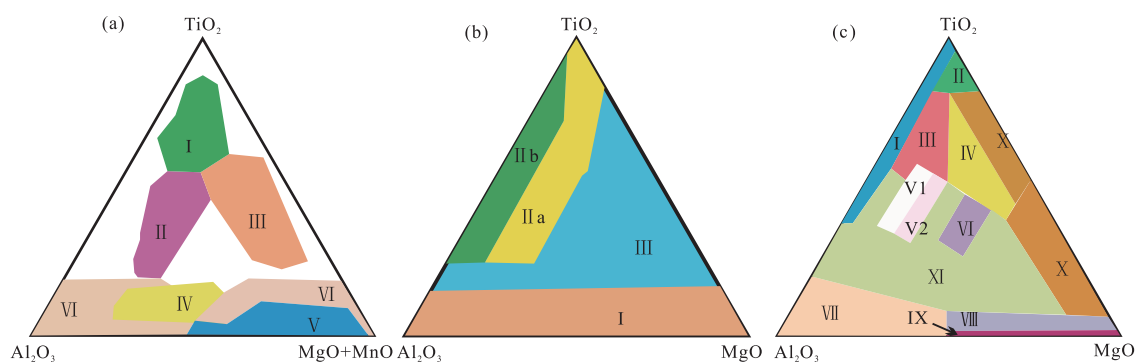
基金项目: 国家重大基础研究发展计划项目(2014CB440802)

第一作者简介: 陈华勇(1976-), 男, 研究员, 研究方向: 矿床学及找矿勘探. 获第 15 届侯德封青年科学家奖. E-mail: huayongchen@gig.ac.cn.

dington and Lindsley, 1964; Annersten, 1968; Prins, 1973; Shcheka *et al.*, 1977)。随着磁铁矿研究的深入,一些具有指示性的物理化学特征被发现,如岩浆磁铁矿常含有较高 Ti 含量等,这些发现被逐渐运用到成岩成矿机制研究、矿床分类和勘查应用中(Lindsley, 1981; Grant, 1985; Sack and Ghiorso, 1991; Razjigaeva and Naumova, 1992; MacClellan *et al.*, 2006; Dupuis and Beaudoin, 2011)。中国学者在磁铁矿研究方面起步较早,并在 70~80 年代已经对磁铁矿的物理和化学标型特征进行较为系统的研究和总结。如沈保丰等(1979)对冀南、晋东南、晋南等地与燕山期侵入岩相关的接触交代型磁铁矿床中磁铁矿化学成分的研究;徐国风等(1983)对河南某斑岩型多金属矿床中磁铁矿矿物标型特征的研究;叶庆同(1982)对粤东一些不同成因类型铁矿床中磁铁矿标型特征的研究。徐国风和邵洁莲(1979)、林师整(1982)、陈光远等(1987)和王顺金(1987)则对当时国内外已有的磁铁矿物理化学测试数据进行了较为全面的对比研究和总结,提炼出了一些实用性较强的标型特征,并应用于矿床成因探讨、矿床类型划分和勘查找矿实践。其中一些图解(如 TiO_2 - Al_2O_3 - MgO 磁铁矿成因三角图)可以对不同成岩环境、成矿类型进行了有效区分,至今仍然被国内学者广泛使用(图 1)。虽然由于测试手段的限制(特别是 90 年代以前化学成分主要只能通过单矿物溶液和初步的电子探针得到主量元素,而且微量元素数据极少),这些已有的磁铁矿数据和得出的成因判别图解可能存在准确性不够的问题,但这些尝试已经为磁铁矿物理化学特征在成岩成矿指示方面

的研究以及勘查应用奠定了良好基础,并起到了较好的指导效果。

进入 21 世纪以来,特别是近 10 年来,由于单矿物微束微区测试技术的飞速发展,扫描电镜、高精度电子探针和激光 ICP-MS 等仪器的出现,使得准确快速的单矿物高精度元素测试成为现实,从而掀起了磁铁矿物理化学特征,特别是微量元素化学成分方面的新一轮研究热潮。关于磁铁矿化学成分的研究(以激光 ICP-MS 测试为主)在最近 2~3 年达到高峰,已经有 20 多篇相关论文在 *Economic Geology*、*Mineralium Deposita*、*Ore Geology Reviews*、《岩石学报》、《矿物学报》、《矿床地质》等矿床学重要期刊上相继发表。在这些已发表的成果中,多以单个铁矿床或某个地区不同矿床(或地质单元)中的磁铁矿化学成分分析为主,其中单个矿床研究如:应立娟等(2006)对新疆阿尔泰乔夏哈拉铁铜金矿床磁铁矿化学成分标型特征的研究;段超等(2012)对宁芜矿集区凹山玢岩型铁矿床进行的磁铁矿元素地球化学特征的分析研究;王志华等(2012)对西天山智博铁矿床磁铁矿成分特征的研究;Dare 等(2012)对智利著名的 El Laco 铁矿磁铁矿成分特征的研究;洪为等(2012)对新疆西天山查岗诺尔铁矿床磁铁矿矿物学特征的研究;Huang 等(2013)对新疆磁海铁矿的研究;侯林等(2013)对滇中迤纳厂铁铜矿床磁铁矿元素地球化学特征的研究;张立成等(2013)对东天山红云滩铁矿磁铁矿的研究;张聚全等(2013)对冀南邯邢地区白涧和西石门矽卡岩型铁矿磁铁矿成因矿物学研究;黄晓文等(2013)对东天山黑峰山、双峰山及沙泉子(铜)铁矿床磁铁矿成



(a): I-副矿物型; II-岩浆熔离钛磁铁矿型; III-火山岩型; IV-接触交代型; V-矽卡岩型; VI-沉积变质型(林师整, 1982); (b): I-沉积变质-接触交代磁铁矿; II-超基性-基性-中性岩浆磁铁矿; III-酸性-碱性岩浆磁铁矿(陈光远等, 1987); (c): I-花岗岩区(酸性岩岩、伟晶岩); II-玄武岩区(拉斑玄武岩等); III-辉长岩区(辉长岩、橄榄岩、二长岩、斜长岩-副矿物及铁矿石); IV-橄榄岩区(橄榄岩、纯橄榄岩、辉岩等副矿物及铁矿石); V1-角闪岩区(包括单斜辉石岩); V2-闪长岩区; VI-金伯利岩区; VII-热液型及钙矽卡岩型(虚线以上主要为深成热液型, 以下为热液型及矽卡岩型); VIII-热液型及镁矽卡岩型(其中热液型为深成热液型, 部分为热液交代型); IX-沉积变质, 热液叠加型; X-碳酸盐岩区(靠上部者与基性岩有关, 靠下部者与围岩交代有关); XI-过渡区(王顺金, 1987)

图 1 中国学者提出的磁铁矿成因判别图解(据王敏芳等, 2014)

Fig.1 Discrimination diagrams (China) for the genesis of Magnetite(after Wang Minfang *et al.*, 2014)

分的研究;吕书君等(2013)对新疆准噶尔北缘托斯巴斯套铁铜金矿床磁铁矿的研究;Hu 等(2014)对大冶地区程潮铁矿磁铁矿结构与成分的研究;曾红等(2014)对新疆雅满苏铁矿床磁铁矿矿物学特征的研究;余宇伟等(2014)对四川太和富磷灰石钒钛磁铁矿的研究;孟旭阳等(2014)对河南窑场和辽宁思山岭铁矿磁铁矿矿物学对比研究;Huang 等(2015a)对新疆天湖铁矿的研究;Zhao 和 Zhou(2015)对广东怀集藤铁铁矿的研究;以及 Huang 等(2015b)对白云鄂博稀土矿中磁铁矿研究等。区域性的研究如:Nadoll 等(2012)对美国北部中元代变质带地质单元和所含矿床磁铁矿成分研究;Nadoll 等(2014)对美国西南部一些斑岩和矽卡岩矿床中磁铁矿成分研究;兰彩云等(2013)对河南舞阳铁山庙式 BIF 铁矿磁铁矿矿物学与地球化学特征研究;Chen 等(2015a)对中国康滇地区元古代铁铜金矿床磁铁矿成分研究;Chen 等(2015b)对印度北部 Khetri 铁铜矿区的研究;Liu 等(2015)对峨眉山大火成岩省含钒钛磁铁矿的层状岩体研究;Chung 等(2015)对加拿大拉布拉多 Sokoman 铁建造的研究等。

在这些研究中,磁铁矿高精度微量元素成分多为首次获得并被运用到矿床成因机制的探讨中。对于一些矿床成因中争论已久的问题,磁铁矿成分特征起到了较好的指示作用,如智利 El Laco 和大冶程潮铁矿的研究表明,这些矿床的磁铁矿特征指示其可能属于热液型矿床,而并非之前所认为的岩浆型(Dare *et al.*, 2012; Hu *et al.*, 2014; 胡浩等, 2014)。区域性研究发现,磁铁矿微量元素成分对含矿与不含矿地质体的区分也具有指示意义(Rusk *et al.*, 2009; Nadoll *et al.*, 2012)。而对于一些成因较复杂的矿床,磁铁矿微量元素地球化学数据指示其可能经历多阶段的流体演化过程,如白云鄂博稀土矿中条带状矿石、块状矿石和浸染状矿石所含磁铁矿微量元素差异明显,可能代表了不同性质的成矿流体(Huang *et al.*, 2015b)。

近年来,基于大量较新的磁铁矿化学成分数据,一些对比总结性的成果也相继出现,其中较有影响力的是 Dupuis 和 Beaudoin(2011)提出的不同类型矿床磁铁矿成分判别图解(图 2);Dare 等(2014b)提出的利用磁铁矿微量元素地球化学进行成岩环境判别;Nadoll 等(2014)进行的关于热液磁铁矿成分研究总结。在其中对 Dupuis 和 Beaudoin(2011)提出的矿床类型判别图解进行了修正。虽

然还需完善,这些总结性成果问世后立即受到高度重视,例如 Dupuis 和 Beaudoin(2011)提出的判别图解发表 3 年来已经被引用超过 70 次。近年来发表的关于单个矿床和区域性磁铁矿成分研究实例中几乎都参考了该文中所提出的 $\text{Ca}+\text{Al}+\text{Mn}$ 和 $\text{Ti}+\text{V}$ 判别图解。利用这些图解,可以进行不同成岩环境的区分,如利用 $\text{Ti}-\text{Ni}/\text{Cr}$ 区分岩浆磁铁矿与热液磁铁矿以及不同岩性所含磁铁矿(Dare *et al.*, 2014a)。更重要的是协助判别成矿类型,如利用 $\text{Ca}+\text{Al}+\text{Mn}-\text{Ti}+\text{V}$ 和 $\text{Ni}/(\text{Cr}+\text{Mn})-\text{Ti}+\text{V}$ 磁铁矿成分判别图解区分矽卡岩型、斑岩型、IOCG 型、BIF 型、Kiruna 型和钒钛磁铁矿型等不同含磁铁矿成矿系统(图 2; Dupuis and Beaudoin, 2011)。由此可见,对于磁铁矿物理化学成分特征的精细研究以及其在矿床成因、找矿勘查方面的应用依然是当前矿床学研究的热点之一。

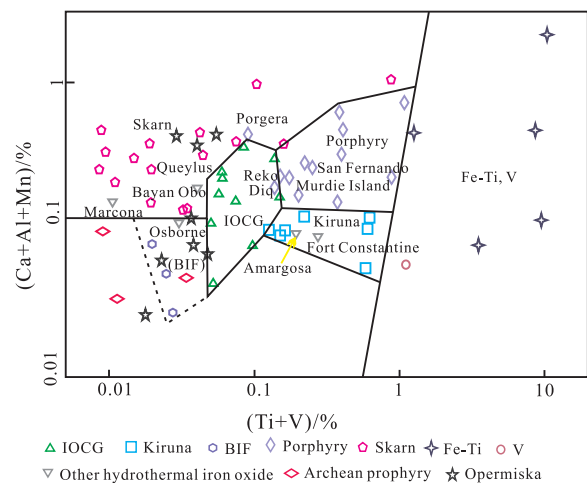


图 2 目前国际上最常用的磁铁矿成因判别图解
(据 Dupuis and Beaudoin, 2011)

Fig.2 The most widely used discrimination diagram for the genesis of Magnetite (after Dupuis and Beaudoin, 2011)

2 当前磁铁矿标型特征研究中存在的问题和未来研究方向

目前,磁铁矿物理化学特征,特别是微量元素地球化学研究近些年取得了突飞猛进的发展,但仍然存在一些重要问题有待解决,这也为磁铁矿物理化学标型特征的进一步研究提供了空间并指明了方向。这些问题主要体现在:

2.1 分析方法不一致与数据质量的差异

在 90 年代以前的磁铁矿成分研究多以单矿物溶液法和低精度电子探针分析为主,一般多利用主量元素(注:文中所指的磁铁矿主量元素是指电子

探针通常能检测的元素),微量元素则由于单矿物中可能含有各种包体杂质等很难保证质量。90年代以后,高精度电子探针,特别是激光 ICP-MS 测试手段使得磁铁矿化学成分测试在数据质量上得到很大提高,但目前发表的几个重要总结性成果以及所得出的判别图解是从不一致的成分数据库得到的,如 Dupuis 和 Beaudoin(2011)所有数据均为电子探针测试数据,而且由于电子探针精度不够,很多测试低于检测限(很多元素检测限可高达 500×10^{-6}),导致该文中采用了比较特殊的平均值计算方法,而这些平均值是成矿类型判别图解边界划分(图 2)的依据。此外,同一分析方法测试数据差距很大,比如同样使用电子探针针对 Kiruna 型矿床磁铁矿样品进行测试, Dupuis 和 Beaudoin(2011)和 Nystrom 和 Henriquez(1994)得出了差距很大的数据。如前者 Ti 含量平均值在 1500×10^{-6} 左右,而后者则只有 500×10^{-6} ,这显然对之后的数据对比总结和成因机制探讨产生一定影响。不仅如此,不同分析方法对同一样品测试数据也可能不同。如 El Laco 铁矿研究中,块状磁铁矿 Ca 元素电子探针数据(3428×10^{-6})与激光 ICP-MS 数据(961×10^{-6})相差近 4 倍(Dare et al., 2012)。显然,如果不仔细核对所有测试数据,保证其准确性,并分析不同数据库、不同测试手段导致差异的原因,将有可能对之后的成因解释和判别图解得出错误认识。此外,虽然电子探针和激光 ICP-MS 是当前单矿物测试的最主要手段,但不同实验仪器状态、样品本身的特性、标样的选取等都可能对建立统一的磁铁矿元素含量数据库提出挑战。

2.2 最新的判别图解中铁矿床类型尚不完整

目前国际上应用最广泛的磁铁矿成分矿床类型判别图解是由 Dupuis 和 Beaudoin(2011)提出的,并由 Nadoll 等(2014)进行了一定的修正。Dupuis 和 Beaudoin(2011)利用电子探针测试方法对全球 111 个矿床的磁铁矿进行了系统测试并获得了 2000 多个测试数据,他们将这些矿床划分为 13 个成矿类型,包括:IOCG 型矿床、Kiruna 型铁矿、BIF 型铁矿、斑岩铜矿、太古代斑岩铜金矿、太古代 Opemiska 型脉状铜矿、矽卡岩型铁-铜-铅-锌矿、岩浆硫化物型铜-镍-铂族矿床、VMS 型铜锌矿床、沉积岩赋存铅锌矿、铬铁矿、钒钛磁铁矿和钒矿床。可以看出,这些矿床的选择多为北美和北欧分布较广的典型矿床,而且大部分并非有经济价值的铁矿床,而只是含有一定的磁铁矿的成矿系统,如斑岩矿床、铅锌矿和铜镍硫化物矿床等,这对由此得出的磁铁矿成

矿类型判别图解必然有限制作用。在 Nadoll 等(2014)进行的全球热液磁铁矿化学成分特征总结和判别图修正中,大量使用了最新获得激光 ICP-MS 数据,使得数据库(特别是微量元素)在质量上有很大提高。新增加的数据主要来自 5 个不同地质单元,包括:条带状铁建造(BIF)和西澳、印度和巴西等地相关高品位铁矿床;美国 Coeur d'Alene 地区脉状银铅锌矿床;美国西南部和印尼 Grasberg 地区斑岩型铜(金-钼)矿床和相关的钙-镁矽卡岩矿床;美国 Henderson-Climax 型钼矿和日本 Inner Zone Batholith 的非矿化侵入岩。可以看到,这些新数据的来源仍然比较局限于少量成矿单元,而且新数据中有 80% 以上是来自 BIF 和斑岩型矿床,其他几个单元,包括矽卡岩铁矿的数据较少。这使得利用激光 ICP-MS 新数据对 Dupuis 和 Beaudoin(2011)电子探针数据所得到的判别图解进行修正的效果较小。实际上,在近两年发表的磁铁矿化学成分研究实例中,利用 Dupuis 和 Beaudoin 的图解进行成因判别时经常会出现较大偏差,如滇中迤纳厂 IOCG 矿床落入判别图中 BIF 区(Chen et al., 2015a);新疆天湖铁矿落入 BIF 和 IOCG 区(Huang et al., 2015a);新疆智博铁矿的磁铁矿样品则落入 IOCG、矽卡岩、BIF 和 Kiruna 等多个区域(王志华等, 2012)。在很多情况下,磁铁矿数据总是在判别图中核心几个区域分布,很难区分,如图解中矽卡岩、IOCG、斑岩、BIF 和 Kiruna 型交汇的区域,这使得据此进行的成因判别常出现多解性。出现这种现象显然与该图解的不准确性有关,而不一定是矿床成因类型的真实体现。

Dupuis 和 Beaudoin(2011)和 Nadoll 等(2014)等得出的图解中,同样缺乏赋存于火山岩中的铁矿以及中国宁乡式等沉积型铁矿的实例,比如在中国广泛发育的海相火山岩型铁矿(以中国新疆东天山、西天山为代表)和玢岩型铁矿(以长江中下游为代表)。另外,在图解中占有重要地位的 IOCG 矿床与矽卡岩型矿床一直存在较大成因争议,目前判别图中的 IOCG 区域主要由元古代矿床得出,缺乏显生宙 IOCG 矿床实例;而矽卡岩矿床也多为经典的岩浆热液交代碳酸盐形成,这也可能是图解中该区域出现问题较多的原因之一。值得注意的是:在已有的图解中,常用的做法是将所有含磁铁矿的成矿系统(甚至成岩系统)放在一起进行区分和判别,但这样得出的图解往往忽略了不同类型铁矿床之间的数据对比和成因判别,如目前图解中,斑岩型和 IOCG 型通常并不含有经济价值的磁铁矿体,而矽卡岩区域所用实例大部分并非矽卡岩型铁矿床。

利用高精度测试手段(如 LA-ICPMS)增加不同类型磁铁矿单矿物的主量与微量元素数据(库),以实现磁铁矿成因类型的准确判别,是目前磁铁矿成因研究的当务之急。

2.3 磁铁矿表面和内部结构特征相关研究薄弱

在早期磁铁矿标型特征研究中,与化学成分对应的物理特征研究也受到重视。研究发现不同类型矿床产出的磁铁矿在晶胞参数、硬度、比重和反射率等物理特征上也具有一些差异(徐国风邵洁莲,1979;叶庆同,1982;徐国风等,1983),但其差异性不如化学成分明显,因此在后来的研究中重视程度不够。自2010以来新一轮磁铁矿研究热潮中,几乎所有的研究都侧重于微量元素地球化学特征,而对相应的磁铁矿物理性质,包括表面和内部的结构等研究十分薄弱。事实上,磁铁矿物理特征仍然能起到较好的成因判别和勘查指导的作用,在国际化探领域权威杂志 *Journal of Geochemical Exploration* 上最新发表的关于加拿大北部 Izok Lake 地区磁铁矿研究论文中,作者(Makvandi *et al.*,2015)指出利用扫描电镜和矿物自动分析仪等手段获得的磁铁矿晶型、矿物组合和粒度分布等特征能有效指示磁铁矿成因,而且在 VMS 矿化和非矿化的地层中磁铁矿物理特征呈现明显差异。中国学者在对大冶地区程潮、铁山铁矿的磁铁矿研究中发现(Hu *et al.*,2014;Duan and Hu,2014;胡浩等,2014;Hu *et al.*,2015):在原生热液磁铁矿基础上由于后期热液作用等常发生溶解和重新沉淀(Dissolution-Re-precipitation)形成次生磁铁矿,而两期磁铁矿的微量元素成分相差较大。此类研究表明,对于磁铁矿高精度微量元素化学成分的研究(特别是激光 ICP-MS 测试)必须结合精细的矿物生成组合、期次和结构分析,否则得到的信息有可能是混杂而无意义的。目前与化学成分分析相配合的磁铁矿物理结构特征研究工作才刚刚引起重视。

2.4 勘查应用研究亟待加强

虽然利用磁铁矿的物理化学(或标型)特征指导矿产勘查已有近半个世纪,并取得了一些成果。但直到目前,对于磁铁矿物理化学成分特征在勘查上的应用还是多以判别矿床类型为主,仅少数应用到特定地区对含矿与不含矿地质体的区分(Rusk *et al.*,2009;Makvandi *et al.*,2015),显然这些对于当前勘查需求是远远不够的。在全球面临地表资源逐渐枯竭和急需开展“深部勘查”的新形势下,如何指导深部矿体的勘查,指明找矿方向并确定矿体位置是运用矿物物理化学特征进行矿产勘查的“新重

点”、“新任务”。国际上近年来已经开展了蚀变矿物找矿指示标志的研究,目前,在斑岩和浅成低温系统中利用明矾石、绿帘石、绿泥石等矿物成分特征分带研究获得了很好的研究成果并在大型矿业公司得到了实际检验(Chang *et al.*,2011;Cooke *et al.*,2014;Willkinson *et al.*,2015);最近在斑岩成矿系统利用磁铁矿微量元素化学特征进行示矿方向和矿体距离测算等方面也取得预期效果。例如在菲律宾 Baugio 地区斑岩蚀变带中磁铁矿 Ti、Cr 等元素与矿体距离呈现规律性变化(Wilkinson *et al.*,2013),但目前这些成果还仅仅是初步的。显然,利用磁铁矿的物理化学特征,通过三维空间分布信息,提炼矿化强弱和示矿方向标志,测算矿体距离等应该成为下一步磁铁矿勘查应用研究重点研究方向。

3 结论

磁铁矿化学成分和物理成分标型特征研究对成矿机制和勘查应用都具有较为重要的意义。当前的研究侧重利用微量元素成分等进行成因判别,所获得的判别图解仍然有较大的完善空间,而这些判别也必须结合细致的微观物理结构观察。利用磁铁矿物理化学标型特征,特别是微量元素矢量指向进行勘查应用研究也亟待加强。

致谢:感谢牛贺才研究员对本文主要内容的指导和建议。

参考文献 (References):

- Annersten H. 1968. A mineral chemical study of a metamorphosed iron formation in northern Sweden. *Lithos*, 1(4):374-397
- Bragg W H. 1915. The structure of the spinel group of crystals. *Philosophical Magazine*, 30: 305-315
- Buddington A F, Lindsley D H. 1964. Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents. *Journal of Petrology*, 5(2):310-357
- Chang Z S, Hedenquist J W, White N C, Cooke D, Gemmell B. 2011. Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: Example from the Mankayan intrusion-centered Cu-Au district, Luzon, Philippines. *Economic Geology*, 106: 1365-1398
- Chen W T, Zhou M F, Gao J F, Hu R. 2015a. Geochemistry of magnetite from Proterozoic Fe-Cu deposits in the Kangdian metallogenic province, SW China. *Mineralium Deposita*, doi: 10.1007/s00126-014-0575-7
- Chen W T, Zhou M F, Li X C, Gao J F, Hou K. 2015b. In-situ LA-ICP-MS trace elemental analyses of magnetite: Cu-(Au, Fe) deposits in the Khetri copper belt in Rajasthan Province, NW India. *Ore Geology Reviews*, 65: 929-939

- Chung D, Zhou M F, Gao J F, Chen W T. 2015. In-situ LA-ICP-MS trace elemental analyses of magnetite: The late Palaeoproterozoic Sokoman Iron Formation in the Labrador Trough, Canada. *Ore Geology Reviews*, 65: 917–928
- Cooke D R, Baker M, Hollings P, Sweet G, Chang Z S, Danyushevsky L, Gilbert S, Zhou T F, White N, Gemmell J B, Inglis S. 2014. New Advances in Detecting the Distal Geochemical Footprints of Porphyry Systems: Epidote Mineral Chemistry as a Tool for Vectoring and Fertility Assessments. *Economic Geology Special Publications*, 18: 127–152
- Dare S A S, Barnes S J, Beaudoin G. 2012. Variation in trace element content of magnetite crystallized from a fractionating sulfide liquid, Sudbury, Canada: Implications for provenance discrimination. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 88: 27–50
- Dare S A S, Barnes S J, Beaudoin G. 2014a. Did the massive magnetite “lava flows” of El Laco (Chile) form by magmatic or hydrothermal processes? New constraints from magnetite composition by LA-ICP-MS. *Mineralium Deposita*, doi: 10.1007/s00126-014-0560-1
- Dare S A S, Barnes S J, Beaudoin G, Méric J, Boutroy E, Potvin-Doucet C. 2014b. Trace elements in magnetite as petrogenetic indicators. *Mineralium Deposita*, 49: 785–796
- Duan Z, Li J, Hu H. 2014. New Constraints on the Genesis of the Tieshan Fe - Cu Skarn Deposit, SE Hubei Province, China: Textural and Geochemical Data of Magnetite. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 88: 1449–1450
- Dupuis C, Beaudoin G. 2011. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types. *Mineralium Deposita*, 46(4): 319–335
- Grant F S. 1985. Aeromagnetics, geology and ore environments, I. Magnetite in igneous, sedimentary and metamorphic rocks: An overview. *Geoscientific Research*, 23(85): 303–333
- Hu H, Lentz D, Li J W, McCarron T, Zhao X F, Hall D. 2015. Re-equilibration Processes in Magnetite from Iron Skarn Deposits. *Economic Geology*, 110: 1–8
- Hu H, Li J W, Lentz D, Ren Z, Zhao X F, Deng X D, Hall D. 2014. Dissolution-precipitation process of magnetite from the Chengchao iron deposit: Insights into ore genesis and implication for in-situ chemical analysis of magnetite. *Ore Geology Reviews*, 57: 393–405
- Huang X W, Gao J F, Qi L, Zhou M F. 2015a. In-situ LA-ICP-MS trace elemental analyses of magnetite and Re-Os dating of pyrite: The Tianhu hydrothermally remobilized sedimentary Fe deposit, NW China. *Ore Geology Reviews*, 65: 900–916
- Huang X W, Zhou M F, Qi L, Gao J F, Wang Y W. 2013. Re-Os isotopic ages of pyrite and chemical composition of magnetite from the Cihai magmatic-hydrothermal Fe deposit, NW China. *Mineralium Deposita*, 48: 925–946
- Huang X W, Zhou M F, Qiu Y Z, Qi L. 2015b. In-situ LA-ICP-MS trace elemental analyses of magnetite: The Bayan Obo Fe-REE-Nb deposit, North China. *Ore Geology Reviews*, 65: 884–899
- Lindsley D H. 1981. Some experiments pertaining to the Magnetite-Ulivospinel miscibility gap. *American Mineralogist*, 66: 759–762
- Liu P P, Zhou M F, Chen W T, Gao J F, Huang X W. 2015. In-situ LA-ICP-MS trace elemental analyses of magnetite: Fe-Ti - (V) oxide-bearing mafic-ultramafic layered intrusions of the Emeishan Large Igneous Province, SW China. *Ore Geology Reviews*, 65: 853–871
- McClellan K L, Lentz D R, McClenaghan S H. 2006. Petrology, Geochemistry, and Genesis of the Copper zone at the Brunswick No. 6 Volcanogenic Massive Sulfide Deposit, Bathurst Mining Camp, New Brunswick, Canada. *Exploration and Mining Geology*, 15(3–4): 53–75
- Makvandi S, Beaudoin G, McClenaghan B M, Layton-Matthews D. 2015. The surface texture and morphology of magnetite from the Izok Lake volcanogenic massive sulfide deposit and local glacial sediments, Nunavut, Canada: Application to mineral exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 150: 84–103
- Nadoll P, Mauk J L, Hayes T S, Koenig A E, Box S E. 2012. Geochemistry of magnetite from hydrothermal ore deposits and host rocks of the Mesoproterozoic Belt Supergroup, United States. *Economic Geology*, 107: 1275–1292
- Nadoll P, Mauk J L, Leveille R A, Koenig A E. 2014. Geochemistry of magnetite from porphyry Cu and skarn deposits in the southwestern United States. *Mineralium Deposita*, DOI: 10.1007/s00126-014-0560-1
- Nystrom J O, Henriquez F. 1994. Magmatic features of iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden; ore textures and magnetite geochemistry. *Economic Geology*, 89: 820–839
- Prins P. 1973. Apatite from African carbonatites. *Lithos*, 6(2): 133–143
- Ramdohr P. 1957. Uraniferous magnetite-hematite deposit at the Prince mine, Lincoln county, New Mexico. *Economic Geology*, 52: 322–322
- Razjigaeva N G, Naumova V V. 1992. Trace Element Composition of Detrital Magnetite from Coastal Sediments of Northwestern Japan Sea for Provenance. *Journal of Sedimentary Research*, 62(5): 802–809
- Rusk B, Oliver N, Brown A, Lilly R, Jungmann D. 2009. Barren magnetite breccias in the Cloncurry region, Australia; comparisons to IOCG deposits. In: Williams *et al.* (eds). *Smart science for exploration and mining*, Proc 10th Biennial Meeting, Townsville: 656–658
- Sack R O, Ghiorso M S. 1991. An internally consistent model for the thermodynamic properties of Fe-Mg-titanomagnetite-aluminate spinels. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 106(4): 474–505
- Shcheka S A, Romanenko I M, Chubarov V M, Kurentsova N A. 1977. Silica-bearing magnetites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 63(2): 103–111
- Vincent E A, Phillips R. 1954. Iron-titanium oxide minerals in layered gabbros of the Skaergaard intrusion, East Greenland; Part I. Chemistry and ore-microscopy. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 6(1): 1, IN1, 5–4, IN2, 26
- Wilkinson J J, Cooke D R, Baker M, Chen H. 2010. Magnetite chemistry in the Bagio porphyry Cu-Au district: AMIRA 1060 –Enhanced Geochemical Targeting in Magmatic-Hydrothermal Systems, Sponsors Meeting 5, Hobart, July 2013
- Wilkinson J J, Chang Z S, Cooke D R, Baker M J, Wilkinson C C, Inglis S, Chen H Y, Gemmell J B. 2015. The chlorite proximitator: A new tool for detecting porphyry ore deposits. *Journal of Geochemical*

- Exploration, 152: 10-26
- Zhao W W, Zhou M F. 2015. In-situ LA-ICP-MS trace elemental analyses of magnetite: The Mesozoic Tengtie skarn Fe deposit in the Nanling Range, South China. *Ore Geology Reviews*, 65: 872-883
- 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 1987. 成因矿物学与找矿矿物学. 重庆: 重庆出版社, 1-874
- 段超, 李延河, 袁顺达, 胡明月, 赵令浩, 陈小丹, 张成, 刘佳林. 2012. 宁芜矿集区凹山铁矿床磁铁矿元素地球化学特征及其对成矿作用的制约. *岩石学报*, 28(1): 243-257
- 洪为, 张作衡, 赵军, 王志华, 李凤鸣, 石福品, 刘兴忠. 2012. 新疆西天山查岗诺尔铁矿床矿物学特征及其地质意义. *岩石矿物学杂志*, 31(2): 191-211
- 侯林, 丁俊, 邓军, 彭惠娟. 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成矿意义. *岩石矿物学杂志*, 32(2): 154-166
- 胡浩, 段壮, 李建威. 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. *岩石学报*, 30(5): 1292-1306
- 黄小文, 漆亮, 孟郁苗. 2013. 东天山黑峰山, 双峰山及沙泉子(铜)铁矿床的矿物微量和稀土元素地球化学特征. *矿床地质*, 32(6): 1188-1210
- 兰彩云, 张连昌, 赵太平, 王长乐, 李红中, 周艳艳. 2013. 河南舞阳铁山庙式 BIF 铁矿的矿物学与地球化学特征及对矿床成因的指示. *岩石学报*, 29(7): 2567-2582
- 林师整. 1982. 磁铁矿矿物化学、成因及演化的探讨. *矿物学报*, 2(3): 166-174
- 吕书君, 杨富全, 柴凤梅, 张志欣, 李强. 2013. 新疆准噶尔北缘托斯巴斯套铁铜金矿床砂卡岩和磁铁矿矿物学特征及其地质意义. *岩矿测试*, 32(3): 510-521
- 孟旭阳, 张东阳, 闫兴虎, 申俊峰, 王鹏, 田磊, 梁明娟. 2014. 河南窑场和辽宁思山岭铁矿磁铁矿矿物学和氧同位素特征对比-对 BIF 型铁矿成因与形成环境的启示. *岩石矿物学杂志*, 33(1): 109-126
- 余宇伟, 宋谢炎, 于宋月, 陈列猛, 魏宇, 郑文勤. 2014. 磁铁矿和钛铁矿成分对四川太和富磷灰石钒钛磁铁矿床成因的约束. *岩石学报*, 30(5): 1443-1456
- 沈保丰, 陆松年, 翟安民, 李增慧, 于恩泽. 1979. 冀南等地接触交代型铁矿床中磁铁矿的化学成分特征及其地质意义. *地质论评*, 25(1): 10-18
- 王敏芳, 郭晓楠, 陈梦婷. 2014. 磁铁矿中微量元素和铂族元素的组成特征. *地质找矿论丛*, 29(3): 417-423
- 王顺金. 1987. 论磁铁矿的标型特征. 武汉: 中国地质大学出版社
- 王志华, 张作衡, 蒋宗胜, 洪为, 田敬全. 2012. 西天山智博铁矿床磁铁矿成分特征及其矿床成因意义. *矿床地质*, 31(5): 983-998
- 徐国风, 丰淑庄, 左大华. 1983. 河南某多金属硫铁矿床磁铁矿的标型特征. *矿物岩石*, 3(2): 48-54
- 徐国风, 邵洁涟. 1979. 磁铁矿的标型特征及其实际意义. *地质与勘探*, 23(3): 30-37
- 叶庆同. 1982. 粤东一些铁矿床中磁铁矿的标型特征及其成因意义. *岩矿测试*, 1(1): 44-51
- 应立娟, 王登红, 梁婷, 周汝洪, 马军, 屈文俊, 陈振宇. 2006. 新疆阿尔泰乔夏哈拉铁铜金矿床磁铁矿的化学成分标型特征和地质意义. *矿物学报*, 26(1): 59-68
- 曾红, 柴凤梅, 周刚, 耿新霞, 李强, 孟庆鹏, 徐璐璐. 2014. 新疆雅满苏铁矿床砂卡岩和磁铁矿矿物学特征及其地质意义. *中国地质*, 41(6): 1914-1928
- 张聚全, 李胜荣, 王吉中, 白明, 卢静, 魏宏飞, 聂潇, 刘海明. 2013. 冀南邯邢地区白涧和西石门砂卡岩型铁矿磁铁矿成因矿物学研究. *地学前缘*, 20(3): 76-87
- 张立成, 王义天, 陈雪峰, 马世青, 王志华, 余长发. 2013. 东天山红云滩铁矿床矿物学, 矿物化学特征及矿床成因探讨. *岩石矿物学杂志*, 32(4): 431-449

(本文责任编辑: 龚超颖)

· 简 讯 ·

白宫科学展览节——优等生计划

美国总统奥巴马在一年一度的第五届白宫科学展览节上鼓励年轻科学家创新, 并指出国会应做好财政预算全力支持这一计划。

本次展览节共展出 36 件科学作品。包括: 拉斯克鲁塞斯的 16 岁女孩索菲亚将极端微生物藻类转化为可再生的生物质能源; 圣安东尼奥, 德克萨斯州的 Hobby 中学, 12 岁的 Kalista Ybarra 和 11 岁的 Madelyn Hickman 展示了他们的“水晶魔方”实验, 并于 2014 年 10 月 28 日应用于太空站; 其他的一些展品包括运用农业废物去除水中污染物, 新型建筑材料可有效抵御地震等。

奥巴马说: “学生科学家和工程师计划教给他们一些特殊的课题, 让他们去探索, 他们总会带给我们一些新的事物去学习、去尝试、去发现、去想象, 创造和发现新事物从来不会太早或者太晚。”讲话中奥巴马强调需要增加学生科学研究的多样性, 包括技术、工程、数学等领域, 并加大资助力度, 尤其是当创新的理念转向基础研究时, 白宫承诺投入 2.4 亿美元到科学教育以便学生致力于科学研究。但不幸的是这一计划并没有得到国会太多的支持。

[原文发表于: Showstack, R. (2015), White House Science Fair features top student projects, *Eos*, 96, doi: 10.1029/2015E0026973. Published on 25 March 2015. <https://eos.org/articles/white-house-science-fair-features-top-student-projects>]