

磁铁矿中微量元素和铂族元素的组成特征

王敏芳^{1,2}, 郭晓南¹, 陈梦婷¹

(1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074;

2. 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 中国地质大学(武汉), 武汉 430074)

摘要: 文章分析了磁铁矿中铂族元素(PGE)含量的特征,发现磁铁矿中铂族元素富集为 10^{-9} 级,主要为 PPGE(即 Pd, Pt, Rh)。富集 PPGE 的主要原因是其在热液活动的晚期阶段可以被轻微的再分配和富集,其含量的高低严格受岩浆结晶过程中氧逸度的控制。磁铁矿的结晶程度直接影响岩浆体系的氧逸度,控制了 PGE 的含量分布,进而影响成矿。

关键词: 磁铁矿;微量元素;LA-ICP-MS;PGE

中图分类号: P578.46 **文献标识码:** A

0 引言

磁铁矿广泛存在于各类岩石中,利用磁铁矿的微量元素组成可以帮助解决矿床成因问题。通过精准的微量元素测试数据,利用前人的成因判别图解,可以快速有效地判别矿床成因类型。近年来,随着 LA-ICP-MS 等测试技术的快速发展,为磁铁矿的微量元素研究提供了一条途径。不同成因磁铁矿的化学成分和物理性质均具有其特征。人们很早就注意到磁铁矿的标型特征并展开研究,以期解决矿床的成因问题^[1-21],或通过总结归纳大量磁铁矿分析数据,研究不同类型磁铁矿在化学成分、晶体结构等方面的差异、演化规律及形成机理,这些对于找矿勘探和评价工作都有重要的意义。

1 磁铁矿的地球化学特征

磁铁矿属尖晶石族,成分相对复杂,其晶格中可赋存有 Cr, V, Ca, Co, Ni, Sn, Cu, Zn, Ga, Se, Te,

Au, Ag 等 20 多种元素,磁铁矿地球化学成分的变化可以反映其形成的环境。

1.1 主量元素特征

20 世纪 80 年代,徐国凤等^[2]通过分析大量地球化学数据,总结了不同成因类型铁矿床铁矿石中磁铁矿的主量元素组成特征(表 1),为判断不同铁矿床的成因类型提供了地球化学方面的主量元素数据范围^[2]。但这种数据并不能直观地反映出磁铁矿的成因类型。林师整^[5]、陈光远等^[9]、王顺金^[10]通过统计磁铁矿化学成分数据,根据主量元素 TiO_2 , Al_2O_3 , MgO , MnO 含量的变化,以三角图的形式对磁铁矿进行了成因划分,且划分成因类型的考虑角度不尽相同。林师整将磁铁矿成因划分为 6 种:侵入岩中副矿物型、岩浆熔离钛磁铁矿型、火山岩型、接触交代型、夕卡岩型和沉积变质型(图 1a);陈光远等根据磁铁矿赋存岩体的酸碱度不同,划分为沉积变质-接触交代磁铁矿、超基性-基性-中性岩浆磁铁矿、酸性-碱性岩浆磁铁矿(图 1b);相对而言,王顺金的三角图划分方案更为详细,被广泛用于磁铁矿成因类型的判别(图 1c)。

1.2 微量元素特征

随着地球科学的快速发展,越来越重视矿物中

收稿日期: 2013-06-26; 责任编辑: 赵庆

基金项目: 国家自然科学基金(面上)项目(编号:41272097)、地质过程与矿产资源国家重点实验室开放课题(编号:GPMR201006)、中央高校基本科研业务费专项资金(编号:CUG120702)资助。

作者简介: 王敏芳(1980-),女,副教授,博士,矿床学专业,主要从事矿床成因研究。通信地址:湖北省武汉市洪山区鲁磨路 388 号,中国地质大学资源学院;邮政编码:430074;E-mail:wang_minfang@163.com

微量元素的组成特征。早在 20 世纪 60 年代就开始用 X 射线发射光谱来测定,但由于检测限的制约,仅能测出含量 $>1 \times 10^{-6}$ 的元素^[22-24],如 V, Mg, Cu, Co 和 Ti,主要用于研究美国密苏里州各种铁矿床。随后, Nystrom 等、Banvill 利用 ICP-MS 分别对智利 Kiruna(基努纳)型铁矿床^[25]和瑞典 Osborne 铜金矿床^[26]中的磁铁矿进行微量元素分析,与早期 X 射线发射光谱方法相比较, ICP-MS 方法

的精度更高,且可检测元素种类也增多,如 V, Cr, Ti, Al, Mg, Mn, Ni, Co, Zn, Cu。

随着分析精度的不断提高,磁铁矿或赤铁矿中的微量元素被广泛地用来反映流体的组成、物理化学条件(pH 值、温度及氧化还原性质等),以及追踪元素在矿物和流体相之间的分配特性等。但利用 LA-ICP-MS 对热液矿床中磁铁矿或赤铁矿的研究较少,这将是今后重要的发展方向。

表 1 不同成因类型铁矿床铁矿石中磁铁矿的化学组分特征^[2]

Table1 Chemical composition of magnetite in various genetic iron ores

成因类型	矿石类型	TiO ₂	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	NiO	CaO
岩浆矿床	辉长岩-辉长辉绿岩 中磁铁矿石	21.72		35.33	2.33	0.03	0.05	36.96	0.46	1.57	0.03	0.43
		11.62		46.27				40.77	1.36	0.25		
		10.01		44.07	4.09	0.05	0.78	38.50	1.67	0.385	0.02	0.435
	辉长岩-辉石岩-纯 橄榄岩中磁铁矿石	0.92		66.92	0.40	0.096	0.40	30.90	0.38	0.11	0.04	—
		5.02		56.70	4.60		0.44	30.99	2.26	0.40		—
	碳酸盐碱性、超基 性岩中磁铁矿石	0.58		66.92	4.42		0.10	19.20	7.92	0.76		—
		1.83			1.78	0.0012	0.103		4.28	0.52	0.0034	
		2.97		63.76	1.25		0.14	28.43	3.00	0.45		—
	夕卡岩中磁铁矿石	0.04		69.10	1.23			22.85	1.02	0.04		1.64
接触交代 矿床	钙夕卡岩中磁铁矿石	0.09		68.70	0.55	0.01	—	26.70	0.76	2.15		0.60
		0.17		67.62	0.80		—	28.98	0.35	0.28		1.23
		0.28		68.23	0.037		—	28.54	1.91	0.095		1.03
	镁夕卡岩中磁铁矿石	—		75.58	0.80	—	—	9.77	11.51	0.90		0.58
		0.14		70.15		—	—	27.79	1.89	0.30		—
热液交代 矿床		0.18		67.97	0.83		0.05	—	7.32	2.38	0.013	0.11
	深成高温热液矿床 细粒块状矿石	0.185	1.185	69.09	1.82	—	—	24.72	3.295	0.175		0.22
	深成高温热液矿床 晚期脉状矿石	0.127	3.343	63.653	4.773	—	—	20.80	5.43	0.227		1.68
	热液交代矿床 铁矿石	0.42		70.31	4.76		—	11.84	13.34	—		—
		0.49		70.26	2.60		0.60	15.98	10.13	0.12		痕迹
		痕迹		68.93	2.00		0.03	27.14	1.29	0.06		—
火山沉积 矿床	火山沉积矿床 铁矿石	0.30										
区域变质 矿床	绿色片岩相 铁矿石	0.10		68.51	0.06	0.04	0.13	31.09	0.01	0.14	—	0.01
		—		69.61	0.13		—	30.27	0.05	—		—
		0.08		70.52	0.04			29.11	—	—		—
		0.001		69.99	—		—	30.15	0.10	0.017		—
	斜长角闪岩相 铁矿石	0.10		68.44	0.52			30.92	—	0.02		
		0.08		68.87	0.10	—	—	31.43	—	0.04	0.09	—
		1.01		69.01	0.59			29.95	0.55	0.07		0.10
		0.05		69.63	0.02			29.91	0.19	0.08		0.12
	麻粒岩相 铁矿石	—		68.77	0.30							
		1.20		66.53	0.50						0.07	
		0.30		68.37	0.30							
玢岩型 矿床	玢岩型矿床 铁矿石	0.5~3.25 (2.41)		64.83	0.71	—	0.46	29.67	0.88		0.008	

量的单位: $w_B/\%$ 。

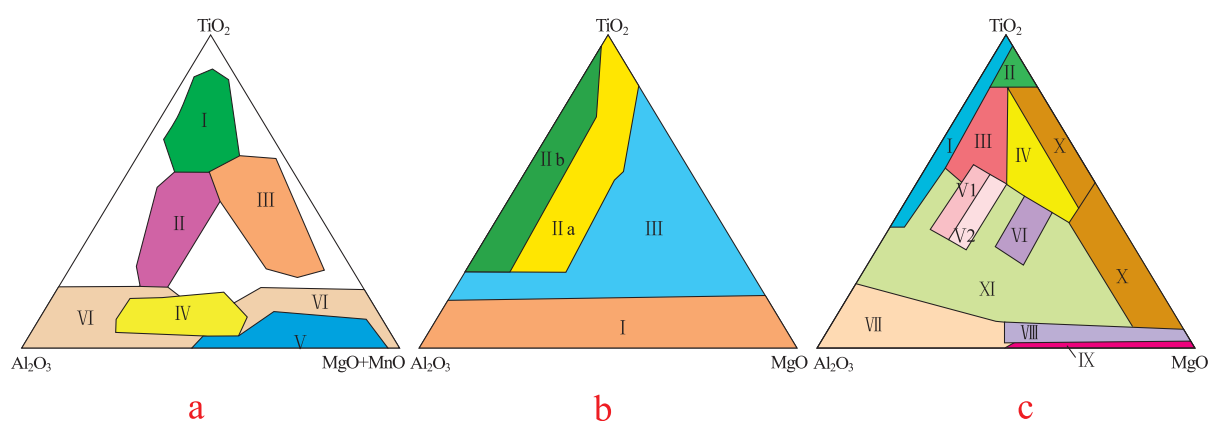


图 1 磁铁矿主量元素成因判别图解

Fig. 1 Genetic discriminant diagram of major elements in magnetite

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. 夕卡岩型; VI. 沉积变质型

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

c. I. 花岗岩区(酸性岩浆岩、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); V 1. 角闪岩区(包括单斜辉石岩); V 2. 闪长岩区; VI. 金伯利岩区; VII. 热液型及钙夕卡岩型(虚线以上主要为深成热液型, 以下为热液型及夕卡岩型); VIII. 热液型及镁夕卡岩型(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

Müller 等首次尝试利用 LA-ICP-MS 对瑞典北部 Kiirunavaara 铁矿床进行磁铁矿的微量元素分析, 其检出限为 $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-6}$, 微量元素 Rb, Sr, Mo, Ag, Cd, Ba, Ce, Tl, Bi, Th, U 的含量都可准确测出, 在激光剥蚀过程中元素的分馏作用对元素测定含量基本无影响, 结果具可靠性^[27]。此后, Carrew 对澳大利亚昆士兰 Eastern Fold Belt 中典型的 IOCG 矿床开展了相关研究, 探讨了微量元素与磁铁矿成因的关系^[28-29]; Singoyi 等选择夕卡岩型、IOCG 型、VMS 型和 BHT 型矿床中的磁铁矿, 利用 LA-ICP-MS 测试微量元素, 并根据磁铁矿 Al/Co—Sn/Ga 建立了这几类矿床的判别图解^[30]; Beaudoin 和 Dupuis 先后论述了基于铁氧化物不同化学组成特征的多种手段来判别不同的矿床类型^[31-33], 对不同成因类型的典型铁矿床的铁氧化物(磁铁矿和赤铁矿)中微量元素进行了对比研究, 提出利用铁氧化物中微量元素 Ca+Al+Mn 与 Ti+V 图解判别矿床的成矿类型^[32], 以作为矿床成因的辅助判别方法。此外, Rusk 等对澳大利亚 Cloncurry 地区铜金矿床中未矿化的和弱矿化的磁铁矿热液角砾岩的研究表明, 未发生矿化的磁铁矿中 V 和 Mn 含量与典型的 IOCG 型矿床(Ernest Henry 矿床和 Mt Elliot 矿床)磁铁矿中的 V 和 Mn 含量有差异, 认为磁铁矿中 V 和 Mn 含量的差异与成矿流体和岩石之间的水岩反应作用有关^[34]; Nadoll 对美国

Mesoproterozoic Belt Supergroup 地区热液矿床中的磁铁矿进行了地球化学特征研究, 进一步确认了磁铁矿的地球化学特征是区分热液矿床成因的有效手段^[35-36]。同时, Nadoll 和 Koenig 利用 NIST SRM 610, USGS GSE-1G 和 NIST SRM 2782 标准物质作为外标, 对 LA-ICP-MS 测定磁铁矿微量元素方法的准确性进行了论证^[37]。

近年来, 随着利用 LA-ICP-MS 研究磁铁矿中微量元素日益升温, 我国也有学者对此开展了相关研究。如, 张德贤对澳大利亚昆士兰州北部 Ernest Henry 和 Eastern Succession of Mount Isa Inlier 铁氧化物型铜金(IOCG)矿床中的磁铁矿微量元素地球化学特征进行了研究, 利用磁铁矿中的高 Mn/Ti 值来区分 Ernest Henry 和 Eastern Succession of Mount Isa Inlier 矿床中矿化和无矿化的磁铁矿角砾岩体, 并建立了测定磁铁矿中微量元素和稀土元素的方法^[38]; 洪为等对新疆西天山查岗诺尔铁矿床的磁铁矿开展了研究, 对早期和晚期磁铁矿中 Ti, V, Cr, Ni, Co 等元素含量进行了分析, 利用 Ti/V, Ni/Co 值确定矿浆贯入成矿作用的可能性, 根据低 Ge 含量排除了海相火山-沉积作用, 为确定查岗诺尔铁矿床的成因提供了依据^[39-40]; 段超等对凹山铁矿床中 4 个不同成矿阶段的磁铁矿进行了微量元素分析, 根据不同成矿阶段中磁铁矿成分的变化, 认为凹山铁矿床是一个高温气液充填矿床^[41-42]。

2 磁铁矿中铂族元素富集特征

相对于磁铁矿中微量元素的研究,磁铁矿中铂族元素(PGE)的含量和地球化学特征却研究极少。PGE 是指 Pd,Pt,Os,Ir,Ru,Rh 等 6 种元素,是高度亲铁元素。根据各元素的地球化学行为,通常将 PGE 分为 IPGE(Os,Ir,Ru)和 PPGE(Pd,Pt,Rh)。IPGE 具有难熔和相容性,高温条件下通常形成合金或寄存于尖晶石等矿物相中,在地幔部分熔融过程中大部分残留于地幔;PPGE 常赋存于金属硫化物中,熔融过程中主要表现为不相容性,即优先进入硅酸盐熔体^[43]。因此,与幔源岩浆有关的岩石中可能出现 PPGE 的富集,而人们也将研究重点放在了与镁铁-超镁铁质侵入体有关或与岩浆铜-镍硫化物有关的岩浆矿床上^[44-48]。

磁铁矿本身仅含少量的 PGE,但在一些镁铁质-超镁铁质岩体中,富含磁铁矿的层状侵入体中富集 PGE 的现象却常有报道,如美国 Minnesota 州 Duluth 岩体^[49]、加拿大 Coldwell 岩体^[50]、南非 Stella 侵入体^[51]和南非 Bushveld 岩体^[52]等。另外,Sá 等对巴西东北部的 Rio Jacaré 镁铁质-超镁铁质岩体中的磁铁矿体进行了研究,发现其中异常富集 Pt 和 Pd^[53],Pt 和 Pd 的总量甚至可达 $10 \times 10^{-6} \sim 15 \times 10^{-6}$ ^[51]。目前仅 Leblanc 和 Fischer 以及 Gahlan 等在对摩洛哥 Anti-Atlas 地区晚元古代的 Bou-Azzer 蛇绿岩中发生强烈蛇纹石化的橄榄岩进行了研究^[54-55],首次报道了在橄榄岩中呈脉状产出的热液成因磁铁矿中的 PGE 含量,2 种不同产状的热液磁铁矿中的 Σ PGE 分别为 24×10^{-9} 和 13×10^{-9} (图 2)^[54],其中富集 PGE 的主要原因是 Au,PPGE 以及部分 Ru 可以在蛇纹石化过程中被热液淋滤,而 Os 和 Ir 却保留在铬铁矿和尖晶石中,这与前人认为在热液活动的晚期阶段,PGE 可以被轻微的再分配和富集的认识是一致的^[56-57]。

前人的实验结果表明,Ru 和 Rh 在尖晶石族矿物(尖晶石、磁铁矿、铬铁矿)中的相容性,与 Pd 在高氧逸度条件下的不相容性是一样的^[58-60]。且 Rh 和 Ru 在磁铁矿-硅酸盐熔体中的配分系数和不混溶硫化物在硅酸盐熔体中的配分系数具可比性。因此,Capobianco 等认为尖晶石族矿物的结晶可以富集和分馏岩浆体系中的 PGE^[59]。

此外,Berzina 首次对俄罗斯西伯利亚地区的多

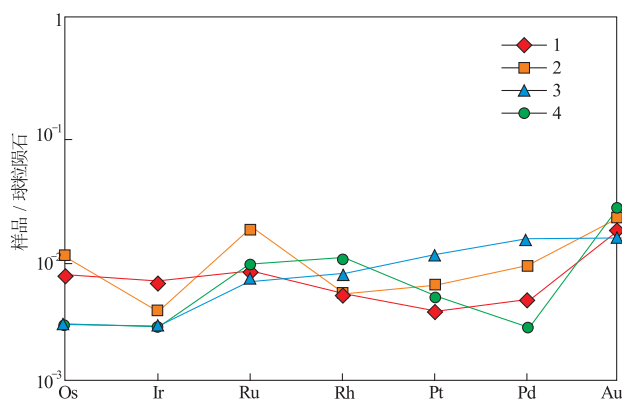


图 2 PGE 和 Au 的配分蛛网图(据文献^[54],修改)

Fig. 2 Spider diagram of PGE and Au distribution

1. 蛇纹石;2. 浸染状磁铁矿单矿物;

3. Type1 热液磁铁矿脉;4. Type2 热液磁铁矿脉

个斑岩型铜-钼矿床中的磁铁矿开展的铂族元素地球化学特征研究表明,磁铁矿中 Σ PGE 含量不高,低于 18×10^{-9} ,主要是富 PPGE,且 PPGE 的含量高低严格受岩浆结晶过程中氧逸度的控制^[61]。

3 磁铁矿对矿床学的指示意义

磁铁矿是常见矿物之一,几乎所有类型的矿床中均有发育,因而人们多选择磁铁矿进行矿床学研究。引起磁铁矿微量元素地球化学性质变化的因素很多,如水岩反应、水岩反应路径、流体来源、流体的温度和压力、流体的化学成分、pH 值和氧化条件等。合理解释成矿过程中磁铁矿微量元素变化的原因,有助于推断成矿模型和找矿勘探。此外,微量元素的变化可示踪地质过程和矿化情况,甚至有助于发现新的靶区。

前人对岩浆体系中磁铁矿主、微量元素的研究表明,磁铁矿的地球化学组成主要受岩浆成分、温度和氧逸度的控制^[35,54,62-63]。孙卫东等^[64]论述了在岩浆演化过程中,磁铁矿的结晶程度是如何直接影响岩浆体系的氧逸度的。Liang 等^[65]对玉龙斑岩铜矿的研究也表明,由于磁铁矿的结晶降低了斑岩体系的氧化还原势,促使富铜-金硫化物发生沉淀从而形成玉龙大型斑岩型铜-金矿床。由此可见,磁铁矿的结晶程度影响着岩浆体系中的氧逸度,进而影响成矿。

除已开展过研究的斑岩系统外,许多其他热液矿床中也包含有一定数量的磁铁矿,可利用热液矿

床中共存的磁铁矿和赤铁矿来约束流体的氧化还原势^[66-67]。如 Maqueen 和 Cross 提出^[67],在接触变质的夕卡岩矿床中热液型磁铁矿的微量元素变化能够提供相关信息去示踪含磁铁矿的矿床。而对于利用矿物的微量元素去研究成矿过程目前还不很成熟^[33,68],这是一个新兴的领域。

对磁铁矿中 PGE 的研究才刚刚开始,PGE 既是高度亲铁元素,也是强烈的亲铜元素。因此,在岩浆中的富集和分异主要是取决于硫化物饱和与结晶分异的相对时机,以及硫化物相的行为^[61]。但并不是所有的岩浆系统都是硫化物饱和的,在缺少硫化物的岩浆系统中,PGE 的行为受控于自身的溶解度以及在氧化物和硅酸盐中的配分。目前对磁铁矿中 PGE 的研究表明,仅富集 Pd,Pt,Ru,Rh,未发现富集 Os 和 Ir^[28-29,54,61],因此,下一步工作应是采用更为精确的技术手段来评估磁铁矿在热液矿床中对 Os 和 Ir 元素行为的控制作用。

参考文献:

- [1] 沈保丰,陆松年,翟安民,等. 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[J]. 地质论评,1979,25(1):10-18.
- [2] 徐国风,邵洁莲. 磁铁矿的标型特征及其实际意义[J]. 地质与勘探,1979(3):30-37.
- [3] 叶庆同,吴学汉,李慕洁,等. 广东尖山铁矿的成因[J]. 地质学报,1980(3):219-232.
- [4] 叶庆同. 粤东一些铁矿床中磁铁矿的标型特征及其成因意义[J]. 岩石矿物学杂志,1982,1(1):44-51.
- [5] 林师整. 磁铁矿矿物化学、成因及演化的探讨[J]. 矿物学报,1982,2(3):166-174.
- [6] 王文斌,王润华,季绍新,等. 从磁铁矿的某些特征看闽西南地区马坑式铁矿的成因[J]. 地质论评,1982,28(2):118-125.
- [7] 阙梅英. 云南罗茨鹅头厂铁矿床主要铁矿物特征及矿床成因探讨[J]. 矿物岩石,1984(1):57-70.
- [8] Орлов В П, 吴六汀,蔡刚民. 夕卡岩矿床磁铁矿标型特征的找矿及成因意义[J]. 地质地球化学,1985(5):13-19.
- [9] 陈光远,孙岱生,殷辉安. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆:重庆出版社,1987.
- [10] 王顺金. 论磁铁矿的标型特征[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1987.
- [11] 李万茂. 新疆东部地区几个铁矿床磁铁矿标型特征[J]. 西北地质,1985(5):1-5.
- [12] 曾玖吾,王曼祉,曲维政. 白云鄂博铁矿磁铁矿成因矿物学的研究[J]. 矿物岩石,1981(Z1):44-58.
- [13] 方磐,于忠. 濉溪铁铜矿床中磁铁矿的标型特征及其意义[J]. 矿物学报,1986,6(2):145-154.
- [14] 贾群子. 从磁铁矿的标型特征论天湖铁矿的成因[J]. 西北地质,1991,12(1):19-25.
- [15] 刘慧卓,唐跃刚,赵峰华. 近北庄磁铁矿的矿物特征[J]. 有色金属,2007,59(1):98-102.
- [16] 王玉往,沙建明,程春. 新疆磁海铁(钴)矿床磁铁矿成分及其成因意义[J]. 矿床地质,2006,25(增刊):321-324.
- [17] 张德. 江苏韦岗铁矿磁铁矿的矿物学特征及其意义[J]. 江苏地质,1994,18(1):25-29.
- [18] 张建中,冯秉寰,金浩甲,等. 新疆阿勒泰阿巴宫-蒙库海相火山岩与铁矿的成生关系及成矿地质特征[C]//中国地质科学院西安地质矿产研究所文集:20. 北京:地质出版社,1987:89-172.
- [19] 应立娟,王登红,梁婷,等. 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[J]. 矿物学报,2006,26(1):59-68.
- [20] 王慧媛,彭晓蕾. 辽宁凤城翁泉沟硼铁矿床磁铁矿的成因研究[J]. 中国地质,2008,35(6):1299-1306.
- [21] Abongwa P W. Mineral texture and composition of magnetite in the Sahavaara IOCG deposit, Pajala area: a mineral processing approach. Department of Chemical Engineering and Geosciences[D]. Sweden, Lule, Lule University of Technology. Master: 2008:1-126.
- [22] Kisvarsanyi G, Proctor P D. Trace-element content of magnetites and hematites, southeast Missouri metallogenetic province, U. S. A[J]. Economic Geology, 1967,62(4):449-471.
- [23] Dasgupta H C. Intracrystalline element correlation in magnetite[J]. Economic Geology, 1967,62(4):487-493.
- [24] James A H, Dennen W H. Trace ferrides in the magnetite ores of the Mount Hope Mine and the New Jersey Highlands[J]. Economic Geology, 1962, 57(3):439-449.
- [25] Nystroem J O, Henriquez F. Magmatic features of iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden: ore textures and magnetite geochemistry[J]. Economic Geology, 1994, 89(4):820-839.
- [26] Banvill G. Textural and geochemical investigation of the magnetite species at the Osborne Cu-Au deposit, Cloncurry District, Mount Isa Inlier, NW Queensland[D]. Townsville, James Cook University. Unpublished BSc (Honours) thesis, 1998.
- [27] Müller B, Axelsson M D, hlander B. Trace elements in magnetite from Kiruna, northern Sweden, as determined by LA-ICP-MS[J]. GEF, 2003,125(1):1-5.
- [28] Carew M, Mark G, Oliver N, et al. Trace element geochemistry of magnetite and pyrite in Fe oxide (Cu-Au) mineralised systems: Insights into the geochemistry of ore-forming fluids[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2006, 70(18):5.
- [29] Carrew M J. Controls on Cu-Au mineralisation and Fe oxide metasomatism in the Eastern Fold Belt, N. W. Queensland, Australia[D]. Townsville: James Cook University, 2004:1-308.
- [30] Singoyi B, Danyushevsky L, Davidson G, et al. Determination of trace elements in magnetites from hydrothermal depos-

- its using the LA ICP-MS technique[C]//Denver, USA: SEG Keystone Conference, CD-ROM, 2006.
- [31] Beaudoin G, Dupuis C, Gosselin P, et al. Mineral chemistry of iron oxides: application to mineral exploration[C]//Andrew C J. Ninth Biennial SGA meeting. Dublin, SGA, 2007: 497–500.
- [32] Dupuis C, Beaudoin G. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types[J]. *Mineralium Deposita*, 2011, 46(4): 319–335.
- [33] Beaudoin G, Dupuis C. Iron-oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types[C]. Corriveau L, Mumin A H. Exploring for Iron Oxide Copper-Gold Deposits: Canada and Global Analogues, Geological Association of Canada Annual Meeting. Québec City, 2009: 107–121.
- [34] Rusk B, Oliver N, Brown A, et al. Barren magnetite breccias in the Cloncurry region, Australia; comparisons to IOCG deposits[C]//Williams P. Smart Science for Exploration and Mining: Proceedings of the 10th Biennial SGA Meeting, Townsville, 2009: 656–658.
- [35] Nadoll P. 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]. Auckland: The University of Auckland, 2010.
- [36] Nadoll P, Mauk J L, Hayes T S, et al. Geochemistry of magnetite from hydrothermal ore deposits and host rocks of the Mesoproterozoic Belt Supergroup, United States[J]. *Economic Geology*, 2012, 107(6): 1275–1292.
- [37] Nadoll P, Koenig A E. LA-ICP-MS of magnetite: methods and reference materials[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2011, 26(9): 1872–1877.
- [38] 张德贤. 澳大利亚昆士兰州北部 Ernest Henry 铁氧化物型铜金(IOCG)矿床物理化学特征及磁铁矿微量元素地球化学特征: 对全球 IOCG 矿床成因的启示[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [39] 洪为. 新疆西天山查岗诺尔铁矿地质特征与矿床成因[D]. 北京: 中国地质科学院, 2012.
- [40] 洪为, 张作衡, 蒋宗胜, 等. 新疆西天山查岗诺尔铁矿床磁铁矿和石榴石微量元素特征及其对矿床成因的制约[J]. *岩石学报*, 2012, 28(7): 2089–2102.
- [41] 段超. 宁芜矿集区凹山矽岩型铁矿床成矿作用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- [42] 段超, 李延河, 袁顺达, 等. 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*, 2012, 28(1): 243–257.
- [43] Gueddari K, Piboule M, Amoss J. Differentiation of platinum-group elements (PGE) and of gold during partial melting of peridotites in the lherzolitic massifs of the Betico-Rifean range (Ronda and Beni Bousera)[J]. *Chemical Geology*, 1996, 134(1/3): 181–197.
- [44] Cabri L J. Platinum-Group Elements: Mineralogy, Geology, Recovery[J]. *Mineralogical Magazine*, 1982, 46: 530–531.
- [45] Cabri L J. The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-group Elements[M]. Canadian Institute of Mining and Metallurgy, 2002.
- [46] Li C, EM R. Magmatic Ni-Cu and PGE Deposits: Geology, Geochemistry and Genesis[M]. Denver, Colorado, Society of Economic Geologists, 2011.
- [47] Naldrett A J. World-class Ni-Cu-PGE deposits: key factors in their genesis[J]. *Mineralium Deposita*, 1999, 34(3): 227–240.
- [48] Naldrett A J. From the mantle to the bank: the life of a Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit[J]. *South African Journal of Geology*, 2010, 113(1): 1–32.
- [49] Hauck S, Severson M, Zanko L, et al. An overview of the geology and oxide, sulfide, and platinum-group element mineralization along the western and northern contacts of the Duluth Complex[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 1997, 312: 137–185.
- [50] Barrie C T, MacTavish A D, Walford P C, et al. Contact type and Magnetite reef-type Pd-Cu mineralization in Ferroan olivine gabbros of the Coldwell Complex, Ontario[J]. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Special Volume 2002, (54): 321–337.
- [51] Maier W D, Barnes S J, Gartz V, et al. Pt-Pd reefs in magnetites of the Stella layered intrusion, South Africa: A world of new exploration opportunities for platinum group elements[J]. *Geology*, 2003, 31(10): 885–888.
- [52] Barnes S J, Maier W D, Ashwal L D. Platinum-group element distribution in the Main Zone and Upper Zone of the Bushveld Complex, South Africa[J]. *Chemical Geology*, 2004, 208(1/4): 293–317.
- [53] Sá J, Barnes S, Prichard H, et al. The distribution of base metals and platinum-group elements in magnetite and its host rocks in the Rio Jacaré Intrusion, northeastern Brazil[J]. *Economic Geology*, 2005, 100(2): 333–348.
- [54] Gahlan H A, Arai S, Ahmed A H, et al. Origin of magnetite veins in serpentinite from the Late Proterozoic Bou-Azzer ophiolite, Anti-Atlas, Morocco: An implication for mobility of iron during serpentinization[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2006, 46(4): 318–330.
- [55] Leblanc M, Fischer W. Gold and platinum group elements in cobalt-arsenide ores: Hydrothermal concentration from a serpentinite source-rock (Bou Azzer, Morocco)[J]. *Mineralogy and Petrology*, 1990, 42(1/4): 197–209.
- [56] Dillon-Leitch H C H, Watkinson D H, Coats C J A. Distribution of platinum-group elements in the Donaldson West Deposit, Cape Smith Belt, Quebec[J]. *Economic Geology*, 1986, 81(5): 1147–1158.
- [57] Rowell W F, Edgar A D. Platinum-group element mineralization in a hydrothermal Cu-Ni sulfide occurrence, Rathbun Lake, northeastern Ontario[J]. *Economic Geology*, 1986, 81(5): 1272–1277.
- [58] Capobianco C, Drake M. Partitioning and solubility of PGEs

- in oxides and silicates[J]. *Mineralogical Magazine* 1994, 58A: 144–145.
- [59] Capobianco C J, Hervig R L, Drake M J. Experiments on crystal/liquid partitioning of Ru, Rh and Pd for magnetite and hematite solid solutions crystallized from silicate melt[J]. *Chemical Geology*, 1994, 113(1/2): 23–43.
- [60] Richter K, Campbell A J, Humayun M, et al. Partitioning of Ru, Rh, Pd, Re, Ir, and Au between Cr-bearing spinel, olivine, pyroxene and silicate melts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(4): 867–880.
- [61] Berzina A. Platinum-group Element Geochemistry of Magnetite from Porphyry-Cu-Mo Deposits and their Host Rocks (Siberia, Russia) [J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2012, 86(1): 106–117.
- [62] Frost B R, Lindsley D H. Occurrence of iron-titanium oxides in igneous rocks[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1991, 25(1): 433–468.
- [63] Lee M J, Lee J I, Moutte J. Compositional variation of Fe-Ti oxides from the Sokli complex, northeastern Finland[J]. *Geosciences Journal*, 2005, 9(1): 1–13.
- [64] Sun W, Arculus R J, Kamenetsky V S, et al. Release of gold-bearing fluids in convergent margin magmas prompted by magnetite crystallization[J]. *Nature*, 2004, 431: 975–978.
- [65] Liang H Y, Sun W, Su W C, et al. Porphyry copper-gold mineralization at Yulong, China, promoted by decreasing redox potential during magnetite alteration[J]. *Economic Geology*, 2009, 104(4): 587–596.
- [66] Otake T, Wesolowski D J, Anovitz L M, et al. Mechanisms of iron oxide transformations in hydrothermal systems[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74(21): 6141–6156.
- [67] Maqueen K G, Cross A J. Magnetite as a geochemical sampling medium; Application to skarn deposits[C]// Eggleton RA, ed. *The state of the Regolith. Proceedings of the second Australian Conference on Landscape Evolution and Mineral Exploration*. Brisbane: Geological Society of Australia, 1998: 194–199.
- [68] Large D J, MacQuaker J, Vaughan D J, et al. Evidence for low-temperature alteration of sulfides in the Kupferschiefer copper deposits of southwestern Poland[J]. *Economic Geology*, 1995, 90(8): 2143–2155.

Characteristics of composition of trace elements and PGE in magnetite

WANG Minfang^{1, 2}, GUO Xiaonan¹, CHEN Mengting¹

(1. *Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;*

2. *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*)

Abstract: Characteristics of PGE contents in magnetite are analyzed and the concentration reaches 10^{-9} magnitude. PGE are PPGE, i. e. Pd, Pt, Rh. The reason of ppb concentration of PPGE in magnetite is the slight re-distribution and concentration during late hydrothermal activity. The concentration, low or high is strictly controlled by oxygen fugacity of crystallization of magma. Crystallinity of magnetite directly influence oxygen fugacity of magma system thus distribution of PGE content and metallogenic process.

Key Words: magnetite; trace elements; LA-ICP-MS; PGE