

镁铁质-超镁铁质岩体含矿性评价指标体系

——应用于寻找岩浆硫化物矿床

姜常义^{1,2}, 凌锦兰¹, 赵彦锋¹, 康珍¹, 宋艳芳¹, 王焱¹

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 为了能够快速、经济地从众多镁铁质-超镁铁质岩体中筛选出有利于赋含岩浆硫化物矿床的岩体, 尝试着论述了岩体含矿性评价指标体系。构成该体系的要素包括: 构造环境、岩浆源区性质、原生岩浆、岩体类型、岩浆分异程度、质量平衡、岩浆含水量、同化混染、矿物学、造岩矿物晶体化学、主量元素地球化学和物化探异常等。该指标体系仅仅是初步建立, 尚需一个不断深化、完善的过程。

关键词: 岩浆硫化物; 幔源岩浆岩; 含矿性; 评价指标体系

中图分类号: P588.1

文献标识码: A

自 19 世纪 80 年代发现 Sudbury 矿床以来, Ni 元素就逐渐成为近现代冶金业广泛应用的一种金属元素, 这种社会需求是推动镍铜铂硫化物矿床研究不断深入的原动力。一个多世纪以来, 科学家们从不同角度, 采用多种方法, 对该类矿床开展了持续不断的研究, 累积了瀚如烟海的资料, 相应的认识也在不断深化。与之相比, 有关岩体含矿性评价指标体系方面的系统论述则鲜见于著述之中, 而这方面的论述正是许多矿产勘查单位亟需的。笔者不揣冒昧, 做了这方面的尝试, 以飨读者。论述岩体含矿性评价指标体系的目的在于能够最快捷、经济地从众多岩体中筛选出含矿岩体。所以, 含矿性评价指标体系应该建立在成矿条件、成矿过程、控矿因素、有效找矿方法等方面的研究基础上, 含矿性评价指标体系与矿床成因研究原本就是一对孪生姐妹。笔者对于构成指标体系的要素就是基于这种考虑而建立的。

1 构造环境

构造环境是成矿条件的综合表现, 大多数矿床主要形成于某一种或某几种特定的构造环境中。因此, 各种矿床成因分类都特别注重构造环境。Naldrett (2009) 根据构造背景和岩浆作用对镍铜铂族硫化物矿床进行了分类(表 1)。汤中立等(2011) 将形成镍铜铂矿床的构造环境分为与地幔柱有关、陨击、溢流玄武岩、大陆边缘裂谷、大陆裂谷和碰撞后伸展等六种环境。

从全球范围来看, 含镍铜铂矿的岩体(及火山岩)可以在多种构造环境产出, 但是, 目前板块汇聚边缘环境中仅发现矿化体, 而未发现工业矿床; 虽然陨石撞击形成了全球第二大的 Sudbury 矿床, 但这只是一个特例。因此, 从有利于指导找矿的角度看, 可以将形成镍铜铂硫化物矿床的构造背景分为以下 4 种主要类型。

收稿日期: 2012-06-25; 修回日期: 2012-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(40872070、41102045)

作者简介: 姜常义(1951-), 男, 教授, 主要从事岩石学研究。E-mail: jiangchangyi001@163.com

表1 根据构造背景对镍铜硫化物矿床的分类

Tab.1 Classification of sulfide nickel-copper deposits based on "petro-tectonic setting"

分类	相关岩浆作用	矿床	岩浆作用的构造背景
1	科马提岩	1=Wiluna-Norseman 绿岩带 (太古宙)	绿岩带
		2=Abitibi (太古宙)	
		3=Zimbabwe (太古宙)	
		4=Tompson (元古代)	裂谷化大陆边缘
		5=Raglan (元古代)	
2	溢流玄武岩	6=Noril'sk (显生宙)	三联点裂谷
		7=Duluth (新元古代)	
		8=Muskox (新元古代)	裂谷化大陆边缘
		9=Insizwa (显生宙)	
		10=Wrangelia (显生宙)	
3	铁质苦橄岩	11=Pechenga (中元古代)	裂谷化大陆边缘
4	橄长岩-斜长岩-花岗岩	12=Voisey's Bay (新元古代)	裂谷
5	苦橄岩-拉斑玄武岩	13=Montcalm (太古宙)	绿岩带
		14=金川 (中元古代)	裂谷化大陆边缘
		15=Niquelandia (中元古代)	大陆裂谷
		16=Moxie (显生宙)	造山带 (被动)
		17=Aberdeenshire Gabbros (显生宙)	
		18=Rona (显生宙)	
		19=Acoje (显生宙)	蛇绿岩带 (大洋)
6	陨石撞击熔融	20=Sudbury (中元古代)	陨石撞击
7	乌拉尔-阿拉斯加, 碱性组合	21=Duke Island (显生宙)	汇聚边缘
		22=Turnagain Arm (显生宙)	
		23=Salt Chuck (显生宙)	
		24=Quetico (太古宙)	可能是弧前背景

(1) 克拉通内部和边缘裂谷或伸展环境。克拉通边缘裂谷或伸展环境主要形成以 Ni、Cu 元素为主的硫化物矿床, 例如, 金川、Pechenga、Voisey's Bay 岩体等 (Pirajno et al., 2004; 汤中立等, 2006)。而克拉通内部裂谷环境主要形成以铂族元素为主的硫化物矿床, 例如, Bushveld、Great Dyke、Stillwater 岩体等 (Premo et al., 1990; Naldrett, 1989, 1999, 2004)。

(2) 与地幔柱有关的大火成岩省环境。此类环境所形成的矿床数量并不多, 但世界上规模最大的 Noril'sk 矿床却形成于此种环境, Duluth 也形成于此类环境, 其品位低而难以利用 (Naldrett,

1999)。我国云南白马寨矿床、新疆北山地区的坡一、坡十、红石山矿床属此类 (Zhou et al., 2008; 凌锦兰等, 2010)。

(3) 绿岩带环境。产于太古宙绿岩带科马提岩中的镍矿床主要限于澳大利亚西部的 Kambalda 地区 (Naldrett, 1999)。

(4) 后碰撞伸展环境。新疆北部的喀拉通克、黄山岩带和吉林红旗岭矿床属此类环境, 国外仅知西班牙有一个矿床产于此类环境 (韩宝福等, 2004; 汤中立等, 2006; 姜常义等, 2009)。

所以, 此类环境极具中国特色, 且主要产于古亚洲域。

2 岩浆源区性质

根据目前的研究成果, 赋存镍铜铂硫化物矿床的幔源岩浆岩的岩浆源区性质可分为以下几种类型。

(1) 富集型大陆岩石圈地幔。例如, 金川、Bushveld、Great Dyke、Voisey' Bay 等, 这些岩体的共同特征是都具有富集型地幔的 Nd、Sr 同位素组成, 且变化范围很小 (Amelin et al., 2000; Carr et al., 1999; Maier et al., 2000; 汤中立等, 2006)。

(2) OIB 型地幔。产于大火成岩省环境中含矿岩体的岩浆源区都属此类, 例如, Noril'sk-Talnah、新疆坡一、坡十、红石山、罗东等岩体 (Naldrett, 1989, 1999; 姜常义等, 2004a, 2004b, 凌锦兰等, 2011)。

(3) 原始地幔。具有此种岩浆源区性质的含矿岩浆岩主要限于太古宙绿岩带中的科马提岩 (Naldrett, 1999)。由于其形成时代早, 地幔分异演化程度低, 各种同位素体系尚未明显地偏离原始地幔的标准值。

(4) 软流圈地幔+岩石圈地幔。多种同位素体系、元素地球化学与岩石学研究证明, 新疆北部的喀拉通克、黄山东、黄山等岩体主要是上涌的软流圈地幔减压熔融的产物, 并含有一部分拆沉的岩石圈地幔被软流圈加热熔融的物质 (姜常义等, 2009; 王玉往等, 2006a, 2006b, 2008; 夏明哲等, 2008; 舒晓峰等, 2012; 张照伟等, 2012)。

3 原生岩浆

根据现有资料, 含镍铜铂矿岩体(及火山岩)的原生岩浆均为高镁拉斑玄武岩、苦橄岩和科马提岩。

(1) 高 Mg 拉斑玄武岩。Bushveld、Great Dyke、Stillwater、Noril'sk-Talnah、Sudbury、金川、喀拉通克、黄山东、图拉尔根和葫芦等岩体的原生岩浆均属此类, 但是国际上对于高 Mg 拉斑玄武岩的 MgO 含量并没有形成统一的认识 (Naldrett, 1999; 孙赫等, 2006; 汤中立等, 2006; 夏明哲等, 2008)。根据金川岩体原生岩浆的 MgO 含量为 10.8%, 不同学者计算的喀拉通克

和黄山岩带诸含矿岩体原生岩浆的 MgO 含量都在 11%~12%。笔者在此提出, 可以考虑将高镁拉斑玄武岩的 MgO 含量界定为 $\geq 10\%$ 。全球洋中脊玄武岩的 MgO 含量平均值为 7.6%, 可资对比。

(2) 苦橄岩。Pechenga、坡一、坡十、红石山、罗东、白石泉和天宇等岩体的原生岩浆属于此类 (Naldrett, 1999; 柴凤梅等, 2006; 凌锦兰等, 2011; 唐冬梅等, 2009; 赵双喜等, 2012)。苦橄质原生岩浆可以进一步分为两种亚类, Pechenga 岩体属于 Fe 富集型, 而其余岩体不属于 Fe 富集型。

(3) 科马提岩。属于此类的原生岩浆仅限于太古宙绿岩带中的科马提岩。

之所以强调原生岩浆的 MgO 含量, 是因为该数值与源区橄榄岩的部分熔融程度正相关。地幔橄榄岩中有一部分硫化物包含在橄榄石内, 若熔融程度低, 这部分硫化物很少进入岩浆, 导致岩浆贫 S (Naldrett, 2009)。当熔融程度高时, 地幔橄榄岩中的大部分硫化物都被熔融并进入岩浆, 使岩浆富 S, 有利于成矿。此外, 在含矿岩浆进入中间岩浆房之前不应发生硫化物熔离, 否则不利于在终端岩浆房成矿。

4 岩体类型

赋含镍铜铂硫化物岩体的形态是多种多样的, 最常见的岩体形态为岩席、岩床、岩盆和岩墙等。根据岩石结构构造, 可以将这些岩体划分为 2 种类型: ①层状岩体或具有明显堆晶结构和堆晶层理的岩体。②多岩相复式岩体。

“层状侵入体”这一概念是在 20 世纪 60 年代由 Wager et al. (1968) 提出的, 层状侵入体是指由岩浆周期性注入, 并且具有类似沉积地层韵律旋回的层状构造火成侵入体 (Wager et al., 1968; Wendlandt, 1982)。根据这一定义, 层状岩体的判别标志应该包括以下几个方面: 非常发育的堆晶结构; 清晰的堆晶层理; 可以按照研究沉积地层同样的方法将这些堆晶层理划分为若干个堆晶韵律, 若干个堆晶韵律又可以组成一个堆晶旋回; 堆晶韵律与旋回是由岩浆多次注入到岩浆房中形成的。世界上大多数赋含 Ni、Cu、Pt 硫化物矿床的岩体都属层状岩体, 例如, Bushveld、Subdury、Norislk-

Tulnahe、Great Dyke、Stillwater、金川、坡一和坡十等。在层状岩体中,矿体形态与其赋存的岩相带一致,呈稳定的层状体,主要赋存于岩体的下部层序中,可以是一层,也可以是多层。

多岩相复式岩体是指由多种岩相构成、但堆晶结构和堆晶层理不发育的岩体。在大多数情况下,构成岩体的岩相主要包括辉长岩相(暗色辉长岩、辉长岩、淡色辉长岩、斜长岩、闪长岩)、苏长岩相、辉石岩相和橄榄岩相。各种岩相相对集中产出,构成岩相带,岩相带之间为侵入接触关系,而且具有相对固定的侵位顺序:辉长岩相→苏长岩相→辉石岩相→橄榄岩相。辉长岩相总是侵位在先,橄榄岩相总是最后侵位,矿浆继橄榄岩相侵位之后贯入。海绵陨铁状矿石主要赋存在橄榄岩相中,浸染状矿石主要赋存在苏长岩相和辉石岩相中。若橄榄岩相侵位与矿浆贯入的时差小,则矿浆往往贯入到橄榄岩相内部或其附近;若二者的时差大,块状矿石的赋存部位受构造裂隙控制,而与岩相带无关。

5 岩浆分异程度

不只是针对岩浆硫化物矿床而言,对于所有的岩浆矿床而言,岩浆分异程度都是至关重要的成矿因素。这是因为岩浆分异程度越高,越有利于成矿物质聚集到一起,成大矿成富矿。否则,就会不成矿或成贫矿。世界上重要的岩浆硫化物矿床都赋存在高度分异的岩体中,而分异弱的岩体往往不成矿。分离结晶是幔源岩浆演化的主要机制,橄榄石、辉石、铁钛氧化物等富含 Fe^{2+} 矿物分离结晶会显著降低岩浆中 Fe^{2+} 的活度,从而降低达到硫化物饱和点的 S 溶解度 (SCSS),并增加演化岩浆中 S 的丰度,斜长石的大量分离结晶也会增加演化岩浆中 S 的丰度,这些效应累计到一定程度,就会使岩浆中的硫化物达到过饱和并融离 (Naldret, 2009; Lightfoot et al., 1997; Irvine, 1975)。

在野外很容易就能判断岩浆分异程度。岩石类型越多,并出现只有在岩浆极端分异情况下才可能出现的岩石类型,就意味着岩浆分异充分。例如,新疆坡一、坡十侵入体中各自的岩石类型多达 17、18 种,基性程度最高的岩石是纯橄岩,最低的岩石是石英闪长岩 (SiO_2 含量为 $65\% \pm$);青海牛鼻子梁岩体的岩石组合也是从橄榄岩至英云闪长岩,

后者的石英含量达 35%,属花岗岩类。

根据岩石组合判断岩浆分异程度时一定要注意区分 2 种情况:一种是在中间岩浆房经过不同程度分异所形成的岩浆上侵后赋存在同一个高位岩浆房,固结后形成了同一个岩体,在此岩体中可以看到所形成的各种岩石类型;另一种情况是,在中间岩浆房分异形成的不含矿辉长岩岩浆先期侵位,形成一个大的或多个较小的辉长岩体,然后含矿的超镁铁质岩浆上侵到另外的空间,构成单独的岩体。这种情况下,应把同期同源的岩体作为一个整体来分析其岩浆分异程度。

6 质量平衡

难以想象,某些幔源岩浆在生成时就是硫化物饱和或过饱和的,在几乎所有的情况下,原生岩浆都是不饱和硫化物。所以,只有在岩浆总体积大、成矿物质高度浓集的情况下才能成大矿,反之亦然。有些岩体的成矿条件好,但未能成大矿,恐怕就是与岩浆的总体积有限有关。鉴于此,当我们在某一个岩带部署找矿工作时,不应只关注一个岩体,而应当开展必要的区域岩石学工作。将同期、同源生成的岩带或岩体群作为整体来考虑。例如,在云南白马寨、四川杨柳坪、塔里木板块南缘的达拉库岸等地往往呈小岩体群产出,单个岩体的出露面积往往都小于 $1 km^2$,大多数岩体为不含矿的辉长岩单相岩体,成矿物质都聚集到 1~2 个有橄榄岩相的岩体中。例如,新疆北山的坡北岩体总面积近 $200 km^2$,构成该岩体主体的镁铁质层状岩系和非层状的橄榄辉长苏长岩都不含 Ni、Cu 硫化物矿床,成矿物质都聚集到以超镁铁质岩石为主的小侵入体(坡一、坡十)中。

7 岩浆含水量

通常将赋存在镁铁质-超镁铁质岩体中的硫化物矿床归为岩浆矿床。事实上,这类矿床在岩浆阶段成矿之后都叠加有热液阶段的成矿,属于岩浆-热液复合成因矿床,只是热液阶段成矿作用的经济价值小。热液阶段成矿作用的普遍性意味着富水的岩浆有利于成矿。富水的岩浆在生成时往往部分熔

融程度较高,有利于更多的硫化物进入岩浆。岩浆富水有利于成矿物质的运移与聚集,是成矿过程的重要媒介。所以应当将岩浆的含水量纳入评价岩体含矿性的指标体系。

岩浆富水会促使含水矿物在岩浆结晶的较早阶段就开始大量结晶。例如,在有些橄榄岩相中就含有相当数量的金云母和褐色普通角闪石,甚至形成角闪石岩;另一方面,富水岩浆必然会在其残余岩浆阶段和岩浆期后阶段形成大量的岩浆热液,从而导致岩体、尤其是含矿岩相产生普遍而强烈的热液蚀变。世界上已知的含矿岩体或含矿岩相往往都有一定数量的原生含水矿物,并且有普遍而强烈的热液蚀变。事实上,没有一个含矿岩体或岩相仅具有微弱的热液蚀变。

8 同化混染问题

目前,国外许多著名的镍铜硫化物专家主要是依据 Noril'sk-Talnah 矿床的研究成果和 S 含量与压力呈反相关的实验成果,认为同化混染、尤其是外来 S 的加入是不可或缺的成矿条件,否则就不可能成矿。笔者对国内外岩浆硫化物矿床的研究证明,有关同化混染与外来 S 加入的问题可以分为 3 种情况:第一种情况是 Noril'sk-Talnah 矿床,从 S 同位素组成来看,确有明显的外来 S 的加入,而且含矿岩浆有明显的同化混染(Grinenko, 1985; Naldrett, 1989)。第二种情况是以坡一、坡十为代表,这些岩体有明显的同化混染,但没有外来 S 的加入。这是因为这些岩体的围岩都是元古宙的变质岩,岩石中 S 的丰度远低于幔源岩浆岩。第三种情况是以金川、喀拉通克、黄山、葫芦和图拉尔根等矿床为代表,其 S 同位素组成基本上都是地幔 S,而且同化混染弱(汤中立等,2006)。由此可见,有些矿床成矿过程中有明显外来 S 的加入,而有些矿床成矿过程中没有或很少有外来 S 的加入。同化混染的程度也差别甚大。所以,可以将同化混染视为形成 Ni、Cu 硫化物矿床的积极因素,但难以将外来 S 的加入与同化混染视为成矿作用的决定性因素。有必要指出,国外有些学者将同化混染视为形成铂族元素矿床的消极因素(Maier et al., 2009)。这是因为 Bushveld 岩体北部岩枝有较明显的同化混染,导致矿体厚度增大,品味降低,因而明显地降低了其经济价值

(Maier et al., 2009)。

在岩浆房中,硅酸盐矿物的大量结晶必然会明显地提高剩余岩浆中 S 的浓度,橄榄石、铬尖晶石等富 Fe^{2+} 矿物的结晶、演化岩浆中 SiO_2 浓度的增加、温度的降低以及氧逸度的升高都会降低岩浆中硫化物达到饱和点的 S 溶解度(SCSS),从而促使硫化物达到过饱和并成矿。所以在有些情况下,成矿过程实际上就是岩浆自身演化过程的有机组成部分。

鉴于各个矿床之间客观存在的明显差异和认识的分歧,笔者只能将同化混染作用视为评价岩体含矿性的参考性指标。

9 某些矿物学标志

大多数岩浆镍铜硫化物矿床都赋存在二辉橄榄岩和苏长岩中,而非单辉橄榄岩和辉长岩。Bushveld、Great Dyke 和 Stillwater 岩体中的铂矿层主要赋存在以斜方辉石为主体的辉石岩中。这些现象的反复出现喻示着可以将斜方辉石的存在与否及数量视为评价岩体含矿性的重要指标之一。在有明显蚀变的情况下,橄榄岩中的斜方辉石会转化为绢石,单斜辉石会转化为透闪石,很容易用肉眼区分这 2 种蚀变矿物。

在镍铜硫化物矿床中,磁黄铁矿总是数量最多、结晶最早的硫化物,而且在常见的硫化物中,磁黄铁矿稳定存在所需要的氧逸度是最低的(沈渭洲, 1994)。这就意味着形成岩浆硫化物矿床的必要条件之一是岩浆房中应该具有低 fO_2 或低 fO_2/fS_2 值。而黄铁矿、磁铁矿结晶则需要较高的 fO_2 条件。磁黄铁矿、镍黄铁矿主要形成于岩浆阶段;黄铁矿、磁铁矿主要形成于热液阶段;黄铜矿既形成于岩浆阶段,又可形成于热液阶段。在一个封闭的岩浆房中,伴随着正常的结晶作用,因大量的 FeO 进入造岩矿物,在演化的岩浆中 Fe_2O_3/FeO 值会逐渐升高,但这种过程是很缓慢的。当从岩浆中分离出独立的流体相之后,由于 H_2 气的优先逸失等因素的影响,会明显地增加岩浆房中的 fO_2 。所以,在一个封闭的岩浆房中,从演化的岩浆中分离出独立的流体相的过程必然会伴随着 fO_2 的快速跃升。而在此前,当岩浆房中只有一种液相(即岩浆相)时, fO_2 的升高是渐进的和缓慢的。

所以在野外选择岩体时,如果经常能够见到磁黄铁矿时,应将其视为有利条件。反之,若经常见到的是浸染状黄铁矿和同样需要高氧逸度的磁铁矿时,应将其视为不利条件。

10 造岩矿物晶体化学

为了更好地理解不同类型岩体之间造岩矿物的晶体化学特征,笔者将寄主岩浆硫化物与岩浆型磁铁矿岩体中的造岩矿物进行对比分析(造岩矿物晶体化学和主量元素地球化学数据均来自 Premo et al., 1990; Meurer, 1996; Naldrett, 1989, 1999, 2004; Sharpe et al., 1985; Kruger et al., 1985; Paces et al., 1993; Walraven et al., 1990; Hatton, 1995; 董显扬等, 1992; 汤中立等, 2006; 陶琰等, 2006, 2007; 王润民等, 1991; 姜常义等, 2009; Zhou et al., 2004; 王玉往等, 2006a, 2006b, 2008; 夏明哲等, 2008; 孙赫等, 2006; Charlier et al., 2006, 2008; 胡素芳等, 2001; 刘红英等, 2004; Zhou et al., 2005, 2008; Shellnutt et al., 2009; 解广轰, 2005。详细对比图见姜常义等, 2011)。

10.1 橄榄石

在寄主岩浆硫化物矿床的岩体中,大多数橄榄石的 SiO_2 介于 37%~41%, Fo 分子 ($100\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$) 介于 80~86, 少数 Fo 介于 65~80, MgO 含量介于 33%~48%, 半数以上大于 40%, FeO 含量为 13%~29% (半数以上低于 20%), NiO 平均值为 0.15%。在含岩浆型磁铁矿床的岩体中,橄榄石的 SiO_2 介于 32%~39.5%, Fo 分子介于 50~83, 约有半数橄榄石的 Fo 分子低于 70, MgO 含量介于 25%~43%, FeO 含量为 17%~55% (大多数数据介于 13%~35%), NiO 平均值为 0.08%, 约有半数橄榄石的 NiO 为 0 或接近于 0。由此可见,前一类岩体中的橄榄石富 Si 、 Mg 、 Ni 而贫 Fe , 后一类岩体富 Fe 而贫 Si 、 Mg 、 Ni 。

10.2 斜方辉石

根据笔者目前所掌握的数据,寄主岩浆硫化物矿床的岩体中的斜方辉石主要是古铜辉石,仅有少量是紫苏辉石;而含岩浆型磁铁矿床的岩体中的斜方辉石主要是紫苏辉石,仅有少量古铜辉石。这就意味着,2类岩体中斜方辉石的晶体化学应该有系

统差别。前一类岩体中斜方辉石的 SiO_2 含量 (50%~57%)、 MgO (多在 24%~34%, 个别 < 24%) 均高于后一类岩体中的相应值 (SiO_2 (50%~52%)、 MgO (20%~26%))。与此相反,前者的 FeO 含量多低于后者。由此可见,前一类岩体中的斜方辉石相对于后一类岩体富 Si 、 Mg 而贫 Fe 。

10.3 单斜辉石

寄主岩浆硫化物矿床的岩体中单斜辉石主要是普通辉石和透辉石, SiO_2 含量介于 50%~55%, $\text{Mg}^\#$ 介于 60~90, FeO 变化于 2%~14%;而在寄主岩浆型磁铁矿床的岩体中,除普通辉石和透辉石外,含有少量铁普通辉石, SiO_2 含量为 47%~52%, $\text{Mg}^\#$ 值为 55~85, FeO 含量均大于 6% (少数样品 > 20%)。二者的 TiO_2 含量变化范围相同,但前一类岩体中单斜辉石的 TiO_2 含量大于 1% 的样品所占比例明显少于后一类岩体。二者的 CaO 、 Al_2O_3 含量基本相当。由此可见,前一类岩体中的单斜辉石比后一类岩体富 Si 、 Mg 而贫 Fe 、 Ti 。

10.4 斜长石

2类岩体中均有钠长石和更长石,显然与钠黝帘石化有关,不能代表原生斜长石组成。含岩浆型磁铁矿床的岩体中高牌号斜长石的 A_n 介于 40~76, 而寄主岩浆硫化物矿床的岩体中高牌号斜长石的 A_n 介于 45~80, 说明前者的斜长石 A_n 牌号总体上低于后者。

11 主量元素地球化学

为了更好地理解赋含岩浆硫化物的镁铁质-超镁铁质岩石的主量元素地球化学,笔者将该类岩体与含岩浆型磁铁矿床的岩体进行对比。

含岩浆型磁铁矿床岩体的 m/f 值大多小于 2, 大部分样品的 MgO 含量小于 10%, TiO_2 含量大于 2% (也有少部分样品小于 2%), 半数以上样品大于 1%, 最高达 3%±, 少数样品的 P_2O_5 含量小于 1%。而寄主岩浆硫化物矿床的岩体的 m/f 值大多介于 2~6.5, TiO_2 含量都小于 2% (半数以上样品小于 1%), P_2O_5 含量均大于 1%, 大多数样品小于 0.2%。在同等 MgO 含量的前提下,与寄主岩浆硫化物矿床的岩体相比,含岩浆型磁铁矿床的岩体富 FeO^* 、 CaO 、 Al_2O_3 、 Na_2O , 而贫 SiO_2 、 K_2O 。

此外,以同等 MgO 含量作为比较的基础,含岩浆型磁铁矿床岩体中 Ni、Cr 和 Cu 的丰度明显低于寄主岩浆硫化物矿床岩体中的相应丰度,而 V 的丰度高于后者,2 类岩体中 Co 丰度没有明显差异。

综上所述,含岩浆型磁铁矿床的岩体明显富集 FeO^* 、 TiO_2 、 P_2O_5 、V, 相对富集 CaO 、 Al_2O_3 、 Na_2O ; 寄主岩浆硫化物的岩体相对富集 SiO_2 、 MgO 、Ni、Cr 和 Cu。而且,含岩浆型磁铁矿床岩体的 FeO^* 与 TiO_2 和 P_2O_5 含量具有比较明显的正相关趋势,说明在这些岩体中, FeO^* 、 TiO_2 和 P_2O_5 的同步富集是这类岩浆固有的特征,而寄主岩浆硫化物矿床的岩体则没有这种特征。

12 物化探异常情况

通常各种勘查单位在选择岩体过程中,以及选定岩体之后部署各项工程时都要参考物化探异常,并将是否存在物化探异常作为判断岩体含矿性及圈定矿体位置的重要依据。

根据笔者观察,无论是镁质橄榄岩还是铁质橄榄岩,也无论这些岩体是否含镍铜铂硫化物矿床,在 1:5 万或更大比例尺的化探异常图中,在岩体赋存部位一般都会出现 Cr、Ni、Cu、Co 异常,这是因为这些元素在橄榄岩中的丰度会明显高于大多数地质体。例如:镁质橄榄岩中的硅酸镍可以高达 2%,所以,在露头不好的情况下,化探异常是捕捉岩体的有效手段,但对于鉴别岩体是否含矿则效果不理想。如果水系沉积物测量的 Cu、Ni 组合异常套合于铁质基性-超基性岩体,是寻找岩浆型铜镍矿的有利靶区;但如果水系沉积物测量的 Cu、Ni 组合异常套合于蛇绿岩套,则找矿方向并不是岩浆型铜镍矿,因为世界上几乎没有具经济价值的岩浆型铜镍矿赋存于蛇绿岩套中,此类地质背景的水系沉积物 Cu、Ni 组合异常,一般 Ni 来自镁质超基性岩,而 Cu 与基性火山岩有关(杨合群等, 2012)。

大多数情况下,在岩体内部部署重型山地工程时都要参考物探异常,最常用的物探方法是地面磁测与电法相结合,并且在许多情况下将出现磁异常的部位视为矿体赋存的部位。在镍铜铂硫化物矿床出现的多种硫化物中,只有磁黄铁矿可能有磁性,但是磁黄铁矿有 2 种变体,高温变体属六方晶系,

低温变体属单斜晶系,高温变体不具磁性,低温变体具顺磁性;另一方面,橄榄石在蛇纹石化过程中会析出大量的粉尘状磁铁矿,从而使该岩相赋存的部位产生磁异常。在实际的地球物理勘查过程中,在同等含量的前提下,磁铁矿所显示出的磁场强度比磁黄铁矿显示出的磁场强度至少高出 1 个数量级,这就意味着含有 10% 磁铁矿的橄榄岩所显示的磁场强度不会低于由纯单斜晶系磁黄铁矿所构成的硫化物矿体所显示的磁场强度。所以对于磁异常物理意义的理解应谨慎对待。只有在磁异常与电法异常很好吻合的情况下才可能是矿致异常。

13 结束语

笔者尝试着从 12 个方面论述了评价镁铁质-超镁铁质岩体赋含岩浆硫化物矿床的指标体系。我们深知人类对所有客观真理的认识都要经历由表及里、由浅入深、逐步完善的漫长过程。惟其如此,我们真诚希望与从事理论研究的科学家、从事勘查工作的工程师们广泛交流,尤其是希望能够听到来自各界的批评意见,以便不断地修正、补充、完善含矿性评价指标体系,更好地服务于社会。

参考文献 (References):

- 柴凤梅, 张招崇, 毛景文, 等. 中天山白石泉镁铁-超镁铁质岩体岩石学与矿物学研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2006, 25 (1): 0001-0012.
- Chai Fengmei, Zhang Zhaochong, Mao Jinwen, et al. Petrography and mineralogy of Baishiquan Cu-Ni-bearing mafic-ultramafic intrusions in Xinjiang [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2006, 25 (1): 0001-0012 (in Chinese).
- 董显扬, 李行, 叶良和, 等. 中国超镁铁质岩[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- Dong XY, Li X, Ye LH et al. Ultramafic rocks in China [M]. Geological Publishing House, Beijing, 1992. (in Chinese).
- 韩宝福, 宋彪, 陈立辉, 等. 新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿镁铁-超镁铁杂岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 科学通报, 2004, 49: 2324-2328.
- Han BF, Song B, Chen LH, et al. SHRIMP U-Pb zircon age of the mafic-ultramafic rocks and geological significance in the Karatungk and Huangshandong, Xinjiang [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49: 2324-2328 (in Chinese).

- 胡素芳, 钟宏, 刘秉光, 等. 攀西地区红格层状岩体的地球化学特征[J]. 地球化学, 2001, 30 (2): 131-139.
- Hu SF, Zhong H, Liu BG, et al. Geochemistry of the Hongge layered intrusion in the Panxi area [J]. *Geochimica*, 2001, 30 (2): 131-139 (in Chinese).
- 姜常义, 张蓬勃, 卢登蓉, 等. 柯坪玄武岩的岩石学、地球化学、Nd、Sr、Pb 同位素组成与岩石成因[J]. 地质论评, 2004, 50 (5): 492-500.
- Jiang CY, Zhang PB, Lu DR, et al. Petrology, geochemistry, Nd, Sr, Pb isotopic compositions and petrogenesis of Keping basalts [J]. *Geological Review*, 2004, 50 (5): 492-500 (in Chinese).
- 姜常义, 贾承造, 李良辰, 等. 新疆麻扎尔塔格地区铁富集型高镁岩浆的源区[J]. 地质学报, 2004b, 78 (6): 770-780.
- Jiang CJ, Jia CZ, Li LC, et al. Source of the Fe-riched-type high-Mg magma in Mazhartag region, Xinjiang [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004b, 78 (6): 770-780 (in Chinese).
- 姜常义, 夏明哲, 钱壮志, 等. 新疆喀拉通克镁铁质岩体群的岩石成因研究[J]. 岩石学报, 2009, 25 (4): 749-764.
- Jiang CY, Xia MZ, Qian ZZ, et al. The petrogenesis of Kalatongke mafic rock intrusions, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25 (4): 749-764 (in Chinese).
- 姜常义, 夏昭德, 凌锦兰, 等. 寄主岩浆硫化物和氧化物矿床的镁铁质-超镁铁质岩体对比分析与成矿过程评述[J]. 岩石学报, 2011, 27 (10): 3005-3020.
- Jiang CY, Xia ZD, Ling JL, et al. Comparison of host magmatic sulfide and oxide deposits of mafic-ultramafic intrusions and review the mineralizing process [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27 (10): 3005-3020 (in Chinese).
- 舒晓峰, 王雪萍, 张雨莲, 等. 青海虎头崖地区多金属矿床成因类型的厘定及找矿方向[J]. 西北地质, 2012, 45 (1): 165-173.
- Shu Xiaofeng, Wang Xueping, Zhang Yulian, et al. Determination of Multifarious Genesis and Prospecting of Polymetallic Metallogenic Deposit in Hutouya, Qinghai [J]. *Northwestern Geology*, 2012, 45 (1): 165-173.
- 张照伟, 李文渊, 高永宝, 等. 青海化隆基性-超基性岩带铜镍矿成矿条件与找矿潜力[J]. 西北地质, 2012, 45 (1): 140-148.
- Zhang Zhaowei, Li Wenyuan, Gao Yongbao, et al. Ni-Cu Mineralization Conditions of Hualong Basic-Ultrabasic Rocks Belt in Qinghai Province and Its Prospecting Potentiality [J]. *Northwestern Geology*, 2012, 45 (1): 140-148.
- 刘红英, 夏斌, 梁华英, 等. 攀西茨达和太和层状岩体时代[J]. 高校地质学报, 2004, 10 (2): 179-185.
- Liu HY, Xia B, Liang HY, et al. Geochronology of layered intrusions in Cida and Taihe districts, Panxi area, Sichuan province [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2004, 10 (2): 179-185 (in Chinese).
- 凌锦兰, 夏明哲, 郭娜欣, 等. 新疆北山地区罗东镁铁质-超镁铁质层状岩体岩石成因[J]. 地球化学, 2011, 40 (6): 499-515.
- Ling Jinlan, Xia Mingzhe, Guo Naxin, et al. Petrogenesis of Luodong mafic-ultramafic layered intrusion, Beishan region, Xinjiang [J]. *Geochimica*, 2011, 40 (6): 499-515 (in Chinese).
- 沈渭洲. 同位素地质学教程[M]. 北京: 原子能出版社, 1994.
- Shen WZ. Isotopic geology tutorial [M]. Atomic Energy Publishing House, Beijing, 1994 (in Chinese).
- 孙赫, 秦克章, 李金祥, 等. 东天山图拉尔根铜镍钴硫化物矿床岩相、岩石地球化学特征及其形成的构造背景[J]. 中国地质, 2006, 33 (3): 606 - 617.
- Sun H, Qin KZ, Li JX, et al. Petrographic and geochemical characteristics of the Tulargen Cu-Ni-Co sulfide deposit, East Tianshan, Xinjiang, and its tectonic setting [J]. *Geology in China*, 2006, 33 (3): 606-617 (in Chinese).
- 汤中立, 钱壮志, 姜常义, 等. 中国镍铜铂族岩浆硫化物矿床与成矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- Tang Zhongli, Qian Zhuangzhi, Jiang Changyi, et al. Magmatic Ni-Cu-PGE sulfide Deposits and Metallogenic Prognosis in China [M]. Geological Publishing House, Beijing, 2006 (in Chinese).
- 汤中立, 钱壮志, 姜常义, 等. 岩浆硫化物矿床勘查研究的趋势与小岩体成矿系统[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33 (1): 0001-0009.
- Tang Zhongli, Qian Zhuangzhi, Jiang Changyi, et al. Trends of Research in Exploration of Magmatic Sulfide Deposits and Small Intrusions Metallogenic System [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33 (1): 0001-0009 (in Chinese).
- 陶琰, 胡瑞忠, 王兴阵, 等. 峨眉山大火成岩省 Cu-Ni-PGE 成矿作用-几个典型矿床矿石地球化学特征的分析[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 25 (3): 236-244.
- Tao Y, Hu RZ, Wang XZ, et al. The Cu-Ni-PGE mineralization in the Emeishan large igneous province- Geochemical study on some typical deposits [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2006, 25 (3): 236-244 (in Chinese).
- 陶琰, 胡瑞忠, 漆亮, 等. 四川力马河镁铁-超镁铁质岩体的地球化学特征及成岩成矿分析[J]. 岩石学报, 2007, 23 (11): 2785-2800.
- Tao Y, Hu RZ, Qi L, et al. Geochemical characteristics and metallogenesis of the Limahe mafic-ultramafic intrusion, Sichuan [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23 (11): 2785-2800 (in Chinese).
- 赵双喜, 王永刚, 黎存林, 等. 柴达木盆地西北缘牛鼻子梁铜镍矿矿床特征及其发现意义[J]. 西北地质, 2012, 45 (1): 202-210.
- Zhao Shuangxi, Wang Yonggang, Li CunLing, et al. The Copper-Nickle Mine Features of Niubiziliang in North-West Margin of Chaidamu Basin, and Discoverable Sig-

- nificance [J]. *Northwestern Geology*, 2012, 45 (1): 202-210.
- 唐冬梅, 秦克章, 孙赫, 等. 天宇铜镍矿床的岩相学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征: 对东疆镁铁-超镁铁质岩体源区和成因的制约 [J]. *岩石学报*, 2009, 25 (4): 817-831.
- Tang DM, Qin KZ, Sun H, et al. Lithological, chronological and geochemical characteristics of Tianyu Cu-Ni deposit: Constraints on source and genesis of mafic-ultramafic intrusions in eastern Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25 (4): 817-831 (in Chinese).
- 王润民, 赵昌龙. 新疆喀拉通克一号铜镍硫化物矿床 [M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- Wang RM, Zhao CL. No. 1 Cu-Ni Sulfide Deposit in Karatungk, Xinjiang [M]. Geological Publishing House, Beijing, 1991 (in Chinese).
- 王玉往, 王京彬, 王莉娟. 东天山地区两类钒钛磁铁矿型矿床含矿岩石对比 [J]. *岩石学报*, 2006a, 22 (05): 1425-1436.
- Wang YW, Wang JB, Wang LJ. Comparison of host rocks between two vanadic titanomagnetite deposit types from the Eastern Tianshan Mountains [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006a, 22 (5): 1425-1436 (in Chinese with English abstract).
- 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 等. 岩浆铜镍矿与钒钛磁铁矿的过渡类型——新疆哈密香山西矿床 [J]. *地质学报*, 2006b, 80 (1): 61-73.
- Wang YW, Wang JB, Wang LJ, et al. An Intermediate type of Cu-Ni sulfide and V-Ti magnetite deposit: Xinjiang Xiangshanxi deposit, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006b, 80 (1): 61-73 (in Chinese).
- 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 等. 新疆尾亚含矿岩体锆石 U-Pb 年龄、Sr-Nd 同位素组成及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2008, 24 (4): 781-792.
- Wang YW, Wang JB, Wang LJ. Zircon U-Pb age, Sr-Nd isotope geochemistry and geological significance of the Weiya mafic-ultramafic complex, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24 (4): 781-792 (in Chinese).
- 夏明哲, 姜常义, 钱壮志, 等. 新疆东天山葫芦岩体岩石学及地球化学研究 [J]. *岩石学报*, 2008, 24 (12): 2749-2760.
- Xia MZ, Jiang CY, Qian ZZ, et al. Petrology and geochemistry for Hulu intrusion in East Tianshan, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24 (12): 2749-2760 (in Chinese).
- 解广爰. 大庙斜长岩和密云环斑花岗岩的岩石学和地球化学 [M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- Xie GH. Petrology and Geochemistry of Damiao anorthosite and Miyun rapakivi [M]. Geological Publishing House, Beijing, 2005 (in Chinese).
- 杨合群, 赵国斌, 李英, 等. 新疆-甘肃-内蒙古衔接区古生代构造背景与成矿的关系 [J]. *地质通报*, 2012, 31 (0203): 413-421.
- Zhou MF, Lesher CM, Yang ZX, et al. Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni-Cu- (PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district, Eastern Xinjiang, Northwest China: implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt [J]. *Chemical Geology*, 2004, 209: 233-257.
- Zhou MF, Robinson PT, Lesger CM, et al. Geochemistry, petrogenesis and metallogenesis of the Panzihua gabbroic layered intrusion and associated Fe-Ti-V oxide deposits, Sichuan province, SW China [J]. *Journal of Petrology*, 2005, 46 (11): 2253-2280.
- Zhou MF, Arndt NT, Malpas J. Two magma series and associated ore deposit types in the Permian Emeishan large igneous province, SW China [J]. *Lithos*, 2008, 103: 352-368.
- Amelin YLC, Valeyev O Naldrett AJ. Nd-Sr-Pb isotope systematics of crustal assimilation in the Voisey's Bay and Mushuau intrusions, Labrador, Canada [J]. *Economic Geology*, 2000, 95: 815-830.
- Carr HW, Kruger FJ, Groves DI, et al. The petrogenesis of Merensky Reef potholes at the Western Patinam Mine, Bushveld complex: Sr-isotopic for synmagmatic deformation [J]. *Mineralium Deposita*, 1999, 34: 335-347.
- Charlier B, Duchesne JC, Sakoma E. Magma chamber processes in the Tellnes ilmenite deposit (Rogaland Anorthosite Province, SW Norway) and the formation of Fe - Ti ores in massif-type anorthosites [J]. *Chemical Geology*, 2006, 234 (3-4): 264-290.
- Charlier B, Sakoma E, Sauvé M, et al. The Grader layered intrusion (Havre-Saint-Pierre Anorthosite, Quebec) and genesis of nelsonite and other Fe - Ti - P ores [J]. *Lithos*, 2008, 101 (3-4): 359-378.
- Grinenko LN. Sources of sulfur of the nickeliferous and barren gabbrodolerite intrusions of the northwest Siberian platform [J]. *International Geology Review*, 1985, 27: 695-708.
- Hatton CJ. Mantle plume origin for the Bushveld and Ventersdorp magmatic provinces [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 1995, 21: 571-577.
- Irvine TN. Crystallization sequences in the Muskox intrusion and other layered intrusion-II: Origin of chromitite layers and similar deposits of other magmatic ores [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1975, 36 (6-7): 991-1008.
- Kruger FJ, Marsh JS. The mineralogy, petrology, and origin of the Merensky cyclic units in the Western Bushveld Complex [J]. *Economic Geology*, 1985, 80: 958-974.
- Lightfoot PC, Hawkesworth CJ. Flood basalts and magmatic Ni, Cu and PGE sulfide mineralization: Comparative geochemistry of the Noril'sk (Siberian Trap) and West Greenland sequences [A]. In: Mahoney JJ and Coffin MF (eds.). Large igneous province [C]. Washington DC: American Geophysical Union, 1997, 357-380.
- Maier WD, Arndt NT, Curl EA. Progressive crustal con-

- tamination of the Bushveld complex; evidence from Nd isotopic analyses of the cumulate rocks [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2000, 140: 316-327.
- Maier WD, Barnes SJ. Formation of PGE deposits in layered intrusions. In: Li CS & Ripley EM (eds). *New developments in magmatic Ni-Cu and PGE deposits* [M]. Geological Publishing House, Beijing, 2009.
- Meurer WP, Boudreau AE. Petrology and Mineral Compositions of the Middle Banded Series of the Stillwater Complex [J]. *Journal of Petrology*, 1996, 37 (3): 583-607.
- Naldrett AJ. *Magmatic sulfide deposits* [M]. New York: Oxford University Press, 1989.
- Naldrett AJ. World-class Ni-Cu-PGE deposits; key factors in their genesis [J]. *Mineralium Deposita*, 1999, 34: 227-240.
- Naldrett AJ. *Magma Sulfide Deposits; Geology, Geochemistry and Exploration* [M]. Berlin: Springer, 2004.
- Naldrett AJ. Fundamentals of magmatic sulfide deposits. In: Li CS and Ripley EM (eds.) [A]. *New Developments in Magmatic Ni-Cu and PGE Deposits* [C]. Geological Publishing House, Beijing, 2009, 1-26.
- Paces JB, Miller JD. Precise U-Pb ages of Duluth complex and related mafic intrusions, northeastern, Minnesota; new insights for physical, petrogenetic, paleomagnetic and tectono-magmatic processes associated with 1.1Ga Midcontinent rifting [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98: 13997-14013.
- Pirajno F. Hotspots and mantle plumes; global intraplate tectonics, magmatism and ore deposits [J]. *Mineralogy and Petrology*, 2004, 82: 183-216.
- Premo WR, Helz RT, Zientek ML, et al. U-Pb and Sm-Nd ages for the Stillwater Complex and its associated dikes and sills, Beartooth Mountains, Montana; identification of a parent magma [J]. *Geology*, 1990, 18: 1065-1068.
- Sharpe MR, Hulbert LJ. Ultramafic sills beneath the Eastern Bushveld Complex; mobilized suspensions of early lower zone cumulates in a parental magma with boninitic affinities [J]. *Economic Geology*, 1985, 80: 849-871.
- Shellnutt JG, Zhou MF, Zellmer GF. The role of Fe-Ti oxide crystallization in the formation of A-type granitoids with implications for the Daly gap: An example from the Permian Baima igneous complex, SW China [J]. *Chemical Geology*, 2009, 259: 204-217.
- Walraven F, Armstrong RA, Kruger FJ. A chronostratigraphic framework for the north-central Kaapvaal Craton, the Bushveld Complex and Vredefort structure [J]. *Tectonophysics*, 1990, 171: 23-48.
- Wager L. R., Brown G. M. *Layered igneous rocks* [M]. Edinburgh & London: Oliver & Boyd, 1968.

Ore-Bearing Potential Evaluation Index System of Mafic and Ultramafic Intrusions

——Used to Search for Magmatic Sulfide Deposits

JIANG Chang-yi^{1,2}, LIANG Jin-lan¹, ZHAO Yan-feng¹, KANG Zhen¹,
SONG Yan-fang¹, WANG Yao¹

(1. *College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China;*

2. *Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering of
Ministry of Education, Xi'an 710054, China)*

Abstract: In order to choose magmatic sulfide deposits faster and more economical from mafic and ultramafic intrusions, we try to discuss ore-bearing potential evaluation index system. The evaluation index system consists of tectonic setting, the nature of magma source region, original magma, rock types, magmatic differentiation degree, mass balance, magmatic water content, assimilation, mineralogy, chemistry of rock-forming minerals, geochemical of major elements, geophysical and geochemical anomalies. The index system is set up initially, it requires a continuously deepening and improving process.

Key words: magmatic sulfide; mantle-derived magma; ore-bearing potential; evaluation index system