

文章编号:1672-6561(2014)01-0032-16

## 小岩体型铜镍硫化物(铂族)矿床成矿地质体研究进展

李德东,王玉往,王京彬,龙灵利,解洪晶,赵路通,石 煜

(有色金属矿产地质调查中心,北京 100012)

**摘 要:**对中国小岩体型铜镍硫化物(铂族)矿床成矿地质体的岩体规模、岩石组合及岩石地球化学特征进行了综述,并与其他类型铜镍硫化物矿床特征进行了对比,最后总结出了铜镍硫化物矿床成矿地质体的判别标志特征。结果表明:铜镍硫化物(铂族)矿床成矿地质体的出露形态不规则,多以岩脉、岩墙或岩床形式出露,出露面积较小,多小于 1 km<sup>2</sup>;岩石组合多以二辉橄榄岩、橄榄岩、橄榄辉石岩、辉石岩、苏长岩、辉长岩、闪长岩为主,岩相分带明显,岩体基性程度由内向外、从下向上逐渐降低,形成“外酸内基”、“上酸下基”的特征;岩石主要为铁质拉斑玄武岩系列;配分模式和蛛网图显示,橄榄石中 Ni 含量较低,大离子亲石元素和轻稀土元素富集,高场强元素和重稀土元素亏损,过渡族元素呈现 Cr、Ni 相对亏损的“W”型模式,铂族元素配分模式呈现 Pt、Pd 含量较高的左倾,源区为幔源但具有壳源的混染。

**关键词:**小岩体;铜镍硫化物矿床;成矿地质体;判别标志;岩石组合;构造环境;地球化学

**中图分类号:**P612;P588.1

**文献标志码:**A

## Review on Metallogenic Geological Bodies of the Small-intrusion-hosted Ni-Cu (-PGE) Sulfide Deposits

LI De-dong, WANG Yu-wang, WANG Jing-bin, LONG Ling-li, XIE Hong-jing,

ZHAO Lu-tong, SHI Yu

(China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Metallogenic geological bodies of the small-intrusion-hosted Ni-Cu (-PGE) sulfide deposits in China were reviewed, including the scale of intrusion, rock assemblage and geochemistry; the deposits were compared with other types of Ni-Cu sulfide deposits; and the identification marks of metallogenic geological bodies of Ni-Cu sulfide deposits were summarized. The results show that metallogenic geological bodies of Ni-Cu (-PGE) sulfide deposits occur as irregular shape like veins, dikes or sills, outcrop areas are mostly less than 1 km<sup>2</sup>; rock assemblage is mostly composed of iherzolite, peridotite, olivine pyroxenite, pyroxenite, norite, gabbro and diorite, and belongs to the iron-rich tholeiitic basaltic series; the petrographic zonation is evident, and the basic degree gradually decreases from the inside to the outside or from the below to the above of the intrusion, as like for “the outside is acidic and inside is basic” and “the above is acidic and the below is basic”; according to the patterns and spider diagrams, the content of Ni for olivine is low, LILE and LREE are enriched, HFSE and HREE are depleted, and the pattern of transition element is “W” type with the relative loss of Cr and Ni,

收稿日期:2014-03-08

基金项目:中国地质调查局地质大调查项目(12120113086300);国家自然科学基金项目(41372102,41030424)

作者简介:李德东(1975-),男,山东宁阳人,工程师,理学博士,E-mail:lidedong2005@126.com。

and the pattern of PGE is left with rich Pt and Pd, so that the sources are mantle-derived but with crustal contamination.

**Key words:** small intrusion; Cu-Ni sulfide deposit; metallogenic geological body; identification mark; rock assemblage; tectonic setting; geochemistry

## 0 引言

越来越多的事实证明,在勘查预测区只有确定了成矿地质体才能解决找矿的实际问题。根据前人的定义,地质作用的产物就是地质体,把与成矿有关的地质作用命名为成矿地质作用,成矿地质作用的产物称为成矿地质体,矿床的产出取决于成矿地质体的位置<sup>[1]</sup>,因此,成矿地质体的确定对于找矿具有重要意义。

铜镍硫化物矿床作为国民经济的战略控制资源,以其独特的地质背景和在岩浆成矿理论中所占的重要地位,一直是国内外地质勘查界十分关注的领域<sup>[2]</sup>。对这类矿床成矿地质体的研究,前人主要对国外一些大型、超大型矿床进行了总结。Ross 等对全球 145 个矿床根据容矿岩石特征划分为三大类:纯橄榄岩-橄榄岩类、辉长岩类和其他类型<sup>[3]</sup>; Naldrett 划分出了 6 类岩石组合特征,即科马提岩类、溢流玄武岩类、铁质苦橄岩类、斜长岩-花岗岩-橄长岩类、混杂苦橄岩-拉斑玄武岩类和陨石撞击熔岩类<sup>[4]</sup>。中国的岩浆型铜镍硫化物矿床前人也进行了大量报道和归纳总结。汤中立等重点强调了小侵入体成大矿的意义<sup>[5-11]</sup>;刘月星等强调了岩石组合和构造环境,并根据含矿岩体的构造环境和岩石组合,把中国铜镍硫化物矿床划分为过渡带内、地槽区内和与火山活动有关的侵入体类矿床三大类和 16 种岩石组合类型<sup>[12]</sup>。

尽管前人关注了与成矿作用有关的岩石组合特征,但并没有全面总结这类成矿地质体的特征标志,并且划分类型较为复杂,不能充分体现中国这类矿床主要与小侵入体有关的意义<sup>[5-10]</sup>。基于勘查预测角度,在前人分类的基础上,把中国岩浆型铜镍硫化物矿床分为两大类<sup>[13]</sup>,即小岩体型和其他类型;又根据构造环境把前者分为 4 个亚类(即古大陆边缘裂解型、造山带型、大陆溢流玄武岩型和阿拉斯加型),把后者分为 3 个亚类(即蛇绿岩型、科马提岩型和层状杂岩体型)。笔者主要综述了国内大部分小岩体型铜镍硫化物矿床的成矿地质体特征标志,就其他类型铜镍硫化物矿床的一些特征进行了比较,期望对这类矿床的勘查预测提供参考。

## 1 岩体特征

中国铜镍硫化物矿床的小岩体形成时代多集中于新元古代和古生代晚期—中生代早期。据目前统计结果来看,时代最老的为甘肃金川岩体(新元古代,833 Ma<sup>[14]</sup>),其次是古生代的成矿岩体,除阿拉斯加型小岩体(如菁布拉克岩体属于早古生代,434 Ma<sup>[15]</sup>)外,大多都集中在晚古生代,如东天山一带含矿小岩体形成年龄主要集中在 269~298 Ma,川滇一带大陆溢流玄武岩型含铜镍矿小岩体多集中在 250~260 Ma,时代最新的为中生代吉林赤柏松岩体(134 Ma<sup>[16]</sup>)。

中国小岩体型铜镍硫化物矿床的成矿地质体多以小岩体杂岩型为主,岩体规模通常较小,一般小于 1 km<sup>2</sup>,如金川岩体面积只有 1.34 km<sup>2</sup><sup>[5]</sup>,却含有超大型矿床,红旗岭 7 号岩体面积也只有 0.007 8 km<sup>2</sup><sup>[17]</sup>,却赋存大型矿床,因此,这些小岩体具有典型的小岩体成大矿特征<sup>[18]</sup>。

### 1.1 岩体群特征

含矿岩体多以小岩体群形式产出,并受控于深大断裂。在空间上,这些成矿岩体往往伴随着众多的无矿岩体(被称为“前导性”岩浆体<sup>[19]</sup>),一般成群分布,如金川岩体周围出露了上百个小岩体,这些岩体的岩石化学成分与金川含矿岩体(成矿地质体)均很类似;在红旗岭地区,基性—超基性小岩体也达到数十处;其他地区(如东天山造山带、喀拉通克矿带、川滇地区等)同时代(主要为二叠纪)的基性—超基性岩体也都有几十个之多。单个岩体除了受区域大型构造控制外,主要受次一级构造控制,从而展现出不同的形态特征。

### 1.2 单个岩体的形态特征

含铜镍矿岩体平面上主要有“菱形状”、“扁豆状”、“透镜状”等形态类型[图 1(a)、(b)],表明这类岩体主要受剪切应力控制,如喀拉通克 1 号岩体呈“扁豆状”(受 NW 和 NNW 向构造复合控制),黄山岩体呈“菱形状”,菁布拉克岩体呈“眼球状”(实为变形的“菱形状”),红旗岭 1 号岩体呈“透镜体状”等。当岩体侵位时,受到的剪切应力较强或发生变化时,则往往形成复合的“扁豆体”(或“扁豆状”变体),如

葫芦岩体的似“葫芦状”、力马河岩体的“豆荚状”、香山岩体的“藕节状”[图 1(c)]。另外一类重要的岩体平面形态呈脉状[图 1(d)],这类岩体主要呈岩脉或岩墙形式侵入围岩裂隙中,如金川岩体主要呈岩墙形式侵入,赤柏松岩体主要以脉状产出,白马寨岩体也呈不规则的脉状,形似“镰刀状”。岩体群受区域大型构造控制,单个岩体主要受次级张性裂隙或剪-张裂隙控制,如赤柏松地区单个岩体主要受背斜倾伏端隆升部位产生的一系列剪-张裂隙控制,这些放射状裂隙为岩体侵入提供空间,形成一系列在平面上呈脉状的小岩体。

岩体的剖面形态主要有“漏斗状”、“盆状”、脉状三大类。

(1)“漏斗状”是小岩体型铜镍矿最常见的岩体形态,其在剖面上主要呈不规则的“漏斗状”[图 1(e)],并且具拖尾现象[图 1(f)],这类岩体主要有金川Ⅱ号、喀拉通克 1 号、黄山、黄山东、兴地塔格、红旗岭 1 号、力马河等岩体。

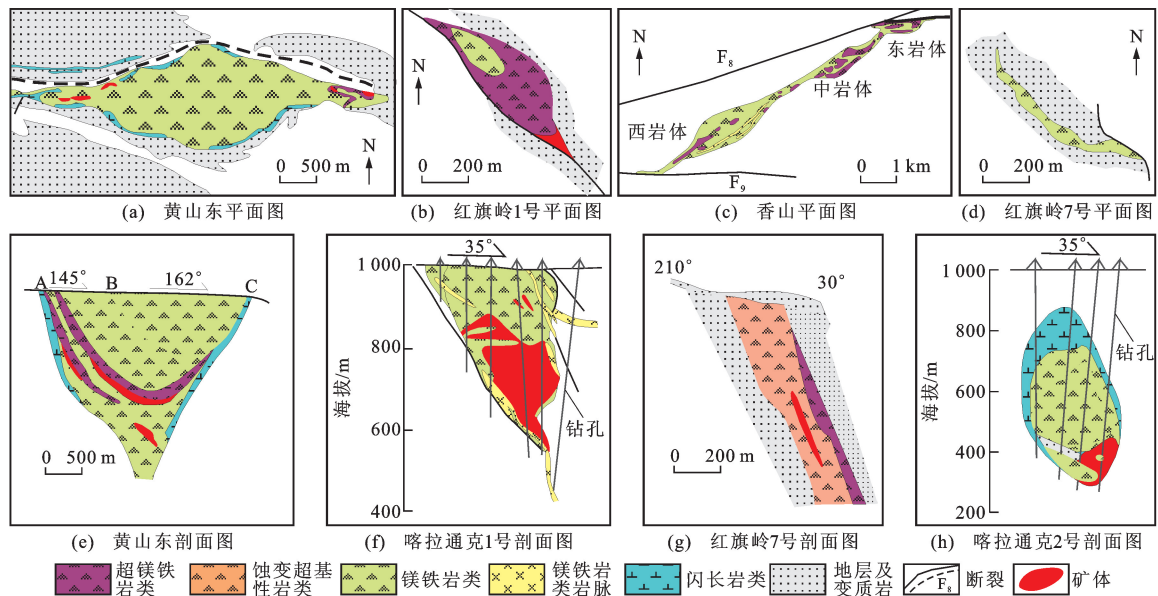
(2)呈“盆状”、“环状”或“椭圆状”的岩体较少,如青布拉克岩体在剖面上呈“岩盆状”,喀拉通克 2 号[图 1(h)]和 3 号岩体在剖面上为“椭圆状”。

(3)“透镜状”、脉状岩体的典型岩体有金川Ⅰ号和Ⅲ号、赤柏松 1 号、红旗岭 7 号、白马寨 3 号等,岩体一般呈高角度或近直立状侵入于围岩中,矿体通常与岩体近于平行产出[图 1(g)]。这些岩体的原始产状可能为近水平的岩席状,后经推覆构造使其

变陡(如金川<sup>[20]</sup>)。

### 1.3 岩体分相特征

铜镍硫化物矿床含矿岩体均具有明显的岩相分带。一般从内到外岩石基性程度逐渐降低,例如金川杂岩体含矿超镁铁质岩主要呈水平对称分带,中心为纯橄榄岩,向两侧基性程度逐渐降低,依次出现二辉橄榄岩、橄榄二辉岩、二辉石岩等岩相。各岩相带之间为渐变过渡关系,岩石组构、粒度、矿物组成都没有明显界限,一般内部较粗,边缘较细;但也有部分岩体的岩相为侵入关系,如赤柏松 1 号岩体呈脉状产出,为同源岩浆多次侵入的基性—超基性复式岩体,由南向北、自上而下可分为 3 个相带,即辉绿辉长岩相、橄榄苏长辉长岩相、含长二辉橄榄岩相。少数矿床具有反向分带,如红旗岭 1 号岩体同样为多次侵入的复式岩体,由上到下、从中心向两侧分别为辉长岩、古铜辉石岩、橄榄辉石岩、橄榄岩,这可能是因为超基性岩浆侵入时,先侵入的基性岩浆已经固结成岩,超基性岩浆只能从基性岩体与围岩的接触带侵入,形成“内酸外基”的“环状”岩体,相反则形成“内基外酸”的复式岩体。这类小岩体通常存在 3、4 个分带,有的可达 5~7 个(如黄山东含矿岩体,岩相分异较好,主要有橄榄岩、二辉橄榄岩、辉石岩、橄长岩、苏长岩、辉长岩和闪长岩,高达 7 个);有些岩体分带较少,如力马河含矿橄榄岩脉仅有 2 个分带,有的甚至呈单相岩体(如小南山辉长岩体、红旗岭 7 号岩体等)。同一矿田内同期同成因的岩体



图(a)、(e)引自文献[21];图(b)、(d)引自文献[17];图(c)引自文献[22];图(f)引自文献[23];图(g)引自文献[24];图(h)引自文献[25]

图 1 铜镍硫化物矿床含矿岩体的平面和剖面图

Fig. 1 Plane Maps and Profiles for Ore-bearing Rocks from Cu-Ni Sulfide Deposits



中,一般岩相越多,其含矿性越好,如红旗岭、金川等。从分带形式上,小岩体型岩相分带在平面上主要有“环状”(如菁布拉克岩体、二红洼岩体等)、“半环状”(如白马寨 3 号岩体)和“非环状”(如赤柏松 1 号岩体),或对称和不对称分带;在垂向上可以分为层状分带和非层状分带,非层状分带可以是上下对称,如喀拉通克 2 号岩体,但更多的是锥形分带(如红旗岭 1 号岩体),实际与平面上的“环状”分带一致。

2 岩石学特征

小岩体型铜镍硫化物矿床含矿岩体的岩石组合可分为 4 种类型(表 1):古大陆边缘裂解型的二辉橄橄榄岩-橄橄榄辉石岩(如金川)组合;造山带型的顽火辉石岩(如红旗岭)、橄橄榄岩-辉石岩-辉长岩-闪长岩(如黄山东、菁布拉克、香山等)、橄橄榄苏长岩-辉长苏长岩-闪长岩(如喀拉通克)、角闪岩(如拉水峡)组合;大陆溢流玄武岩型橄橄榄岩-辉长岩-闪长岩(如力马河)、橄橄榄岩-橄橄榄辉石岩-辉石岩-辉长岩(如白马寨)组合;阿拉斯加型橄橄榄岩-辉石岩-辉长岩(如菁布拉克)组合。

橄橄榄岩类是小岩体型铜镍硫化物矿床最主要的岩石类型,在岩体中体积分数可达 90%(如红旗岭 1 号)。因主要矿物单斜辉石和斜方辉石含量不同,这类岩石可演变为单辉辉橄岩、辉橄岩(二辉辉橄岩)、斜方辉橄岩以及辉橄岩;当含角闪石、黑云母含量较高时常被命名为角闪辉橄岩(普通角闪石体积分数大于 5%)、黑云母辉橄岩(黑云母体积分数大于 5%);当斜长石含量较高时,常被命名为斜长辉橄岩、斜长二辉橄橄榄岩等。大陆边缘裂解环境的辉橄岩多为二辉橄橄榄岩(如金川、赤柏松);造山带内辉

橄岩多为角闪辉橄岩(如黄山东、喀拉通克),常与矿化辉橄岩呈过渡关系;大陆溢流玄武岩的辉橄岩主要为单辉橄橄榄岩(如金宝山)、橄橄榄岩,常具有黑云母的反应边(如力马河)。

辉石岩类主要包括橄橄榄二辉岩、橄橄榄辉石岩、斜长单辉岩等,有的辉石岩类体积分数可达 96%(如红旗岭 7 号岩体)。根据主要组成矿物斜方辉石和单斜辉石的含量不同以及角闪石、黑云母含量,这类岩石可演变为橄橄榄二辉岩(如黄山、力马河)、角闪橄辉岩(如图拉尔根)、角闪辉石岩(如香山、菁布拉克)。当斜长石含量较高时,其成为斜长辉石岩、斜长斜方辉石岩(如新街)。

纯橄橄榄岩类在小岩体型铜镍硫化物矿床中出露较少(如金川岩体中,其仅占岩体的 5.6%),但其矿化较为明显,在蛇绿岩型铜镍硫化物矿床中可占据重要地位(如煎茶岭)。

苏长岩类在铜镍硫化物矿床中大量出现,在岩体中体积分数可达 40%(如喀拉通克),主要以苏长岩、橄橄榄苏长岩、辉长苏长岩等出现,但只有造山带中小岩体具有较明显的苏长岩相,主要为黑云角闪苏长岩、黑云角闪橄橄榄苏长岩(如喀拉通克)和辉长苏长岩(如黄山东)。

辉长岩类在铜镍硫化物矿床中分布最广,岩体中体积分数可达 90%(如赤柏松),主要包括橄橄榄苏长辉长岩、角闪辉长岩、橄橄榄辉长岩、辉长岩、辉绿辉长岩等。古大陆边缘裂解型辉长岩类主要为橄橄榄苏长辉长岩(如赤柏松);造山带型和阿拉斯加型小岩体的辉长岩类主要为黑云角闪橄橄榄辉绿辉长岩、黑云角闪辉绿辉长岩(如喀拉通克)、橄橄榄辉长岩、角闪

表 1 中国小岩体型铜镍硫化物(铂族)矿床含矿岩体的岩石特征

Tab. 1 Lithology Characteristics of Ore-bearing Rocks from Small-intrusion-hosted Cu-Ni (-PGE) Sulfide Deposits in China				
类型	岩石类型组合	岩石系列	岩石类型	主要矿床
古大陆边缘裂解型	超镁铁岩由二辉橄橄榄岩(体积分数为 83.6%)、橄橄榄二辉岩及橄橄榄辉石岩(9.3%)和少量纯橄岩(5.6%)和角闪石岩组成;镁铁岩由辉绿辉长岩(89.52%)、橄橄榄苏长辉长岩(5.66%)、辉绿岩和辉长闪长岩组成	拉斑玄武岩或低钾拉斑系列	铁质超基性岩(镁铁指数为 3.02~5.22);铁质基性岩(0.56~2.82)	金川、赤柏松、兴地、铜硼子、小南山
大陆溢流玄武岩型	超镁铁岩由橄橄榄岩、二辉橄橄榄岩(体积分数为 30%~50%)、单辉橄橄榄岩、辉石岩(30%)组成;镁铁岩由辉长岩(30%)、辉长闪长岩、闪长岩组成	拉斑玄武岩系列	铁质超基性岩(镁铁指数为 1.29~3.90);铁质基性岩(0.90~2.62)	力马河、白马寨、金宝山、杨柳坪
造山带型	超镁铁岩由橄橄榄岩、斜方辉橄岩、辉石角闪橄橄榄岩、二辉橄橄榄岩、橄辉岩、辉石岩、斜长角闪橄橄榄岩组成;镁铁岩由橄橄榄苏长岩、辉长苏长岩(体积分数可达 40%)、辉长岩(可达 75%)、辉长闪长岩、闪长岩(可达 60%)、石英闪长岩或角闪岩组成	以拉斑玄武岩系列为主,少量钙碱性系列	铁质超镁铁质岩(镁铁指数为 2.30~5.19);铁质镁铁质岩(0.96~2.55)	喀拉通克、黄山、黄山东、黄山南、红旗岭、香山、图拉尔根、葫芦、土墩、拉水峡
阿拉斯加型	岩体分异良好,岩相呈“环状”分布,中心为橄橄榄岩,边部为辉石岩,最外是辉长岩	以钙碱性系列为主,个别为拉斑玄武岩系列	铁质系列岩(镁铁指数小于 6)	菁布拉克、吉岔、半坡

辉长岩(如黄山东、香山、图拉尔根);大陆溢流玄武岩型辉长岩类则为普通的辉长岩(单斜辉石体积分数为 50%,斜长石为 25%~30%,如力马河)。

橄长岩类在铜镍硫化物矿床中少量出现,可以在蛇绿岩型堆晶岩相中出现,也可以在造山带内小侵入体中出现(如白石泉)。但国外著名的 Voisey's Bay 铜镍硫化物矿床的含矿岩体含较多的橄长岩,岩体中含橄榄石体积分数通常为 20%~25%,呈堆晶状或粗粒状产出,形成火成层状条带<sup>[26]</sup>。

角闪岩类在铜镍硫化物矿床中也较少出现,青海拉水峡矿床含矿岩体主要为角闪岩,其次为辉长岩类蚀变而成的次闪石岩类(如小南山)。

闪长岩类在铜镍硫化物矿床中较为常见,有的岩体中,其体积分数可达 60%(如喀拉通克),主要包括辉长闪长岩、闪长岩、黑云闪长岩、石英闪长岩等。在造山带内小岩体中,其主要以辉长闪长岩(如黄山)、黑云闪长岩(如喀拉通克)出现;在大陆溢流玄武岩中,其主要以闪长岩为主(如力马河,可大于 70%);阿拉斯加型岩体主要以辉石闪长岩为主,且位于岩体边部(如普布拉克)。

### 3 矿物学特征

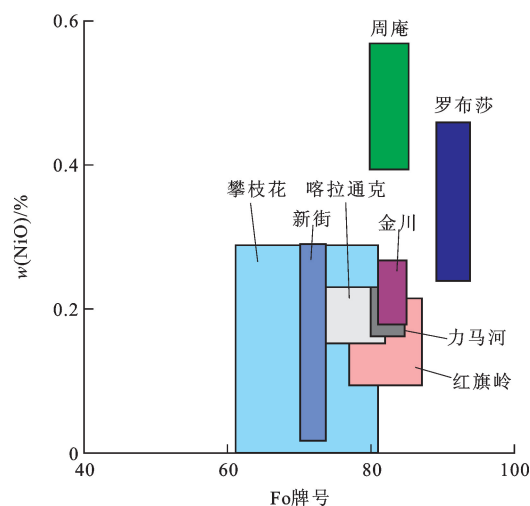
小岩体型铜镍硫化物矿床含矿岩石主要原生矿物有橄榄石、斜方辉石、单斜辉石、角闪石、斜长石等。

#### 3.1 橄榄石

橄榄石在小岩体型铜镍硫化物矿床各岩相中均为早期形成的矿物,可呈自形、半自形、它形,但常有不同程度的蛇纹石化、滑石化、碳酸盐化;其化学成分绝大多数为贵橄榄石,少量镁橄榄石,其 Fo 牌号可达 80~90<sup>[5]</sup>;从纯橄榄岩→斜方辉橄岩→单辉辉橄岩→橄榄辉石岩→橄榄辉长岩,橄榄石 Fo 牌号有递减趋势,反映其分异程度逐渐增高。各类超镁铁质岩中的橄榄石均含一定量的 NiO、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 CoO 等,小岩体的辉橄岩类中橄榄石 NiO 含量明显低于其他类型(图 2),橄榄石中 Ni 含量低说明橄榄石结晶时 Ni 已经进入硫化物,暗示其具有较大的成矿潜力。

#### 3.2 斜方辉石

大多数铜镍硫化物矿床含矿岩体中均含一定数量(体积分数为 5%~45%)的斜方辉石,以古铜辉石为主<sup>[27]</sup>,其中斜方辉石在小岩体型铜镍硫化物矿床中多产于辉橄岩、橄辉岩、二辉岩和辉石岩中(如金川)。斜方辉石中 MgO 含量从辉石岩类→辉橄岩类→辉长岩类逐渐降低。一般来讲,岩体中橄榄



金川数据引自文献[28];红旗岭数据引自文献[29];喀拉通克数据引自文献[30];周庵数据引自文献[31];新街数据引自文献[32];攀枝花数据引自文献[33];罗布莎数据引自文献[34];

w(·)为化合物质量分数

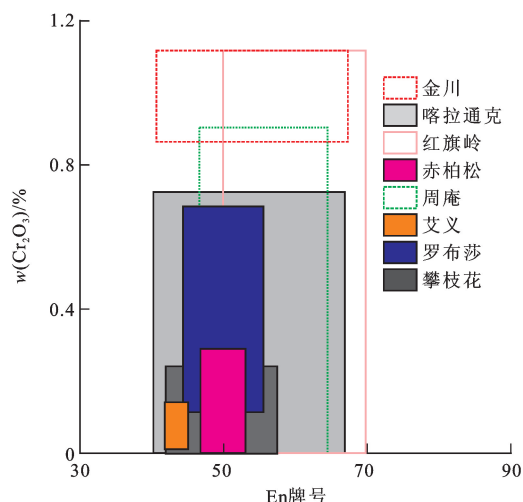
图 2 不同类型超镁铁质岩橄榄石 NiO 含量与 Fo 牌号的关系

Fig. 2 Relationship Between Contents of NiO and Fo Values for Olivine from Different Types of Ultramafic Rocks

石与斜方辉石共存,且橄榄石 Fo 牌号和斜方辉石 En 牌号较为相近,则对成矿有利,可作为判矿的重要标志<sup>[35]</sup>。

#### 3.3 单斜辉石

单斜辉石主要为普通辉石、透辉石和顽透辉石, MgO 含量(质量分数,下同)为 12%~26%,En 牌号为 42~70,以小岩体型矿床最高(50~70),层状杂岩型矿床较低(如新街为 43~47),并且从辉橄岩类→辉石岩类→辉长岩类,En 牌号略有降低。在辉长岩或苏长岩相中,单斜辉石一般为普通辉石,含 TiO<sub>2</sub> 较高者为钛普通辉石(如新街),其中小岩体型矿床 TiO<sub>2</sub> 含量变化范围较大(0.2%~4.9%),多数小于 1%,高于蛇绿岩型铜镍硫化物矿床相关岩体单斜辉石 TiO<sub>2</sub> 含量(0.05%~1.22%)和铬铁矿相关岩体(0%~0.57%)。单斜辉石中 NiO 含量较低,为 0%~0.36%,多数低于 0.1%,其中小岩体型矿床 NiO 含量较高,为 0%~0.36%(如黄山),蛇绿岩型矿床较低,为 0.03%~0.11%(如周庵),层状杂岩型矿床最低,为 0.03%~0.04%(如新街)。单斜辉石 Cr 含量可从侧面反映初始岩浆中 Cr 含量(图 3),其中小岩体型矿床辉橄岩类中 Cr 含量较大(可达 1.14%,如金川),蛇绿岩型次之(可达 0.89%,如周庵),层状杂岩型矿床最小(最高值为 0.16%,如艾义),略小于层状钒钛磁铁矿相关岩体



赤柏松数据引自文献[36];艾义数据引自文献[37];金川数据引自文献[28];红旗岭数据引自文献[29];喀拉通克数据引自文献[30];周庵数据引自文献[31];攀枝花数据引自文献[33];罗布莎数据引自文献[34]

图 3 铜镍硫化物矿床含矿岩体单斜辉石  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  含量与 En 牌号的关系

Fig. 3 Relationship Between Contents of  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  and En Values for Clinopyroxene of Ore-bearing Rocks from Cu-Ni Sulfide Deposits

单斜辉石  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  含量(最高值为 0.22%,如攀枝花)。Cr 含量较高的岩石说明 Cr 主要进入了单斜辉石,因此,形成的铬铁矿物就相应减少。

### 3.4 斜长石

斜长石成分范围很宽( $\text{An}_{77-2}$ ),这些固溶体系列矿物的成分变化与岩体的岩相变化一致。在辉长岩或苏长岩相中,斜长石具环带结构,为拉长石;有些岩相环带斜长石牌号从核部的  $\text{An}_{64}$  变到边部的  $\text{An}_{17}$ ,部分岩相中为中长石,在闪长岩相变为中长石-更长石。矿物中可含一定量的  $\text{K}_2\text{O}$ ,如力马河矿床  $\text{K}_2\text{O}$  含量为 0.11%~16.24%,喀拉通克矿床为 0.07%~10.06%,赤柏松、金川矿床为 0.16%~2.03%。

### 3.5 角闪石

原生角闪石在镁铁-超镁铁岩相中一般为镁质普通角闪石,从辉橄岩类→辉石岩类→辉长岩类,角闪石  $\text{Mg}^\#$  值逐渐降低(如红旗岭,从辉橄岩类的 80~93 变到辉石岩类的 71.7~88.5,再到辉长岩类的 74.2~80.2),角闪石 NiO 含量为 0%~0.73%。

### 3.6 黑云母

在铜镍硫化物矿床的小岩体中,原生黑云母一般属于富碱、富镁、高硅、贫铁类型,表明其母岩浆成分在岩浆演化过程中含水量、碱度、氧逸度和硫逸度较高,并由相对富镁、富钙向富铁、富碱方向演化,可

含微量 NiO(如红旗岭含量为 0%~0.24%)。

## 4 岩石地球化学特征

### 4.1 主量元素

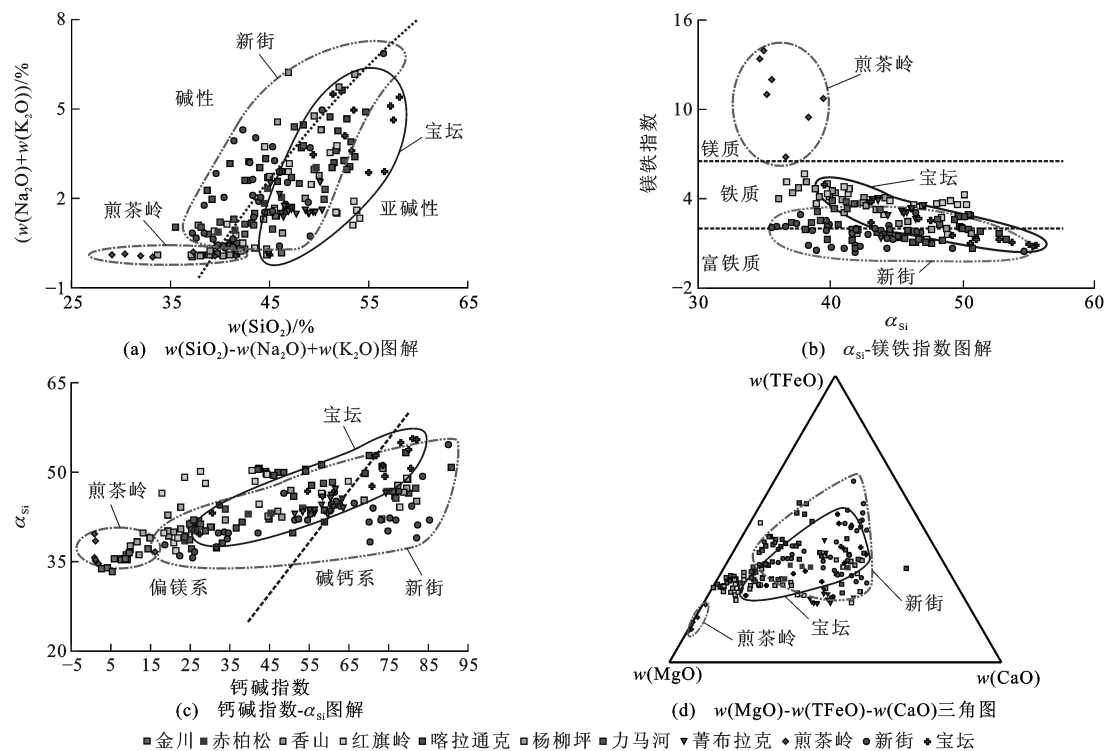
总体上,铜镍硫化物矿床含矿岩石具有中等富铁、富镁特征,如辉长岩类镁铁指数为 0.64~4.67,辉橄岩类为 2.34~5.61。这类含矿岩体的  $\text{SiO}_2$ 、Fe、Ti 含量呈逐渐增加的趋势, $\text{MgO}$  含量有减少趋势,与拉斑玄武岩演化方向一致。但各类铜镍硫化物矿床地质体岩石化学特征有所差别:层状杂岩型矿床(如新街)具有较高的  $w(\text{TiO}_2)$ 、 $w(\text{TFeO})$ 、 $w(\text{CaO})$ 、 $w(\text{Na}_2\text{O})+w(\text{K}_2\text{O})$ 、 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ ;蛇绿岩型矿床(如煎茶岭)具有较低的  $w(\text{TiO}_2)$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 $w(\text{FeO})$ 、 $w(\text{MnO})$ 、 $w(\text{CaO})$ 、 $w(\text{Na}_2\text{O})+w(\text{K}_2\text{O})$ 、 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ ,但其  $\text{MgO}$  含量较高;科马提岩型矿床(如宝坛)比小岩体型具有较低的  $w(\text{TiO}_2)$ 、 $w(\text{TFeO})$  和较高的  $w(\text{MnO})$ 、 $w(\text{CaO})$ 、 $w(\text{Na}_2\text{O})+w(\text{K}_2\text{O})$ , $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  含量则与小岩体型相似。

小岩体型矿床的岩石一般为低碱的拉斑玄武岩系列,但喀拉通克、香山矿床的碱金属含量较高,具有钙碱性系列特征;而科马提岩型矿床具有高碱,属钙碱性系列;层状岩体型矿床则多属于碱性系列;蛇绿岩型矿床具有低碱特征[图 4(a)]。在酸度( $\alpha_{\text{Si}}$ )-镁铁指数图解[图 4(b)]中,这类矿床镁铁指数主要位于 2.0~6.5 区域,为铁质镁铁-超镁铁岩;但蛇绿岩型矿床具有较高的镁铁指数,属于镁质镁铁-超镁铁岩;层状岩体型矿床数据主要位于富铁质区域。在钙碱指数- $\alpha_{\text{Si}}$ 图解[图 4(c)]中,这类矿床数据主要位于偏镁系列区,而香山、力马河、杨柳坪矿床及层状杂岩型矿床部分数据落入碱钙系列区,说明这些矿床可能存在过渡矿化类型;蛇绿岩型矿床数据完全落入偏镁系列区域;科马提岩型矿床则更多数据落入碱钙系列区域。在  $w(\text{MgO})$ - $w(\text{TFeO})$ - $w(\text{CaO})$  三角图[图 4(d)]中,若以中线为界,则小岩体型矿床数据主要落入富镁质区,但香山矿床则有部分数据落入  $w(\text{TFeO})$ - $w(\text{CaO})$  区域,具有过渡类型特征;蛇绿岩型矿床更富镁质;层状岩体型和科马提岩型矿床数据均有近半数落入铁质区,说明这种类型矿床可能具有过渡特征。

### 4.2 稀土元素

铜镍硫化物矿床的岩体稀土元素总含量及轻、重稀土元素含量比值随基性程度降低而升高,因而以超镁铁质岩相为主的岩体稀土元素总含量和轻、重





金川数据引自文献[38];喀拉通克数据引自文献[39];香山数据引自文献[40];杨柳坪数据引自文献[41];红旗岭数据引自文献[42];赤柏松数据引自文献[36];力马河数据引自文献[43];新街数据引自文献[44];煎茶岭数据引自文献[45];菁布拉克数据引自文献[46];宝坛数据引自文献[47]

图 4 不同类型铜镍硫化物矿床主要氧化物计算参数图解

Fig. 4 Diagrams of Calculated Parameters of Major Oxides for Different Types of Cu-Ni Sulfide Deposits

稀土元素含量比值较低,而闪长岩相则比较高。小岩体型矿床含矿岩体稀土元素总含量范围变化较大且较高,稀土元素总含量为 $(3.15 \sim 195.10) \times 10^{-6}$ ;蛇绿岩型矿床岩体稀土元素总含量最低,为 $(0.084 \sim 10.370) \times 10^{-6}$ ,但蛇绿岩型铬铁矿床相关岩体的稀土元素总含量具有较高的变化范围 $((3.62 \sim 449) \times 10^{-6})$ 。铜镍硫化物矿床成矿地质体稀土元素配分模式为轻稀土元素富集、重稀土元素亏损[图 5(a)],其中科马提岩型含矿岩体轻稀土元素富集度最高,并且具有明显的负 Eu 异常,最低的为蛇绿岩型含矿岩体(如煎茶岭)。

#### 4.3 不相容元素特征

总体上,不同类型含矿岩体的大离子亲石元素富集,高场强元素相对亏损,曲线呈现缓倾斜的“L”型[图 5(b)]。小岩体型含矿岩体的大离子亲石元素相对富集,高场强元素相对亏损,Th、U 相对富集,Sr 相对亏损,具有 Nb、Ta 槽特征。其他类型含矿岩体微量元素原始地幔标准化蛛网图显得更平缓些,其中蛇绿岩型含矿岩体微量元素含量明显低于其他类型,科马提岩型含矿岩体明显富集大离子元素,亏损 Sr、Ti,层状杂岩体型含矿岩体则相对富集

Nb、Ta、Sr、Ti。

#### 4.4 成矿元素及过渡族元素特征

小岩体型铜镍硫化物矿床相关岩体的 Ni、Co、Cu 均有一定富集,但 Cr 显著亏损,整体呈现“W”型曲线模式[图 5(c)],其中古大陆裂解型小岩体 Cr、Co、Cu 含量相对较高,Fe 含量相对较低,造山带型岩体具有较高的 Ti、Cu 含量和较低的 Cr、Ni 含量,而大陆溢流玄武岩型岩体具有较高的 V、Cu 含量和较低的 Cr、Ni 含量,阿拉斯加型含矿岩体具有明显低的 Cr、Ni 含量。蛇绿岩型岩体明显不同,整体数据呈现出“M”型,具有相对较高的 Cr、Ni 含量和相对较低的 Ti、Cu 含量。科马提岩型岩体则整体呈现近“V”型,而且 Ti、V、Cr 含量要高于层状杂岩型,但 Ni 含量较低。层状杂岩型岩体同样具有“W”型模式,具有相对较低的 Cr、Ni 含量。

#### 4.5 铂族元素特征

铜镍硫化物矿床含矿岩体的铂族元素(PGE)特征总体表现为 Pt、Pd 含量明显高于 Os、Ir。小岩体型铜镍硫化物矿床岩体的 PGE 特征也是呈现从 Os、Ir 元素到 Pt、Pd 元素逐渐富集的趋势[图 5(d)],古大陆边缘裂解型曲线斜率较大,造山带型岩

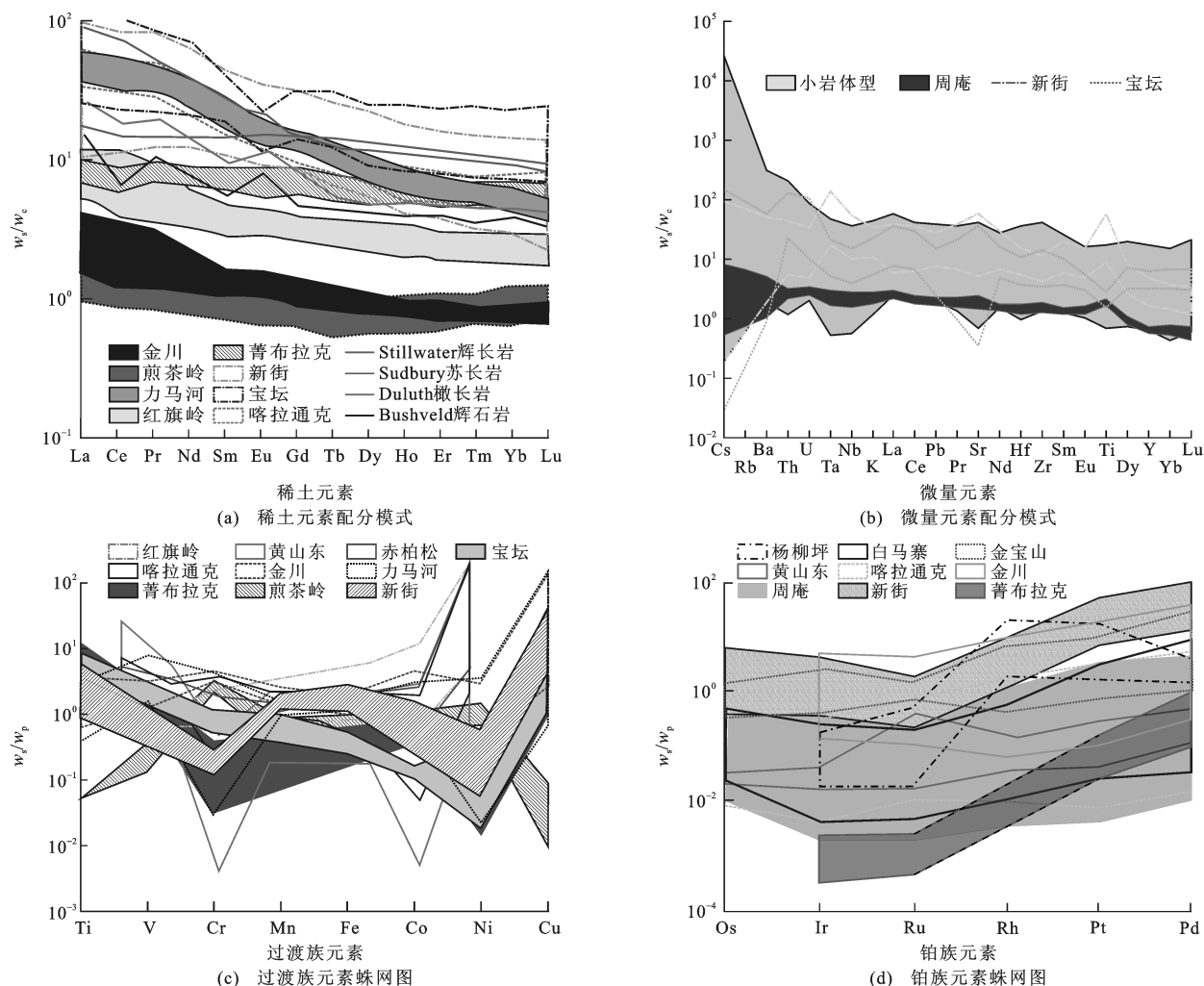


图 5 岩体中微量元素、稀土元素、过渡族元素和铂族元素的球粒陨石和原始地幔标准化配分模式和蛛网图  
 $w_s$  为样品含量;  $w_c$  为球粒陨石含量;  $w_p$  为原始地幔含量; 金川数据引自文献[38]、[48]、[49]; 赤柏松数据引自文献[36]; 红旗岭数据引自文献[48]; 喀拉通克数据引自文献[23]、[30]、[50]、[51]; 黄山东数据引自文献[21]、[52]、[53]; 香山数据引自文献[40]、[54]; 杨柳坪数据引自文献[41]; 力马河数据引自文献[43]、[48]、[55]; 白马寨数据引自文献[56]; 普布拉克数据引自文献[46]、[57]、[58]; 煎茶岭数据引自文献[59]; 周庵数据引自文献[60]、[61]; 宝坛数据引自文献[62]、[63]; 新街数据引自文献[64]、[65]; Stillwater、Sudbury、Duluth、Bushveld 数据引自文献[48]

图 5 Chondrite-normalized Patterns and Primitive Mantle-normalized Spider Diagrams of Trace Element, REE, Transitional Element and PGE in Rocks

体相对亏损 Pt、Ru, 大陆溢流玄武岩型岩体曲线较为平缓。蛇绿岩型铜镍硫化物矿床 PGE 相对亏损 Rh、Pd, 相对富集 Ru、Pt, 并且斜率较大(与蛇绿岩型铬铁矿 PGE 明显不同)。层状岩体型铜镍硫化物矿床岩体 PGE 特征主要具有相对亏损 Ru 和相对富集 Pt 的特征, 曲线也较陡倾(与层状岩体钛铁矿床 PGE 元素特征相似)。

#### 4.6 Sr-Nd 同位素

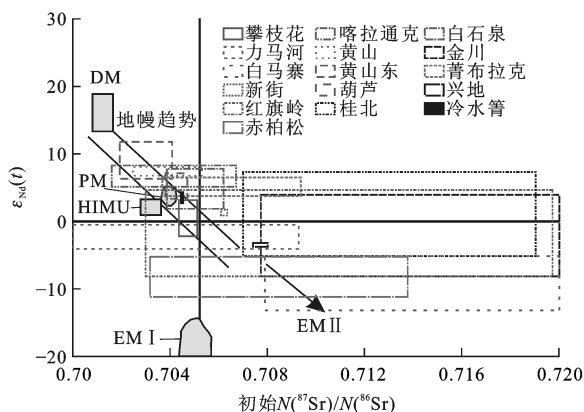
总体来看, 铜镍硫化物矿床  $\epsilon_{Nd}(t)$  值既有小于 0 的也有大于 0 的, 即岩浆源区既有富集地幔源区的也有亏损地幔源区的。Sr 同位素值也一样, 反映出这类矿床受到不同程度地壳物质混染作用的影响

(图 6)。

#### 4.7 氧同位素

小岩体型铜镍硫化物矿床岩体的氧同位素组成  $\delta(^{18}\text{O})$  为  $(4.437 \sim 21.200) \times 10^{-3}$ , 其中古大陆裂解型矿床岩体为  $4.43 \times 10^{-3}$ , 造山带型为  $(5.477 \sim 8.98) \times 10^{-3}$ , 大陆溢流玄武岩型为  $(5.01 \sim 21.20) \times 10^{-3}$ 。蛇绿岩型铜镍硫化物矿床含矿岩体  $\delta(^{18}\text{O})$  值为  $(6.4 \sim 17.3) \times 10^{-3}$ , 科马提岩型为  $(4.2 \sim 7.3) \times 10^{-3}$ 。尽管小岩体  $\delta(^{18}\text{O})$  值变化范围较大, 但不同类型之间或同一类型不同矿床之间的  $\delta(^{18}\text{O})$  值变化范围要小得多, 指示氧同位素主要来自幔源, 但也有少量地壳氧同位素混染。





$\epsilon_{Nd} = [(N(^{143}Nd)/N(^{144}Nd))_i / (N(^{143}Nd)/N(^{144}Nd))_{CHUR} - 1] \times 10^4$ ,  $\epsilon_{Nd}(t)$  为年龄  $t$  对应的  $\epsilon_{Nd}$  值, 下标  $i$  表示初始值, 下标 CHUR 表示球粒陨石均一源与样品同时的比值;  $N(\cdot)/N(\cdot)$  为同一元素同位素比值,  $N(\cdot)$  为该元素的原子丰度; DM—亏损地幔; HIMU—高  $\alpha(U)/\alpha(Pb)$  值的地幔; PM—原始地幔; EM I—I 型富集地幔; EM II—II 型富集地幔; 图件数据引自文献[54]

图 6 铜镍硫化物矿床岩石 Sr-Nd 同位素关系

Fig. 6 Diagram of Sr-Nd Isotope of Rocks for Cu-Ni Sulfide Deposits

## 5 讨论

### 5.1 成矿地质体的构造环境

中国与溢流玄武岩有关的铜镍硫化物矿床小岩体主要产于西南峨眉山大火成岩省, 研究程度比较高。从成矿地质体形成年龄、岩石地球化学特征来看, 这类小岩体与晚二叠世峨眉山幔柱活动有关<sup>[66-69]</sup>。

造山带中的小岩体主要产于新疆北部的中亚造山带, 以前多数学者倾向于认为是碰撞造山后伸展阶段幔源岩浆上侵的产物<sup>[70-74]</sup>, 但也有不少学者把东天山—北山含铜镍镁铁—超镁铁质岩体<sup>[75-81]</sup>与塔里木二叠纪玄武岩<sup>[82-83]</sup>联系起来, 认为其与塔里木盆地大面积出露的二叠纪溢流玄武岩一样, 是地幔柱活动的产物<sup>[83-84]</sup>。由此可见, 这套幔源岩浆虽然形成于后碰撞造山阶段(主要为早二叠世), 但可能也具有地幔柱叠加的影响<sup>[85-86]</sup>, 至于这种影响程度有多大尚需进一步研究。此外, 产于吉林准褶皱带东南边缘转折处的红旗岭成矿岩体, 虽形成于 250 Ma 前后的印支早期(同造山期或造山挤压期间的伸展过渡期), 但也有学者认为是古亚洲域大洋岩石圈向地幔深部潜入, 从而引起地幔热柱形成岩浆活动<sup>[87]</sup>, 目前还有争议。

古大陆边缘中的小岩体成矿构造背景为大陆边缘裂解环境, 如金川岩体<sup>[45]</sup>和黑山岩体<sup>[88]</sup>。近年来, 李文渊等认为其是地幔柱活动产物<sup>[89]</sup>。赤柏松辉长岩岩体较新的年龄表明其形成于早白垩世, 并

把它们归因于大陆伸展环境<sup>[16]</sup>, 也有学者认为与地幔柱活动有关<sup>[90-92]</sup>, 但赤柏松辉长岩体侵位的构造空间是背斜核部及形成的一系列断裂<sup>[36]</sup>, 并且最新年代学证据<sup>[16]</sup>并不支持这一观点, 与大陆伸展和地幔柱活动的关系需要商榷。

阿拉斯加型铜镍矿床成矿地质体是岛弧岩浆作用的一部分<sup>[93-94]</sup>, 一般认为产于岛弧或活动大陆边缘, 或弧间盆地环境, 含铂族元素较多<sup>[95]</sup>。中国新疆青布拉克岩体可能属于这一类<sup>[96]</sup>, 岩石化学特征表明其具有岛弧特点<sup>[15, 46]</sup>, 但该岩体未发现纯橄榄岩, 也未发现明显的铬铁矿物, 因此, 并不是典型的岛弧阿拉斯加型岩体。

### 5.2 成矿地质体的成因及岩浆特征

#### 5.2.1 部分熔融及岩浆的起源

铜镍硫化物矿床相关岩石的原岩均为地幔来源, 部分熔融程度较低, 古大陆裂解型小岩体的熔融程度较大些(如金川岩体熔融程度为 33%<sup>[97]</sup>), 其次为造山带型(10%~20%<sup>[98]</sup>)和大陆溢流玄武岩型(11%~19%<sup>[55]</sup>)。

#### 5.2.2 岩浆源区及演化特征

各类矿床的 Sr-Nd-Pb 同位素、微量元素分析结果表明, 与地幔柱有关的小岩体型含矿岩石源区主要源于亏损地幔, 并有地幔柱和下地壳成分的混染作用<sup>[28, 99]</sup>。已有大量矿物学、岩石地球化学和同位素数据表明, 小岩体型矿床(如金川、力马河、喀拉通克、青布拉克)岩浆演化经历了不同程度的分离结晶和同化混染作用, 即 AFC 过程。

#### 5.2.3 岩浆及成岩物理化学条件

前人通过地质温度计测算出这类成矿地质体含矿岩体的成岩温度为 900 °C~1 390 °C, 岩浆房压力多在 1~10 kPa(最大可达 45 kPa), 岩体侵位深度多在 10~15 km, 岩浆房深度可达 30 km; 氧逸度多在  $1.0 \times 10^{-2.1} \sim 1.0 \times 10^{-14}$ 。

## 6 结 语

(1) 成矿地质体产出的环境主要产于深大断裂的旁侧, 但一般距离(主干)深大断裂十几至数十千米。

(2) 成矿地质体的宏观特征通常具有规模较小、出露面积在 1 km<sup>2</sup> 左右(多数小于 1 km<sup>2</sup>)、多数岩体与围岩呈断层侵入接触并具有多次补充侵入的特点, 并且都属于一些受小型断裂控制的岩墙、岩脉、岩柱和“透镜体状”等复式岩体。尽管岩体规模较小, 但分异作用良好, 一般都具有“边酸内基”或“上酸下基”的岩相分带。含矿岩体一般含有硫化物, 甚

至出现“珠滴状”、“豆状”和“瘤状”硫化物。由于岩石含铁较高,橄榄岩风化后常呈现出褐色、铁锈色;岩石自蚀变发育,并可见后期热液蚀变;常有粗晶—伟晶结构的岩石出现,具有同化混染现象。矿体常赋存在特定的岩相中,同一岩体分异的各相基性程度较高的含矿性较好,同源不同阶段的岩体或侵入相补充侵入的岩体含矿性较好(因为硫化物大都经历了深部熔离—富集阶段)。

(3)不同类型矿床具有不同特征的岩石组合,如小岩体型铜镍硫化物矿床含矿岩体主要为铁质的镁铁—超镁铁质岩,以辉长岩、苏长岩、橄榄岩、辉橄岩、橄辉岩、辉石岩为常见,并可发育闪长岩、橄长岩、角闪岩等,以含水矿物(角闪石、黑云母等)发育为特征。

(4)岩石中  $\text{SiO}_2$  和  $\text{MgO}$  含量适中,具有中等富铁、富镁特征,如辉长岩类镁铁指数为  $0.64 \sim 4.67$ ,辉橄岩类为  $2.34 \sim 5.61$ ,  $w(\text{Na}_2\text{O}) + w(\text{K}_2\text{O})$  相对偏高,  $w(\text{Al})/w(\text{Ti})$ 、 $w(\text{Ca})/w(\text{Ti})$ 、 $\text{AC}/\text{NK}$  值及  $\text{SI}$  值相对偏低,稀土元素总含量相对偏高,稀土元素配分曲线相对陡倾,  $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 、 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 、 $w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$  值相对偏大,微量元素和氧、硫、Sr-Nd-Pb 同位素等常显示同化混染特征,含矿岩体通常还具有相对较高的  $w(\text{Cu})/w(\text{Pd})$  值(大于 6 500)、较低的  $w(\text{Pd})/w(\text{Ir})$  值和相对较高的  $\text{Mg}^\#$  值。其中,  $w(\cdot)_{\text{N}}$  为元素质量分数球粒陨石标准化后的值。

(5)橄榄石一般为正常的贵橄榄石,相对贫 Ni。橄榄石中含镍量亏损说明在橄榄石结晶过程中,镍没有参加橄榄石结晶,而与硫结合形成镍硫化物,指示了硫化物的熔离作用要早于橄榄石结晶,有利于镍的成矿。辉石常出现紫苏辉石,且当岩体中橄榄石 Fo 牌号和斜方辉石 En 牌号较为相近时,对成矿有利;常见棕色普通角闪石,可含一定量的黑云母;岩石中含较多的硫化物(磁黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿,甚至镍黄铁矿),常发育(显微)“珠滴状”构造;岩石中金属氧化物磁铁矿、钛铁矿共存。

(6)同类岩体中蛇纹石化等热液蚀变相对发育;Cr、Ni、Co、V 组合异常中出现 Ni、Cu 局部异常。

## 参考文献:

## References:

- [1] 叶天竺,薛建玲.金属矿床深部找矿中的地质研究[J].中国地质,2007,34(5):855-869.  
YE Tian-zhu, XUE Jian-ling. Geological Study in Search of Metallic Ore Deposits at Depth[J]. Geology in China,

2007,34(5):855-869.

- [2] 骆华宝.中国主要硫化铜镍矿床及其成因研究[D].北京:中国地质科学院研究生部,1990.  
LUO Hua-bao. The Major Nickel-copper Sulfide Deposits and Their Genesis of China[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Geological Sciences, 1990.
- [3] ROSS J R, TRAVIS G A. The Nickel Sulfide Deposits of Western Australia in Global Perspective[J]. Economic Geology, 1981, 76(6): 1291-1329.
- [4] NALDRETT A J. Ni-Cu Ores of the Sudbury Igneous Complex[R]. Toronto: Ontario Geological Survey, 1984.
- [5] 汤中立,李文渊.金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比[M].北京:地质出版社,1995.  
TANG Zhong-li, LI Wen-yuan. Metallogenic Model and Geological Comparison of Jinchuan Ni-Cu(-PGE) Sulfide Deposit [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995.
- [6] 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):1-9.  
TANG Zhong-li, QIAN Zhuang-zhi, JIANG Chang-yi, 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): 1-9.
- [7] 汤中立,闫海卿,焦建刚,等.中国岩浆硫化物矿床新分类与小岩体成矿作用[J].矿床地质,2006,25(1):1-9.  
TANG Zhong-li, YAN Hai-qing, JIAO Jian-gang, et al. New Classification of Magmatic Sulfide Deposits in China and Ore-forming Processes of Small Intrusive Bodies[J]. Mineral Deposits, 2006, 25(1): 1-9.
- [8] 汤中立.中国镁铁、超镁铁岩浆矿床成矿系列的聚集与演化[J].地学前缘,2004,11(1):113-119.  
TANG Zhong-li. The Accumulation and Evolution of Metallogenic Series of the Mafic-ultramafic Magmatic Deposits in China[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(1): 113-119.
- [9] 汤中立.中国的小岩体岩浆矿床[J].中国工程科学,2002,4(6):9-12.  
TANG Zhong-li. Magmatic Deposits Ore Deposits in Small Rockbody in China[J]. Engineering Science, 2002, 4(6): 9-12.
- [10] TANG Z L. Small Intrusions Making Large Ore: Significance for the Exploration of Jinchuan Ni-Cu Sulfide Deposit[C]//LI W Y. Proceedings of Xi'an International Ni-Cu(Pt) Deposit Symposium 2009. Beijing: Science Press, 2009: 67-70.
- [11] 汤中立,李小虎.两类岩浆的小岩体成大矿[J].矿床

- 地质, 2006, 25(增): 35-38.
- TANG Zhong-li, LI Xiao-hu. Small Intrusions Forming Large Deposits in Two Types of Magma[J]. Mineral Deposits, 2006, 25(S): 35-38.
- [12] 刘月星, 唐红松, 吴厚泽. 中国铜镍硫化物矿床类型及控矿条件[J]. 矿产与地质, 1998, 12(2): 86-90.
- LIU Yue-xing, TANG Hong-song, WU Hou-ze. Types and Ore-control Factors of Cu-Ni Sulfide Deposits in China[J]. Mineral Resources and Geology, 1998, 12(2): 86-90.
- [13] 李德东, 王玉往, 王京彬, 等. 岩浆型铜镍硫化物矿床的分类浅谈[J]. 矿物学报, 2013, 33(增 2): 98-99.
- LI De-dong, WANG Yu-wang, WANG Jing-bin, et al. Discussion on Classification for the Magmatic Copper-nickel Sulfide Deposits[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2013, 33(S2): 98-99.
- [14] 田毓龙, 武栓军, 孟 蓉, 等. 金川超镁铁质岩体 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄[J]. 矿物学报, 2007, 27(2): 211-217.
- TIAN Yu-long, WU Shuan-jun, MENG Rong, et al. LA-ICPMS Zircon U-Pb Age of the Jinchuan Ultramafic Intrusion[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2007, 27(2): 211-217.
- [15] 张作衡, 王志良, 王彦斌, 等. 新疆西天山菁布拉克基性杂岩体闪长岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. 矿床地质, 2007, 26(4): 353-360.
- ZHANG Zuo-heng, WANG Zhi-liang, WANG Yan-bin, et al. SHRIMP Zircon U-Pb Dating of Diorite from Qingbulake Basic Complex in Western Tianshan Mountains of Xinjiang and Its Geological Significance[J]. Mineral Deposits, 2007, 26(4): 353-360.
- [16] 裴福萍, 许文良, 杨德彬, 等. 吉林通化赤柏松辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 中国科学: D 辑, 2005, 35(5): 393-398.
- PEI Fu-ping, XU Wen-liang, YANG De-bin, et al. Zircon SHRIMP U-Pb Age and Geological Significance of Chibaisong Gabbro in Tonghua, Jilin[J]. Science in China: Series D, 2005, 35(5): 393-398.
- [17] 秦 宽. 红旗岭岩浆硫化铜镍矿床地质特征[J]. 吉林地质, 1995, 14(3): 17-30.
- QIN Kuan. Geological Features of Magmatic Sulfide Cu-Ni Deposit at the Hongqiling, Jilin Province[J]. Jilin Geology, 1995, 14(3): 17-30.
- [18] 汤中立, 闫海卿, 焦建刚, 等. 中国小岩体镍铜(铂族)矿床的区域成矿规律[J]. 地学前缘, 2007, 14(5): 92-103.
- TANG Zhong-li, YAN Hai-qing, JIAO Jian-gang, et al. Regional Metallogenic Controls of Small-intrusion-hosted Ni-Cu(PGE) Ore Deposits in China[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(5): 92-103.
- [19] 汤中立, 徐 刚, 王亚磊, 等. 岩浆成矿新探索——小岩体成矿与地质找矿突破[J]. 西北地质, 2012, 45(4): 1-16.
- TANG Zhong-li, XU Gang, WANG Ya-lei, et al. The New Exploration of Magmatic Mineralization—Small Intrusion Mineralization and Geological Prospecting Breakthrough[J]. Northwestern Geology, 2012, 45(4): 1-16.
- [20] SONG X Y, DANYUSHEVSKY L V, KEAYS R R, et al. Structural, Lithological, and Geochemical Constraints on the Dynamic Magma Plumbing System of the Jinchuan Ni-Cu Sulfide Deposit, NW China[J]. Mineralium Deposita, 2012, 47(3): 277-297.
- [21] 夏明哲, 姜常义, 钱壮志, 等. 新疆东天山黄山东岩体岩石地球化学特征与岩石成因[J]. 岩石学报, 2010, 26(8): 2413-2430.
- XIA Ming-zhe, JIANG Chang-yi, QIAN Zhuang-zhi, et al. Geochemistry and Petrogenesis of Huangshandong Intrusion, East Tianshan, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(8): 2413-2430.
- [22] 竺国强, 杨树锋, 陈汉林. 东疆香山铜镍含矿镁铁超镁铁杂岩体控岩控矿构造探讨[J]. 地质找矿论丛, 1995, 10(3): 1-13.
- ZHU Guo-qiang, YANG Shu-feng, CHEN Han-lin. Studies of Rock and Ore Controlling Structures of Xiangshan Cu-Ni Bearing Mafic-ultramafic Complex, Eastern Xinjiang[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 1995, 10(3): 1-13.
- [23] 王福同, 马天林, 刘光海, 等. 新疆喀拉通克铜镍金矿带成矿规律和找矿模式[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- WANG Fu-tong, MA Tian-lin, LIU Guang-hai, et al. Metallogeny and Prospecting Model of the Karatungke Cu-Ni-Au Ore Belt in Xinjiang[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992.
- [24] 刘 默. 吉林红旗岭铜镍硫化物矿床地质特征及成因研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- LIU Mo. Study on Geological Characteristics and Genesis of Cu-Ni Sulphide Deposit in Hongqiling, Jilin[D]. Changchun: Jilin University, 2005.
- [25] 邹海洋, 戴塔根, 胡祥昭. 喀拉通克铜镍硫化矿地质特征及找矿预测[J]. 地质地球化学, 2001, 29(3): 70-75.
- ZOU Hai-yang, DAI Ta-gen, HU Xiang-zhao. Geological Characteristics and Prognosis of the Karatungke Cu-Ni Deposit, Xinjiang[J]. Geology-geochemistry, 2001, 29(3): 70-75.
- [26] SCOATES J S, MITCHELL J N. The Evolution of Troctolitic and High Al Basaltic Magmas in Proterozoic Anorthosite Plutonic Suites and Implications for the Voisey's Bay Massive Ni-Cu Sulfide Deposit[J].

- Economic Geology, 2000, 95(4): 677-701.
- [27] 卢记仁. 中国岩浆铜镍矿床的成矿模式[C]//中国地质科学院矿床地质研究所. 中国地质科学院矿床地质研究所文集(27). 北京:地质出版社, 1993: 78-84.  
LU Ji-ren. Genetic Model of Main Magmatic Cu-Ni Deposits in China[C]// Institute of Mineral Geology, Chinese Academy of Geological Sciences. No. 27 Proceedings of Institute of Mineral Geology, Chinese Academy of Geological Sciences. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 78-84.
- [28] 陈列锰, 宋谢炎, DANYUSHEVSKY L V, 等. 金川岩体母岩浆成分及其分离结晶过程的熔浆热力学模拟[J]. 地质学报, 2009, 83(9): 1302-1315.  
CHEN Lie-meng, SONG Xie-yan, DANYUSHEVSKY L V, et al. Parental Magma Compositions of the Jinchuan Intrusion, Gansu Province and Melts Thermodynamic Modelling of Fractional Crystallization[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(9): 1302-1315.
- [29] 吕林素, 毛景文, 周振华, 等. 吉林红旗岭1号和7号岩体中含矿超镁铁质岩的矿物化学特征: 对岩浆演化过程以及铜镍硫化物矿床形成机制的约束[J]. 岩石学报, 2012, 28(1): 319-344.  
LU Lin-su, MAO Jing-wen, ZHOU Zhen-hua, et al. Mineral Chemistry of Ore-bearing Ultramafic Rocks from the Hongqiling No. 1 and 7 Intrusions in Jilin Province: Constraints on the Magmatic Processes and the Metallogenesis of Ni-Cu Sulfide Deposits[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(1): 319-344.
- [30] 郝立波. 新疆喀拉通克铜镍矿床成矿规律总结研究报告[R]. 长春: 吉林大学, 2012.  
HAO Li-bo. Research Report of Metallogenetic Law of Kalatongke Copper-nickel Deposit in Xinjing[R]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [31] 王梦玺, 王 焰. 扬子地块北缘周庵超镁铁质岩体矿物学特征及其对铜镍矿化的启示[J]. 矿床地质, 2012, 31(2): 179-194.  
WANG Meng-xi, WANG Yan. Mineral Chemistry of Zhou'an Ultramafic Intrusion on Northern Margin of the Yangtze Block: Implications for Origin of Intrusion and Ni-Cu-(PGE) Sulfide Mineralization[J]. Mineral Deposits, 2012, 31(2): 179-194.
- [32] 李存帅, 徐盛林. 四川攀西地区新街岩体的岩浆分异作用与金属矿物的成因[J]. 岩石矿物及测试, 1983, 2(3): 161-174.  
LI Cun-shuai, XU Sheng-lin. The Magmatic Differentiation and the Origin of Metallic Minerals of the Xinjie Basic and Ultrabasic Rocks in the Panzhihua-Xichang Area, Sichuan[J]. Acta Petrologica Mineralogica et Analytica, 1983, 2(3): 161-174.
- [33] PANG K N, LI C S, ZHOU M F, et al. Mineral Compositional Constraints on Petrogenesis and Oxide Ore Genesis of the Late Permian Panzhihua Layered Gabbroic Intrusion, SW China[J]. Lithos, 2009, 110(1/2/3/4): 199-214.
- [34] 江 万. 西藏罗布莎铬铁矿总结研究报告[R]. 北京: 中国地质科学院地质力学研究所, 2012.  
JIANG Wan. Research Report of Luobusa Chromite in Tibet[R]. Beijing: Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, 2012.
- [35] 胡旺亮. 岩浆型铜镍硫化物矿床地质概念模型[J]. 地球科学, 1991, 16(3): 249-256.  
HU Wang-liang. Geological Conceptual Model on the Copper-Nickel Sulfide Deposits of Magma Type[J]. Earth Science, 1991, 16(3): 249-256.
- [36] 赵全国. 通化赤柏松镁铁—超镁铁质岩石的形成时代与地球化学特征及对成矿作用的制约[D]. 长春: 吉林大学, 2006.  
ZHAO Quan-guo. Chronology and Geochemical Characteristics of Chibosong Mafic-ultramafic Rocks from Tonghua and Its Constraints on Ore-forming Process[D]. Changchun: Jilin University, 2006.
- [37] 刘朝基, 曾绪伟, 金久堂, 等. 康滇地区基性超基性岩[M]. 重庆: 重庆出版社, 1986.  
LIU Chao-ji, ZENG Xu-wei, JIN Jiu-tang, et al. Basic-ultrabasic Rocks in the Kangdian Region[M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1986.
- [38] LI X H, SU L, CHUNG S L, et al. Formation of the Jinchuan Ultramafic Intrusion and the World's Third Largest Ni-Cu Sulfide Deposit: Associated with the ~825 Ma South China Mantle Plume? [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2005, 6(11): Q11004.
- [39] ZHANG Z C, MAO J W, CHAI F M, et al. Geochemistry of the Permian Kalatongke Mafic Intrusions, Northern Xinjiang, Northwest China: Implications for the Genesis of Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposits[J]. Economic Geology, 2009, 104(2): 185-203.
- [40] 肖庆华, 秦克章, 唐冬梅, 等. 新疆哈密香山铜镍-钛铁矿床系同源岩浆分异演化产物——矿相学、锆石U-Pb年代学及岩石地球化学证据[J]. 岩石学报, 2010, 26(2): 503-522.  
XIAO Qing-hua, QIN Ke-zhang, TANG Dong-mei, et al. Xiangshanxi Composite Cu-Ni-Ti-Fe Deposit Belongs to Comagmatic Evolution Product—Evidences from Ore Microscopy, Zircon U-Pb Chronology and Petrological Geochemistry, Hami, Xinjiang, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(2): 503-522.



- [41] 王登红, 骆耀南, 傅德明, 等. 四川杨柳坪 Cu-Ni-PGE 矿区基性—超基性岩的地球化学特征及其含矿性[J]. 地球学报, 2001, 22(1): 135-140.  
WANG Deng-hong, LUO Yao-nan, FU De-ming, et al. Petrochemistry and Ore Potentiality of the Mafic-ultramafic Rocks in the Yangliuping Cu-Ni-PGE Mine, Sichuan Province[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2001, 22(1): 135-140.
- [42] 唐文龙, 杨言辰. 吉林红旗岭镁铁—超镁铁质岩的地球化学特征及地质意义[J]. 世界地质, 2007, 26(2): 164-172.  
TANG Wen-long, YANG Yan-chen. Geochemical Characteristics of Mafic-ultramafic Rocks and Their Geological Significance in Hongqiling Mine of Jilin[J]. Global Geology, 2007, 26(2): 164-172.
- [43] 李莹. 攀西地区力马河镁铁—超镁铁质岩体的岩石学和地球化学研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2010.  
LI Ying. Studies of Petrology and Geochemistry on the Limahe Mafic-ultramafic Intrusion in Panxi District, SW China[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010.
- [44] 茅燕石, 孙似洪. 米易新街基性超基性层状侵入体岩石学特征及成因[J]. 矿物岩石, 1981(6): 29-40.  
MAO Yan-shi, SUN Si-hong. Petrological Characteristics and Origin of Layered Basic-ultrabasic Intrusions in Xinjie, Miyi, Sichuan[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1981(6): 29-40.
- [45] 汤中立, 钱壮志, 姜常义, 等. 中国镍铜铂岩浆硫化物矿床与成矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 2006.  
TANG Zhong-li, QIAN Zhuang-zhi, JIANG Chang-yi, et al. Magmatic Ni-Cu-PGE Sulfide Deposits and Metallogenic Prognosis in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.
- [46] 张作衡, 王志良, 毛景文, 等. 西天山菁布拉克基性杂岩体的地球化学特征[J]. 地质学报, 2006, 80(7): 1005-1016.  
ZHANG Zuo-heng, WANG Zhi-liang, MAO Jing-wen, et al. Geochemistry of the Qingbulake Basic Complex in Western Tianshan[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(7): 1005-1016.
- [47] 葛文春, 李献华, 李正祥, 等. 宝坛地区透闪石化镁铁质岩石成因的地质地球化学证据[J]. 地球化学, 2000, 29(3): 253-258.  
GE Wen-chun, LI Xian-hua, LI Zheng-xiang, et al. Geological and Geochemical Evidence for the Genesis of Tremolitized Mafic Rocks from Baotan in Northern Guangxi[J]. Geochimica, 2000, 29(3): 253-258.
- [48] 骆华宝, 乔德武. 中国主要含镍岩体特征及其成因[J]. 岩石矿物学杂志, 1993, 12(4): 312-324.  
LUO Hua-bao, QIAO De-wu. Geological Setting and Genesis of Major Nickel-bearing Rock Bodies in China[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1993, 12(4): 312-324.
- [49] 徐刚. 金川铜镍矿床铂族元素特征研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.  
XU Gang. Platinum Group Elements Geochemistry of Jinchuan Copper-nickel Deposit, NW China[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [50] 张招崇, 闫升好, 陈柏林, 等. 新疆喀拉通克基性杂岩体的地球化学特征及其对矿床成因的约束[J]. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(3): 217-224.  
ZHANG Zhao-chong, YAN Sheng-hao, CHEN Bai-lin, et al. Geochemistry of the Kalatongke Basic Complex in Xinjiang and Its Constraints on Genesis of the Deposit[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2003, 22(3): 217-224.
- [51] 钱壮志, 王建中, 姜常义, 等. 喀拉通克铜镍矿床铂族元素地球化学特征及其成矿作用意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(4): 832-844.  
QIAN Zhuang-zhi, WANG Jian-zhong, JIANG Chang-yi, et al. Geochemistry Characters of Platinum-group Elements and Its Significances on the Process of Mineralization in the Kalatongke Cu-Ni Sulfide Deposit, Xinjiang, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(4): 832-844.
- [52] 孟广路. 新疆哈密黄山东铜镍硫化物矿床成岩成矿作用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2008.  
MENG Guang-lu. Studies of Cu-Ni Sulfide Mineralization in the Huangshandong Mafic-ultramafic Intrusion, Hami, Xinjiang[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008.
- [53] 钱壮志, 孙涛, 汤中立, 等. 东天山黄山东铜镍矿床铂族元素地球化学特征及其意义[J]. 地质论评, 2009, 55(6): 873-884.  
QIAN Zhuang-zhi, SUN Tao, TANG Zhong-li, et al. Platinum-group Elements Geochemistry and Its Significances of the Huangshandong Ni-Cu Sulfide Deposit, East Tianshan, China[J]. Geological Review, 2009, 55(6): 873-884.
- [54] 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 等. 新疆香山铜镍钛铁矿区两个镁铁—超镁铁岩系列及特征[J]. 岩石学报, 2009, 25(4): 888-900.  
WANG Yu-wang, WANG Jing-bin, WANG Li-juan, et al. Characteristics of Two Mafic-ultramafic Rock Series in the Xiangshan Cu-Ni-(V) Ti-Fe Ore District, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(4): 888-900.

- [55] 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 Yan, HU Rui-zhong, QI Liang, et al. Geochemical Characteristics and Metallogenesis of the Limahe Mafic-ultramafic Intrusion, Sichuan[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(11): 2785-2800.
- [56] SUN X M, WANG S W, SUN W D, et al. PGE Geochemistry and Re-Os Dating of Massive Sulfide Ores from the Baimazhai Cu-Ni Deposit, Yunnan Province, China[J]. Lithos, 2008, 105(1/2): 12-24.
- [57] 孙盼盼,倪守斌. 新疆菁布拉克岩带稀土元素地球化学特征[J]. 中国科学技术大学学报, 2008, 38(4): 347-355.
- SUN Pan-pan, NI Shou-bin. REE Characteristics of Basic-ultrabasic Rocks from the Jingbulake Belt in Xinjiang[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2008, 38(4): 347-355.
- [58] YANG S H, ZHOU M F, LIGHTFOOT P C, et al. Selective Crustal Contamination and Decoupling of Lithophile and Chalcophile Element Isotopes in Sulfide-bearing Mafic Intrusions: An Example from the Jingbulake Intrusion, Xinjiang, NW China[J]. Chemical Geology, 2012, 302/303: 106-118.
- [59] 王瑞廷. 煎茶岭与金川镍矿床成矿作用比较研究[D]. 西安: 西北大学, 2002.
- WANG Rui-ting. The Comparative Study on Mineralization of Jianchaling and Jinchuan Nickel-copper Sulfide Deposits[D]. Xi'an: Northwest University, 2002.
- [60] 闫海卿,汤中立,钱壮志,等. 河南周庵铜镍矿锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2011, 47(6): 23-32.
- YAN Hai-qing, TANG Zhong-li, QIAN Zhuang-zhi, et al. Zircon U-Pb Age and Geological Significance of Zhou'an Copper-nickel Sulfide Deposit in Henan Province[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2011, 47(6): 23-32.
- [61] WANG M X, WANG C Y, SUN Y L. Mantle Source, Magma Differentiation and Sulfide Saturation of the ~637 Ma Zhou'an Mafic-ultramafic Intrusion in the Northern Margin of the Yangtze Block, Central China[J]. Precambrian Research, 2013, 228: 206-222.
- [62] 毛景文,周科子,朱 征. 桂北九万大山地区科马提岩及有关铜镍矿的初步研究[J]. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊, 1988(1): 147-160.
- MAO Jing-wen, ZHOU Ke-zi, ZHU Zheng. Preliminary Study on Middle Proterozoic Komatiites and Related Copper-nickel Deposits in Jiwandashan Area, Northern Guangxi[J]. Bulletin of the Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, 1988(1): 147-160.
- [63] 葛文春,李献华,梁细荣,等. 桂北元宝山宝坛地区约 825 Ma 镁铁—超镁铁岩的地球化学及其地质意义[J]. 地球化学, 2001, 30(2): 123-130.
- GE Wen-chun, LI Xian-hua, LIANG Xi-rong, et al. Geochemistry and Geological Implications of Mafic-ultramafic Rocks with the Age of ~825 Ma in Yuanbaoshan-Baotan Area of Northern Guangxi[J]. Geochimica, 2001, 30(2): 123-130.
- [64] 赵 莉,张招崇,王福生,等. 一个开放的岩浆房系统: 攀西新街镁铁—超镁铁质层状岩体[J]. 岩石学报, 2006, 22(6): 1565-1578.
- ZHAO Li, ZHANG Zhao-chong, WANG Fu-sheng, et al. Open-system Magma Chamber: An Example from the Xinjie Mafic-ultramafic Layered Intrusion in Panxi Region, SW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(6): 1565-1578.
- [65] ZHONG H, QI L, HU R Z, et al. Rhenium-osmium Isotope and Platinum-group Elements in the Xinjie Layered Intrusion, SW China: Implications for Source Mantle Composition, Mantle Evolution, PGE Fractionation and Mineralization[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2011, 75(6): 1621-1641.
- [66] 王登红,骆耀南,屈文俊,等. 中国西南铂族元素矿床地质、地球化学与找矿[M]. 北京:地质出版社, 2007.
- WANG Deng-hong, LUO Yao-nan, QU Wen-jun, et al. Geology, Geochemistry and Prospecting of PGE Deposits in SW China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.
- [67] SONG X Y, ZHOU M F, TAO Y, et al. Controls on the Metal Compositions of Magmatic Sulfide Deposits in the Emeishan Large Igneous Province, SW China[J]. Chemical Geology, 2008, 253(1/2): 38-49.
- [68] 范蔚茗,王岳军,彭头平,等. 桂西晚古生代玄武岩 Ar-Ar 和 U-Pb 年代学及其对峨眉山玄武岩省喷发时代的约束[J]. 科学通报, 2004, 49(18): 1892-1900.
- FAN Wei-ming, WANG Yue-jun, PENG Tou-ping, et al. Ar-Ar and U-Pb Geochronology of Late Paleozoic Basalts in Western Guangxi and Its Constraints on the Eruption Age of Emeishan Basalt Magmatism[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(18): 1892-1900.
- [69] 宋谢炎,张成江,胡瑞忠,等. 峨眉火成岩省岩浆矿床成矿作用与地幔柱动力学过程的耦合关系[J]. 矿物岩石, 2005, 25(4): 35-44.
- SONG Xie-yan, ZHANG Cheng-jiang, HU Rui-zhong, et al. Genetic Links of Magmatic Deposits in the

- Emeishan Large Igneous Province with Dynamics of Mantle Plume[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2005, 25(4): 35-44.
- [70] 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 等. 东天山黄山—镜儿泉地区二叠纪地质-成矿-热事件: 幔源岩浆内侵及其地壳效应[J]. *岩石学报*, 2007, 23(11): 2869-2880.
- GU Lian-xing, ZHANG Zun-zhong, WU Chang-zhi, et al. Permian Geological, Metallurgical and Geothermal Events of the Huangshan-Jing'erquan Area, Eastern Tianshan: Indications for Mantle Magma Intraplating and Its Effect on the Crust[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(11): 2869-2880.
- [71] 王京彬, 王玉往, 周涛发. 新疆北部后碰撞与幔源岩浆有关的成矿谱系[J]. *岩石学报*, 2008, 24(4): 743-752.
- WANG Jing-bin, WANG Yu-wang, ZHOU Tao-fa. Metallogenic Spectrum Related to Post-collisional Mantle-derived Magma in North Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(4): 743-752.
- [72] SONG X Y, LI X R. Geochemistry of the Kalatongke Ni-Cu-(PGE) Sulfide Deposit, NW China: Implications for the Formation of Magmatic Sulfide Mineralization in a Postcollisional Environment[J]. *Mineralium Deposita*, 2009, 44(3): 303-327.
- [73] SONG X Y, XIE W, DENG Y F, et al. Slab Break-off and the Formation of Permian Mafic-ultramafic Intrusions in Southern Margin of Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang, NW China[J]. *Lithos*, 2011, 127(1/2): 128-143.
- [74] 周涛发, 袁峰, 张达玉, 等. 新疆东天山觉罗塔格地区花岗岩类年代学、构造背景及其成矿作用研究[J]. *岩石学报*, 2010, 26(2): 478-502.
- ZHOU Tao-fa, YUAN Feng, ZHANG Da-yu, et al. Geochronology, Tectonic Setting and Mineralization of Granitoids in Jueluotage Area, Eastern Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(2): 478-502.
- [75] ZHOU M F, LESHNER C M, YANG Z X, 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(3/4): 233-257.
- [76] MAO J W, PIRAJNO F, ZHANG Z H, et al. A Review of the Cu-Ni Sulphide Deposits in the Chinese Tianshan and Altay Orogens (Xinjiang Autonomous Region, NW China): Principal Characteristics and Ore-forming Processes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32(2/3/4): 184-203.
- [77] PIRAJNO F, MAO J W, ZHANG Z C, et al. The Association of Mafic-ultramafic Intrusions and A-type Magmatism in the Tian Shan and Altay Orogens, NW China: Implications for Geodynamic Evolution and Potential for the Discovery of New Ore Deposits[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32(2/3/4): 165-183.
- [78] SU B X, QIN K Z, SAKYI P A, et al. Geochemistry and Geochronology of Acidic Rocks in the Beishan Region, NW China: Petrogenesis and Tectonic Implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(1): 31-43.
- [79] 李德东, 王玉往, 龙灵利, 等. 东天山过渡型矿化镁铁—超镁铁岩年代学和地球化学特征[J]. *地质论评*, 2012, 58(6): 1145-1160.
- LI De-dong, WANG Yu-wang, LONG Ling-li, et al. Chronology and Geochemistry of the Transitional Mineralized Mafic-ultramafic Rock Bodies in the Eastern Tianshan Mountains[J]. *Geological Review*, 2012, 58(6): 1145-1160.
- [80] 李德东, 王玉往, 王京彬, 等. 新疆香山杂岩体的成岩与成矿时序[J]. *岩石学报*, 2012, 28(7): 2103-2112.
- LI De-dong, WANG Yu-wang, WANG Jing-bin, et al. The Timing Order of Mineralization and Diagenesis for Xiangshan Complex Rocks, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(7): 2103-2112.
- [81] 焦建刚, 汤中立, 钱壮志, 等. 东天山地区图拉尔根铜镍硫化物矿床成因及成矿过程[J]. *岩石学报*, 2012, 28(11): 3772-3786.
- JIAO Jian-gang, TANG Zhong-li, QIAN Zhuang-zhi, et al. Genesis and Metallogenic Process of Tulargen Large Scale Cu-Ni Sulfide Deposit in Eastern Tianshan Area, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(11): 3772-3786.
- [82] 陈汉林, 杨树锋, 董传万, 等. 塔里木盆地二叠纪基性岩带的确定及大地构造意义[J]. *地球化学*, 1997, 26(6): 77-87.
- CHEN Han-lin, YANG Shu-feng, DONG Chuan-wan, et al. Confirmation of Permian Basite Zone in Tarim Basin and Its Tectonic Significance[J]. *Geochimica*, 1997, 26(6): 77-87.
- [83] YANG S F, LI Z L, CHEN H L, et al. Permian Bimodal Dyke of Tarim Basin, NW China: Geochemical Characteristics and Tectonic Implications[J]. *Gondwana Research*, 2007, 12(1/2): 113-120.
- [84] ZHANG C L, LI X H, LI Z X, et al. A Permian Layered Intrusive Complex in the Western Tarim Block, Northwestern China: Product of a Ca. 275 Ma Mantle Plume? [J]. *The Journal of Geology*, 2008, 116(3): 269-287.

- [85] 王玉往. 新疆北部与后碰撞镁铁—超镁铁质杂岩有关的成矿作用[D]. 北京:中国地质大学,2009.  
WANG Yu-wang. Mineralization Related to Post-collisional Mafic-ultramafic Complex in North Xinjiang [D]. Beijing:China University of Geosciences,2009.
- [86] QIN K Z, SU B X, SAKYI P A, et al. SIMS Zircon U-Pb Geochronology and Sr-Nd Isotopes of Ni-Cu-bearing Mafic-ultramafic Intrusions in Eastern Tianshan and Beishan in Correlation with Flood Basalts in Tarim Basin (NW China): Constraints on a Ca. 280 Ma Mantle Plume[J]. American Journal of Science, 2011, 311(3):237-260.
- [87] 林 强, 葛文春, 孙德有, 等. 东北亚中生代火山岩的地球动力学意义[J]. 地球物理学报, 1999, 42(增): 75-84.  
LIN Qiang, GE Wen-chun, SUN De-you, et al. Geomechanical Significance of the Mesozoic Volcanics in Northeast Asia[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1999, 42(S):75-84.
- [88] 颀 炜, 宋谢炎, 邓宇峰, 等. 甘肃黑山铜镍硫化物含矿岩体的地质特征及橄榄石成因探讨[J]. 岩石学报, 2013, 29(10):3487-3502.  
XIE Wei, SONG Xie-yan, DENG Yu-feng, et al. Geology and Olivine Geochemistry of the Heishan Ni-Cu (PGE) Sulfide Deposit, Gansu, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(10):3487-3502.
- [89] 李文渊. 岩浆 Cu-Ni-PGE 矿床研究现状及发展趋势[J]. 西北地质, 2007, 40(2):1-28.  
LI Wen-yuan. The Current Status and Prospect on Magmatic Ni-Cu-PGE Deposits[J]. Northwestern Geology, 2007, 40(2):1-28.
- [90] WU F Y, LIN J Q, WILDE S A, et al. Nature and Significance of the Early Cretaceous Giant Igneous Event in Eastern China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 233(1/2):103-119.
- [91] 林 强, 葛文春, 曹 林, 等. 大兴安岭中生代双峰式火山岩的地球化学特征[J]. 地球化学, 2003, 32(3): 208-222.  
LIN Qiang, GE Wen-chun, CAO Lin, et al. Geochemistry of Mesozoic Volcanic Rocks in Da Hinggan Ling: The Bimodal Volcanic Rocks[J]. Geochimica, 2003, 32(3):208-222.
- [92] 邵济安, 李之彤, 张履桥. 辽西及邻区中—新生代火山岩的时空对称分布及其启示[J]. 地质科学, 2004, 39(1):98-106.  
SHAO Ji-an, LI Zhi-tong, ZHANG Lu-qiao. Symmetric Spatiotemporal Distribution of the Meso-Cenozoic Volcanic Rocks in West Liaoning and Environs and Its Implications[J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39(1): 98-106.
- [93] MURRAY C G. Zoned Ultramafic Complexes of the Alaskan Type: Feeder Pipes of Andesitic Volcanoes [J]. GSA Memoirs, 1972, 132:313-336.
- [94] IRVINE T N. Petrology of the Duke Island Ultramafic Complex, Southeastern Alaska [M]. Boulder: Geological Society of America, 1974.
- [95] 张 旗, 张魁武, 李达周. 论造山带中超镁铁岩的成对分布[J]. 岩石矿物学杂志, 1987, 6(2):97-103.  
ZHANG Qi, ZHANG Kui-wu, LI Da-zhou. On Paired Ultramafic Rock Belts in Orogens[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1987, 6(2):97-103.
- [96] 王玉往, 王京彬, 李德东, 等. 新疆北部幔源岩浆矿床的类型、时空分布及成矿谱系[J]. 矿床地质, 2013, 32(2):223-243.  
WANG Yu-wang, WANG Jing-bin, LI De-dong, et al. Types, Temporal-spatial Distribution and Metallogenic Lineage of Ore Deposits Related to Mantle-derived Magma in Northern Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 2013, 32(2):223-243.
- [97] 汤中立. 金川铜镍硫化物矿床岩浆成矿作用的偏在性[J]. 甘肃地质学报, 1996, 5(2):73-85.  
TANG Zhong-li. Magmatic Mineralization Preferentiality of the Jinchuan Cu-Ni Sulfide Deposit[J]. Acta Geologica Gansu, 1996, 5(2):73-85.
- [98] 孙 赫, 秦克章, 李金祥, 等. 地幔部分熔融程度对东天山镁铁质—超镁铁质岩铂族元素矿化的约束——以图拉尔根和香山铜镍矿为例[J]. 岩石学报, 2008, 24(5):1079-1086.  
SUN He, QIN Ke-zhang, LI Jin-xiang, et al. Constraint of Mantle Partial Melting on PGE Mineralization of Mafic-ultramafic Intrusions in Eastern Tianshan—Case Study on Tulargen and Xiangshan Cu-Ni Deposits[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(5): 1079-1086.
- [99] 张招崇, 李 莹, 赵 莉, 等. 攀西三个镁铁—超镁铁质岩体的地球化学及其对源区的约束[J]. 岩石学报, 2007, 23(10):2339-2352.  
ZHANG Zhao-chong, LI Ying, ZHAO Li, et al. Geochemistry of Three Layered Mafic-ultramafic Intrusions in the Panxi Area and Constraints on Their Sources[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(10): 2339-2352.