

新疆图拉尔根基性-超基性岩体中基性包体 岩石地球化学特征及其成岩过程

王于健¹, 吕新彪¹, 刘艳荣², 曹晓峰¹, 梅 微¹, 王富贵³, 吴建亮¹

(1. 中国地质大学 资源学院, 湖北 武汉 430074; 2. 长安大学, 陕西 西安 710021;

3. 甘肃省地矿局第三地质矿产勘查院, 甘肃 兰州 730050)

摘 要:新疆哈密图拉尔根铜镍硫化物矿床是东天山黄山-镜儿泉韧性剪切带上的一个典型岩浆熔离-贯入型矿床。在图拉尔根岩体中的角闪辉橄岩相中发育了一些基性包体, 这些包体尺寸在几到几十厘米之间, 岩性主要为辉长岩、斜长岩, 辉长岩包体含矿性好, 而斜长岩包体不含矿。通过岩相学观察发现, 包体与寄主岩在矿物种类、含量、蚀变类型及程度以及矿物接触交代关系和生成顺序上存在较大的差异, 并且, 两者存在截然的接触边, 该接触边以鳞片状绿泥石为主。哈克图解和 SiO_2 与不相容元素 La、Nd、Zr、Yb 的相关性图解都显示图拉尔根基性-超基性岩体样品具有很好的相关性, 而包体样品则不具有明显的相关性, 指示了岩浆混染作用在包体成岩中的重要作用。微量元素地球化学特征显示包体和图拉尔根岩体均具 Nb、Ta 亏损, 这可能是陆壳混染作用的结果, 或源区存在俯冲的洋壳物质。此外, 包体中 K、Pb、Sr、P 含量非常高, 暗示后期流体作用较强, 包体的 Nb/U、Ce/Pb 值都更接近大陆地壳的值, 这些都说明陆壳混染的可能性较高, 或存在较强的流体迁移作用。

关键词: 图拉尔根岩体, 基性包体, 岩相学, 岩石地球化学特征

中图分类号: P595; P586

文献标识码: A

文章编号: 1000-524X(2013)04-0417-14

Geochemistry and petrogenesis of mafic enclaves in Tulargen mafic-ultramafic complex, Xinjiang

WANG Yu-jian¹, LÜ Xin-biao¹, LIU Yan-rong², CAO Xiao-feng¹, MEI Wei¹, WANG Fu-gui³
and WU Jian-liang¹

(1. Faculty of Earth Resource, China University of Geoscience, Wuhan 430074, China; 2. Chang'an University, Xi'an 710021, China; 3. No. 3 Institute of Geological and Mineral Exploration, Gansu Bureau of Geology and Mineral Resources, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The Tulargen Cu-Ni sulfide deposit, whose discovery means a great breakthrough in Cu-Ni exploration in Xinjiang in the past ten years, is located in the eastern section of the Huangshan-Jingerquan ore belt. The Tulargen Cu-Ni deposit is a magmatic differentiation deposit related to mafic-ultramafic complex, which comprises three intrusions, namely complex I, II, III, respectively. The hornblende pyroxene peridotite of complex I is associated with abundant mafic enclaves, which include ore-bearing gabbro enclaves and plagioclase enclaves without mineralization. Mafic enclaves and the host display different characteristics in such aspects as mineral species, types and intensities of alteration, contacts between minerals and forming sequence. There exists

收稿日期: 2013-04-01; 修订日期: 2013-06-05

基金项目: 国家科技支撑计划新疆 305 项目(2007BAB25B04)

作者简介: 王于健(1990-), 女, 汉族, 硕士, 矿物学岩石学矿床学专业, E-mail: wyj0204@163.com; 通讯作者: 吕新彪(1962-), 教授, E-mail: lvxb-01@163.com。

a distinct boundary, composed of squamiform chlorite, between the mafic enclaves and the host. The Harker diagram of major elements and figures of La, Nd, Zr, and Yb versus SiO_2 have shown that samples of the Tulargen complex display a good correlation, whereas the mafic enclaves don't show such characteristics, which indicates that magmatic contamination played a significant role in the formation of the mafic enclaves. Nb/U and Ce/Pb ratios imply that, after crustal contamination, some elements of the mafic enclaves was mobilized and migrated by the late magmatic hydrous fluids.

Key words: Tulargen complex; mafic enclaves; petrography; geochemistry

东天山黄山-镜儿泉地区是我国新疆东天山重要的 Ni-Cu(PGE)成矿带,分布有图拉尔根、黄山、黄山东、香山、葫芦等十多个铜镍硫化物矿床。近些年,许多学者对这些矿床做了研究,较为系统地阐述了成矿母岩(镁铁-超镁铁侵入岩)的岩石学、矿物学和岩石化学、同位素地球化学以及岩体的侵入年龄等特征(Zhou *et al.*, 2004; 柴凤梅, 2006; 柴凤梅等, 2006; 毛启贵等, 2006; 孙赫等, 2006, 2007, 2008; 李金祥等, 2007; 三金柱等, 2007, 2009, 2010; 秦克章等, 2007; 钱壮志等, 2009; 唐冬梅等, 2009a, 2009b; 夏明哲等, 2010; 李甲平等, 2010; Han *et al.*, 2010; 邓宇峰等, 2011; Tang *et al.*, 2012)。

笔者在研究图拉尔根铜镍硫化物矿床赋矿母岩角闪辉橄岩相时,发现其中较普遍发育有以斜长石为主的基性包体。有的包体含矿性很好(以下均简称 Bo),有的包体则完全不含矿(以下均简称 Uo),且随着含矿性的不同,包体形态、矿物组成、蚀变类型等方面也存在一定的差异。前人对岩体内包体的研究,大多针对花岗闪长岩、二长花岗岩、石英闪长岩及英云闪长岩中出现的镁铁质微粒包体(mafic microgranular enclave, 简称 MME)。对于 MME 的成因假说有以下两个方面:一种是认为 MME 来自原始的固态岩石,沉积岩、变质岩或火成岩, MME 是残留体(White and Chappell, 1974; White *et al.*, 1991);另一种观点认为 MME 是基性岩浆与酸性岩浆混合,结晶分异的结果(Vernon, 1984; Barbarin, 1988)。而对于基性-超基性岩中出现基性程度较低的包体,且部分包体含矿性较好,表现出与成矿的关系密切,这一现象在东天山图拉尔根铜镍矿床中局部发现,在国内外著名岩浆型 Ni-Cu(PGE)硫化物矿床研究中较少涉及。本文利用野外观察、岩相学、岩石地球化学等方法分析这些基性包体的物质组成、结构构造和地球化学特征,探讨其成岩过程。

1 区域地质背景

东天山地区主要由觉罗塔格造山带和中天山地块组成,该区集中分布了黄山-镜儿泉铜镍成矿带和白石泉矿集区两个矿床密集区。觉罗塔格构造带以区域性康古尔塔格-黄山韧性剪切带为界与北部的小热泉子梧桐窝子内湖盆地分开;南部以阿奇克库都可-沙泉子断裂为界与中天山地块分开。

区内地层主要为中上石炭统(C_{2-3})的一套动力变质火山碎屑岩建造和中泥盆统大南湖组(D_2d)的一套火山碎屑沉积建造。与区域断裂平行或小角度相交的次级断裂发育,多表现为韧性剪切性质,片理、劈理极其发育,含矿岩体受弱韧性变形带控制。海西中晚期侵入的花岗闪长岩、二长花岗岩及镁铁质-超镁铁质杂岩体发育。

黄山-镜儿泉成矿带呈 NNE 走向,构造上受控于区域性康古尔-黄山韧性剪切带。该带可分为东西 2 段。西段位于土墩-黄山一带,包括土墩、二红洼、黄山、香山、黄山南、黄山东等 20 多个镁铁-超镁铁岩体;东段位于镜儿泉一带,包括红石岗、黑石梁、葫芦、葫芦东、串珠、马蹄、图拉尔根、四顶黑山等 10 多个岩体(图 1)。

2 矿床地质特征

图拉尔根铜镍矿床产于中上石炭统(C_{2-3})的一套细碧角斑质海相火山碎屑岩建造中,总体走向 $60^\circ \sim 70^\circ$ 。地层的岩石动力变质特征明显,挤压片理发育,糜棱岩化强烈。

黄山-镜儿泉韧性剪切带属于康古尔塔格-黄山深大断裂的次级断裂,是控制和制约黄山-镜儿泉铜镍成矿带中成矿母岩体和主要矿床就位空间的重要构造。图拉尔根铜镍矿区的侵入岩以海西中晚期为

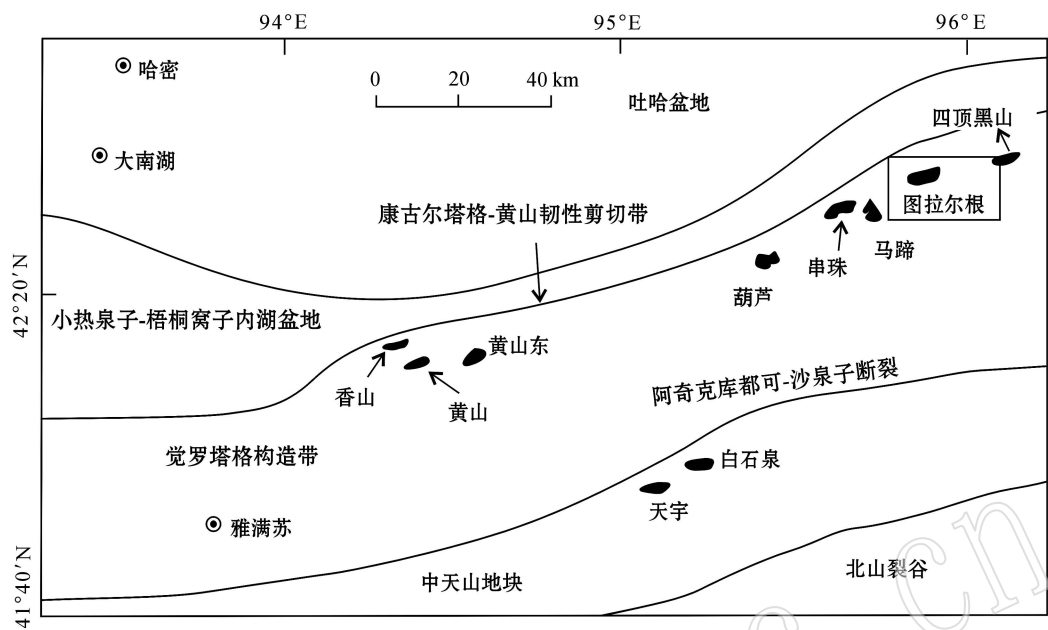


图 1 东天山地区区域地质概况(据秦克章等, 2002)

Fig. 1 Geological map of the East Tianshan area (after Qin Kezhang *et al.*, 2002)

主,岩性有花岗闪长岩、斜长花岗岩及基性-超基性杂岩体。花岗闪长岩在南部呈岩基产出;斜长花岗岩呈脉状产出;基性-超基性岩呈脉状-透镜状产出,

具有带状分布的特点,地表分为 3 个岩体,其中 I 号岩体是主要的赋矿岩体(图 2)。

图拉尔根 I 号镁铁质-超镁铁质杂岩体由角闪

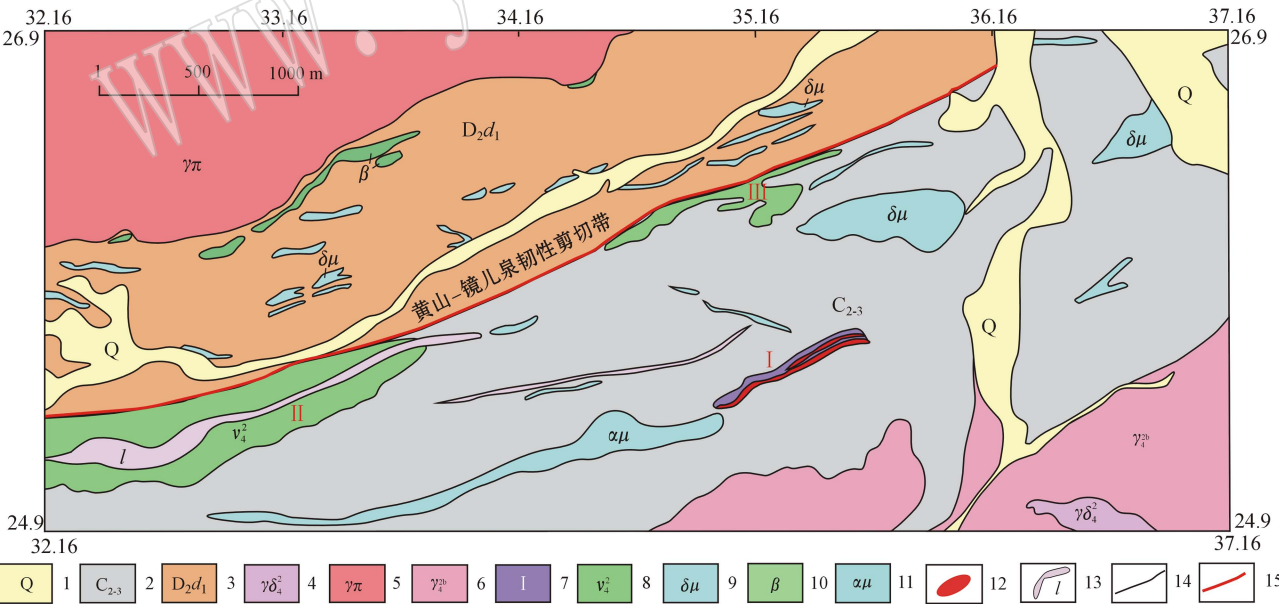


图 2 新疆图拉尔根铜镍矿区地质图(据三金柱等, 2007)

Fig. 2 Simplified geological map of the Tulargen ore district (after San Jinzhu *et al.*, 2007)

1—第四系; 2—中-上石炭统海相火山碎屑岩; 3—中泥盆统大南湖组凝灰质砂岩; 4—花岗闪长岩; 5—花岗斑岩; 6—花岗岩; 7—基性-超基性杂岩体及编号; 8—辉长岩体及编号; 9—闪长玢岩; 10—辉绿玢岩; 11—安山玢岩; 12—矿体; 13—石英脉; 14—地层界线; 15—断裂

1—Quaternary; 2—middle-upper Carboniferous; 3—middle Devonian; 4—granodiorite; 5—granite porphyry; 6—granite; 7—mafic-ultramafic intrusion; 8—gabbro; 9—diorite porphyrite; 10—silite; 11—andesite porphyrite; 12—ore body; 13—quartz vein; 14—stratigraphic boundary; 15—fault

橄榄岩、角闪辉橄岩和角闪辉长岩组成,局部有辉长岩出露。剖面上岩相对称分带特征明显,即中间相为角闪橄岩相,过渡相为角闪辉橄岩相,边缘相为角闪辉长岩相。辉长岩多在杂岩体边部。各岩相在平面上呈环带状产出,具有单期岩浆多次脉动上涌

成矿特征(图 3)。三金柱等(2010)对岩体年代学进行了研究,图拉尔根 I 号岩体的辉长岩单颗粒锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果为 300.5 ± 3.2 Ma,属于晚石炭世到早二叠世的产物。

根据岩体分布及接触关系特征判断岩体分 3 次

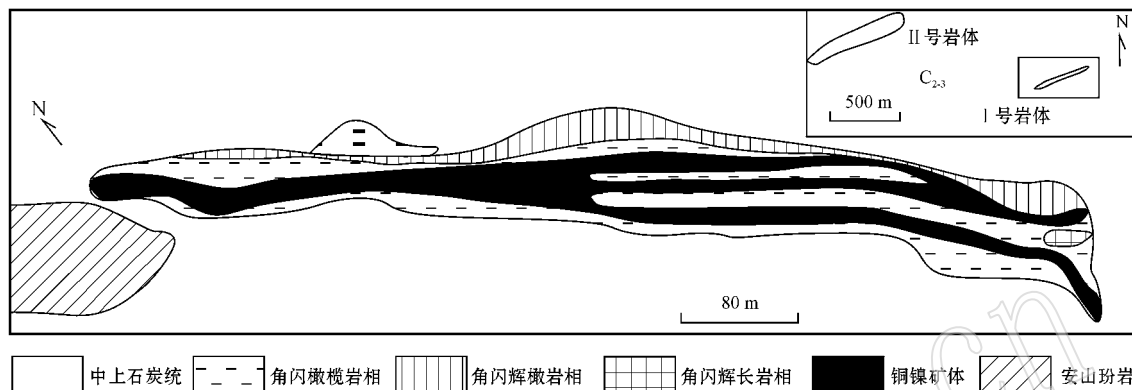


图 3 I 号杂岩体结构模式图(据新疆维吾尔自治区有色地质勘查局 704 队,2010^①改绘)

Fig. 3 Schematic structural model of complex I(modified after No. 704 Geological Party, Xinjiang Nonferrous Geological Prospecting Bureau, 2010^①)

侵入:第一次为角闪辉长岩相,为后期岩浆所吞噬,往往呈透镜状残留体,且受后期构造破坏,比较破碎,蚀变强烈;第二次为角闪辉橄岩相,呈环带状产出,岩体具有蛇纹石化、绿泥石化和滑石化蚀变特征,常见稀疏-浸染状铜镍矿化;第三次为角闪橄岩相,是主要的赋矿岩相,常见浸染-稠密浸染状矿化。角闪辉长岩和角闪辉橄岩中常见透镜状凝灰岩捕虏体。角闪辉橄岩与角闪橄岩常呈断层接触。

图拉尔根铜镍矿体主要产于杂岩体内的角闪橄岩和角闪辉橄岩中,多呈透镜状、似层状、脉状产出,特富块状矿体呈脉状贯入于岩体中上部,部分产于岩体陡缓转折端。矿体最大视厚可达 3.95 m,最高 Ni 品位在 6% 以上。矿石类型主要分为岩浆型矿石(包括就地熔离的星点状、浸染状矿石以及深熔贯入型块状矿石),含矿包体以及热液脉状矿石(富黄铜矿)。矿体的围岩蚀变比较常见,主要有蛇纹石化、绢云母化、绿泥石化、钠长石化等。

原生矿石多呈深黑色、墨绿色,多具他形粒状结构、固溶体分离结构、交代结构等。以块状、浸染状、团状、珠滴状构造为主。主要金属矿物磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿,次要金属矿物有磁铁矿、黄铁矿、铬铁矿等。矿石中以硫化镍为主, NiS 含量占全镍

含量的 95% 以上,说明该矿体为硫化型矿体。

3 基性包体与寄主岩的岩相学特征

基性包体的寄主岩主要是角闪辉橄岩(图 4a),灰黑色,自形-半自形粒状结构,包橄结构(图 4b),包含结构和填间结构(图 4c),块状构造,整体蚀变程度一般~较强,接近包体部位蚀变有所增强。主要矿物组合为橄榄石(55%~60%,以下均为体积分数)、单斜辉石(15%~20%)、斜方辉石(5%~10%)、角闪石(10%左右)和黑云母(3%~8%)。橄榄石,无色~淡黄色,厚板状、短柱状或他形粒状。裂理发育,蚀变较强,主要见蛇纹石化,少见滑石化。单斜辉石,无色,短柱状、他形粒状。蚀变一般,主要见绿泥石化、纤闪石化。角闪石,褐色,长柱状,发育球形褪色蚀变。

基性包体多集中分布于 400~500 m 深度范围内,其大小集中在几到几十厘米之间。根据包体的组成、形态、分布和含矿性等特征形态,可将其大致分为以下 3 类:含矿包体(Bo),形状为近圆-椭圆形、不规则团状等,分布局部比较集中。含矿性好~较好,金属矿物主要为磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿,

① 新疆维吾尔自治区有色地质勘查局 704 队. 2010. 新疆哈密市图拉尔根铜镍矿详查工作总结.

呈粗粒集合体。包体与寄主岩界线截然,不含矿包体(U_0),又可分为两亚类,第一亚类包体(以下均简称 U_{01})呈近椭圆及不规则团囊状。白色,以斜长石为主,大小多在几厘米左右。该类包体与寄主岩界线比较清楚;第二亚类(以下均简称 U_{02})由众多粒径 $1\sim 5\text{ cm}$ 的小团粒相对集中分布,构成一个边界不十分清楚的大团囊,小团粒同样以斜长石为主。

Bo :辉长岩(图4d),暗灰色,半自形板状结构,填间结构。透明矿物由斜长石($60\%\sim 80\%$)、单斜辉石($5\%\sim 10\%$)、角闪石($5\%\sim 15\%$)和黑云母($5\%\sim 10\%$)组成。暗色矿物与硫化物共存,整体蚀变强烈,主要的蚀变类型有钠长石化、黝帘石化、绢云母化、碳酸盐化(图4f)、绿泥石化、纤闪石化等。

U_{01} :斜长岩(图4g),白色,半自形板状结构,次棱角-不规则致密团状。斜长石在 95% 以上,少量辉石的蚀变残余,整体蚀变较 Bo 略弱。斜长石特征基本同上,蚀变程度较 Bo 偏弱,主要类型有钠长石化、黝帘石化、绢云母化、碳酸盐化。辉石基本全部绿泥石化,绿泥石常成团分布,具有典型的“铁锈色”、“柏林蓝”干涉色。

U_{02} :斜长岩(图4h),白色,半自形板状结构,不规则疏散状分布,可能是动力破坏作用造成包体的分散。基本以斜长石为主,常见钠长石净边结构(图4i),主要蚀变类型有绢云母化、钠长石化、黝帘石化、葡萄石化、碳酸盐化、绿泥石化。包体的分布形式造成寄主岩蚀变强烈,基本由角闪石、绿泥石和斜长石组成。

包体与寄主岩的边界通常比较清楚,尤其 Bo 和 U_{01} 包体与寄主岩之间,常发育有以鳞片状、片状绿泥石为主的宽约 $0.1\sim 0.3\text{ mm}$ 的接触边,接触边界与寄主岩呈截然关系,与包体呈过渡关系(图4j、4k、4l),这一现象明显说明了包体在固结过程中或固结后不久与围岩发生过一定的反应。也可见寄主岩的造岩主矿物插入包体,暗示了寄主岩在固结时包体处于半固态或液态,且包体的物理化学条件较活跃,富含较多的气水热液成分。

4 岩石地球化学特征

4.1 分析方法

取11件新鲜的岩石样品进行岩石地球化学测试,其中图拉尔根I号岩体样品7件,包体样品4件,分别包括角闪辉长岩样品2件,角闪辉橄岩样品3

件,角闪橄榄岩样品2件和含矿包体(Bo)2件以及不含矿包体2件(其中 U_{01} 和 U_{02} 各1件)。样品前期处理时将岩体及 Bo 中的金属矿物剔除,避免其对分析精度的影响。岩石化学测试分析在国土资源部武汉矿产资源监督检测中心完成。主量元素利用荧光光谱仪(XRF)测试分析,微量、稀土元素分析采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析方法。

4.2 主量元素地球化学

测试样品的主量元素分析数据见表1。由于样品处理失误,一件 Bo 样品的 Fe 含量过高,应该是前期处理时混入了金属矿物,故将其删除。包体的 SiO_2 含量略高, $44.56\%\sim 48.74\%$,属基性岩石,相对富碱、高铝、高钙和低镁、铁,钛含量相对偏低, $Mg^\#$ 值为 $60.34\sim 73.29$ 。从主量元素含量来看, Bo 属于辉长岩范畴,但 Mg 、 Fe 含量偏低,这与 Bo 含矿有关, Mg 、 Fe 进入硫化物晶格,而I号岩体各岩相的 SiO_2 含量总体较低,介于 $38.63\%\sim 51.26\%$,属基性-超基性岩石,岩体成分高镁、贫碱、贫铝、钙和低钛,具有东疆型镁铁-超镁铁岩体的特征,基性岩相 $Mg^\#$ 值为 $66.14\sim 78.65$,超基性岩相 $Mg^\#$ 值为 $79.96\sim 85.05$ 。由此来看,包体与I号岩体存在明显的差别。

包体的 m/f 介于 $1.28\sim 2.31$ 之间,平均值为 1.92 (Bo 的 m/f 值较 U_0 略高);而I号岩体的 m/f 介于 $1.64\sim 4.80$ 之间,平均值为 3.18 。根据吴利仁(1963) m/f 值与基性岩浆成矿关系的划分,包体属于铁质基性岩,I号岩体属于铁质超基性岩,总体来说,两者均利于成矿。

AFM图解和 $FeO_T/MgO-SiO_2$ 图解(图5)显示出较一致的特征,包体样品更偏向于钙碱性玄武岩系列,而图拉尔根I号岩体角闪橄榄岩全部落在拉斑玄武岩系列,角闪辉橄岩样品分布于拉斑玄武岩系列与钙碱性玄武岩系列过渡区内,两个角闪辉长岩样品则分布于钙碱性玄武岩系列中,随着基性程度的降低呈现了较好的由拉斑玄武岩系列向钙碱性玄武岩系列过渡的趋势。

4.3 微量、稀土元素地球化学

从测试样品的微量、稀土元素的分析数据(表2)和微量元素蛛网图(图6a)来看,两者既有相同之处又有不同之处。

相同之处:包体以及图拉尔根I号岩体的微量元素蛛网图整体右倾,总体特征是大离子亲石元素

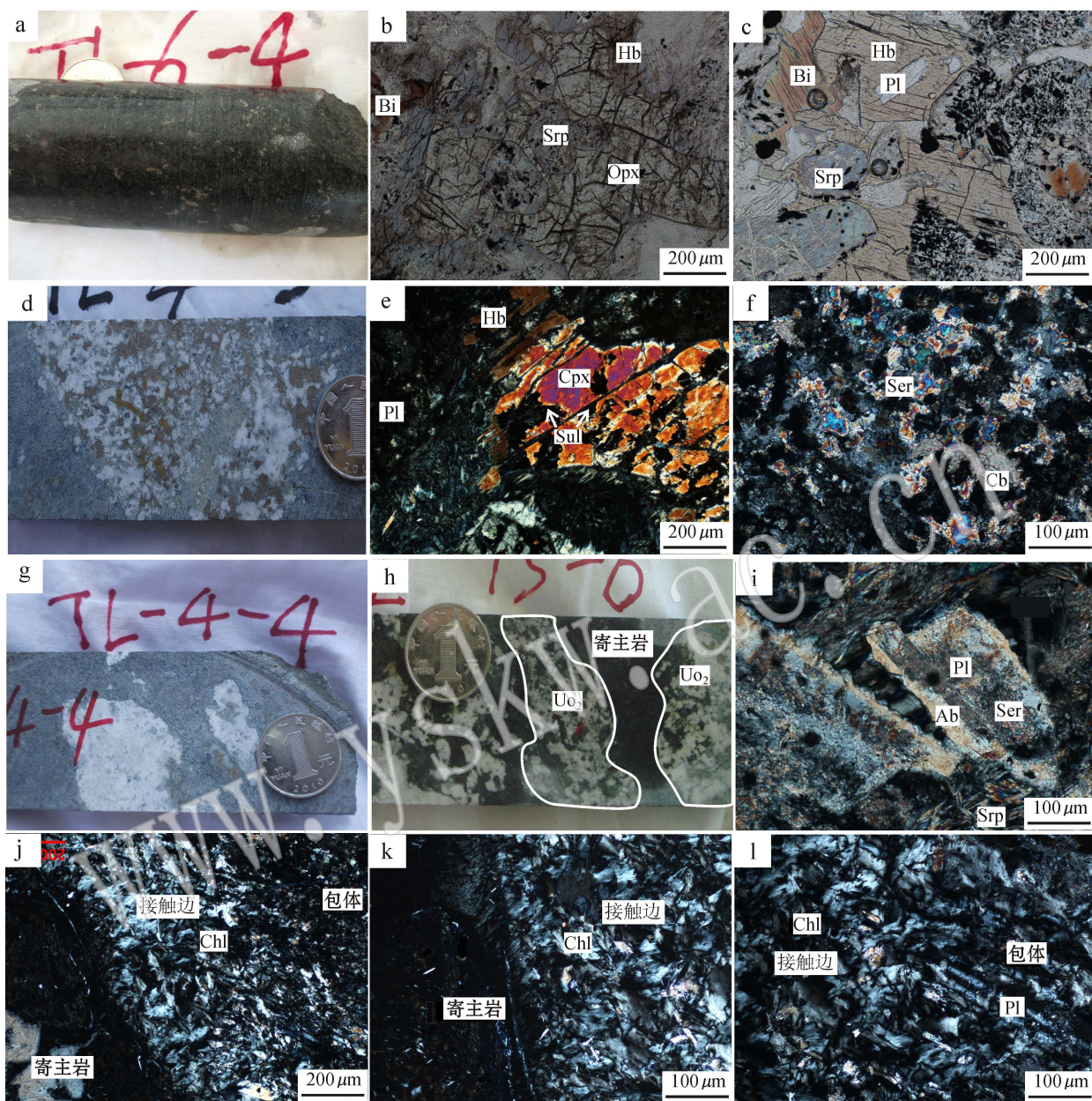


图 4 包体与寄主岩的岩石及岩相学特征

Fig. 4 Petrography of OME and host intrusions

a—寄主岩, 角闪辉橄岩; b—包橄结构(单偏光), 橄榄石(Ol)呈椭圆颗粒包裹在斜方辉石(Opx)中; c—包含结构、填隙结构(单偏光), 寄主岩中斜长石(Pl)被角闪石(Hb)包含, 角闪石(Hb)和黑云母(Bi)充填在橄榄石(Ol)的间隙, 橄榄石(Ol)发生蛇纹石化(Srp); d—Bo, 含矿包体; e—Bo(正交偏光), 硫化物(Sul)充填在单斜辉石(Cpx)的解理、间隙中; f—Bo(正交偏光), 包体的绢云母化(Ser)和碳酸盐化(Cb); g—U₀₁, 第一亚类不含矿包体; h—U₀₂, 第二亚类不含矿包体; i—不含矿包体 U₀₂(正交偏光), 斜长石(Pl)的钠长石(Ab)净边结构; j—包体与寄主岩的接触边(正交偏光), 以鳞片状绿泥石(Chl)为主; k—接触边与寄主岩呈截然关系(正交偏光); l—接触边与包体呈过渡关系(正交偏光)

a—host intrusion, hornblende pyroxene peridotite; b—package olivine structure (plainlight), olivine (Ol), with strong serpentinization (Srp), which shows oval to rounded grains and is packaged by orthopyroxene (Opx); c—poikilitic and intersertal texture in host intrusion (plainlight), plagioclase (Pl) is packaged by hornblende (Hb), and hornblende (Hb) and biotite (Bi) occur in the interstitial site of olivine; d—OME in hornblende pyroxene peridotite; e—Bo (crossed nicols), subhedral to anhedral clinopyroxene (Cpx), with fine-grained sulfides (Sul) in its interstitial parts, and fine-grained subhedral plagioclase (Pl), with strong alteration; f—OME (crossed nicols), sericitization (Ser), carbonate (Cb) alteration in plagioclase (Pl); g—U₀₁, the first subtype mafic enclaves without Cu-Ni mineralization; h—U₀₂, the second subtype mafic enclaves without Cu-Ni mineralization; i—U₀₂(crossed nicols), an outer albite rim formed in the plagioclase; j—rim between OME and their host (crossed nicols); k—enlarged drawing (crossed nicols), boundary of the rim and host intrusion; l—enlarged drawing (crossed nicols), boundary of the rim and OME

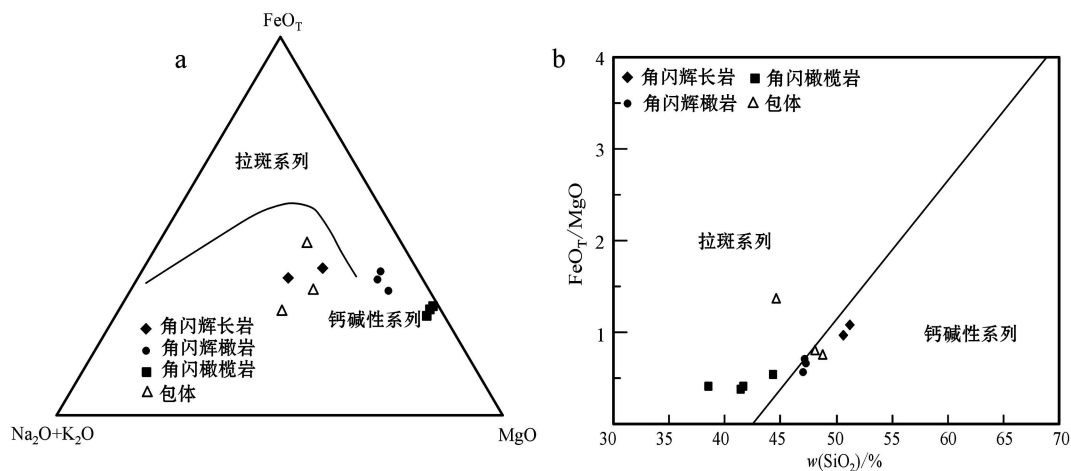


图 5 图拉尔根 I 号岩体与包体 AFM 图解(a)和 FeO_T/MgO-SiO₂ 相关性图解(b)
Fig. 5 AFM diagram (a) and plots of SiO₂ versus FeO_T/MgO (b) for rocks of Tulargen complex I and mafic enclaves

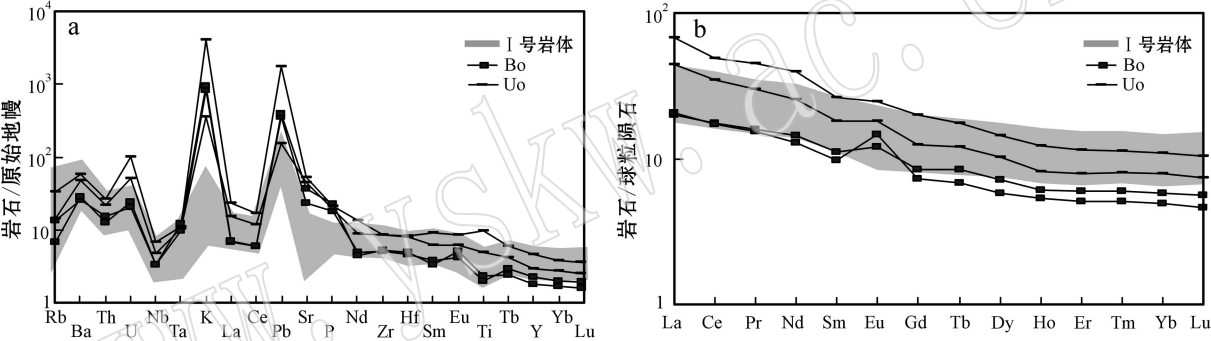


图 6 图拉尔根 I 号岩体与包体微量元素原始地幔标准化蛛网图(a)和稀土元素球粒陨石标准化配分图(b)
(据 Sun & McDonough, 1989)
Fig. 6 Primitive mantle-normalized trace elements spider diagram (a) and chondrite-normalized REE (b)
(after Sun & McDonough, 1989)

(LILE: Ba、K) 及 U、Pb 相对富集, 高场强元素 (HFSE: Th、Nb、Ta、Zr、Hf、HREE 等) 相对亏损。

不同之处: ① 包体 K、Pb、Sr、P 的含量明显高于 I 号岩体, 其中 P 的富集与包体中存在磷灰石的岩相学特征一致; ② Bo 具有 Ti 亏损, 而 Uo 则具有弱 Ti 富集, 而 I 号岩体各岩相均存在不同程度的 Ti 亏损, 而且随着基性程度的增强, Ti 亏损程度增强, 说明该区含矿性与 Ti 的含量密切相关, 含矿性较好的岩相 Ti 的含量偏低(孙赫等, 2007)。

此外, 包体 Bo 与 Uo 之间也存在一定差别, 除 Ta、K、Pb、Sr、P 存在重叠外, Bo 的微量元素总量普遍低于 Uo。

由表 2 和稀土元素配分曲线(图 6b)可见, 包体和 I 号岩体的配分图总体都呈右倾的富轻稀土分配形式, 该模式为全球范围内大多数含镍岩体所共有

(Naldrett, 1999)。

包体和 I 号岩体之间的差异还是非常明显的, 主要有以下几点:

(1) 包体的稀土元素总量较高, $\Sigma\text{REE} = 39.00 \times 10^{-6} \sim 108.34 \times 10^{-6}$, 平均值为 65.78×10^{-6} , 其中 Bo 的 ΣREE (平均值为 40.97×10^{-6}) 明显低于 Uo 的 ΣREE (平均值为 90.58×10^{-6}); 而 I 号岩体基性岩 $\Sigma\text{REE} = 45.81 \times 10^{-6} \sim 120.00 \times 10^{-6}$, 平均 87.86×10^{-6} , 超基性岩 $\Sigma\text{REE} = 43.35 \times 10^{-6} \sim 55.84 \times 10^{-6}$, 平均值为 49.60×10^{-6} 。总体来看, 包体的 ΣREE 高于 I 号超基性岩, 而低于基性岩的 ΣREE , 并且 Uo 的 ΣREE 高于 Bo 的量。由于在岩浆演化过程中 REE, 尤其是 HREE 具有不相容性, 因此上述 ΣREE 特点可能在一定程度上反映了结晶演化的早晚关系。

表 1 包体主量元素地球化学数据

Table 1 Geochemical data of major elements in enclaves of the Tulargen Cu-Ni deposit

$w_B/\%$

岩性	图拉尔根 I 号岩体									包体		
	新鲜辉长岩	角闪辉长岩	角闪辉橄岩	角闪辉橄岩	矿化辉橄岩	角闪橄榄岩	角闪橄榄岩	*	*	Bo	Uo	Uo
Na ₂ O	2.50	4.31	1.60	3.27	2.36	0.83	0.55	1.32	0.16	3.58	2.86	3.44
MgO	14.61	6.45	14.04	8.19	16.52	20.56	30.09	28.34	29.89	3.91	6.52	6.47
Al ₂ O ₃	12.88	16.11	12.68	15.20	11.84	10.22	5.22	7.33	5.54	24.58	20.25	21.44
SiO ₂	47.26	51.26	47.19	50.69	47.08	44.38	41.72	41.49	38.63	48.74	44.56	48.10
P ₂ O ₅	0.19	0.24	0.22	0.25	0.12	0.17	0.12	0.07	0.06	0.08	0.15	0.14
K ₂ O	0.22	1.37	0.54	0.98	0.24	0.94	0.52	0.34	0.30	0.23	1.24	0.68
CaO	5.75	6.91	7.04	7.46	6.04	4.70	2.34	3.08	1.85	11.99	8.92	9.49
TiO ₂	0.88	1.09	0.88	1.22	0.80	0.60	0.42	0.31	0.35	0.41	0.79	0.74
MnO	0.20	0.15	0.18	0.15	0.22	0.17	0.17	0.17	0.16	0.06	0.21	0.12
Fe ₂ O ₃ ^T	10.79	7.70	11.10	8.85	10.45	12.01	13.31	11.61	13.57	3.32	9.99	5.83
Mg [#]	75.93	66.14	74.67	68.33	78.65	79.96	84.05	85.05	83.70	73.29	60.34	72.11
m/f	2.65	1.64	2.48	1.82	3.09	3.37	4.46	4.80	4.35	2.31	1.28	2.17

注: Fe₂O₃^T 表示以 Fe₂O₃ 的形式表示 FeO 加上原本 Fe₂O₃ 的总量; Mg[#] = Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe²⁺); m/f 为 (Mg²⁺ + Ni²⁺) / (Fe²⁺ + Fe³⁺ + Mn²⁺) 的分子比; 测试在国土资源部武汉矿产资源监督检测中心完成; * 数据引自孙赫等(2006)。

表 2 图拉尔根 I 号岩体和包体微量、稀土元素地球化学数据

Table 2 Geochemical data of major elements and REE in enclaves and complex I of the Tulargen Cu-Ni deposit

$w_B/10^{-6}$

岩性	图拉尔根 I 号岩体							包体			
	新鲜辉长岩	角闪辉长岩	角闪辉橄岩	角闪辉橄岩	角闪辉橄岩	角闪橄榄岩	角闪橄榄岩	Bo	Bo	Uo ₁	Uo ₂
Pb	4.39	5.16	8.43	7.77	8.36	7.47	10.70	25.72	28.72	127.10	10.97
Rb	2.84	17.90	42.30	19.20	10.90	25.10	10.50	8.66	4.35	21.68	9.21
Ba	180.00	567.00	189.00	284.00	165.00	159.00	280.00	180.70	197.80	409.50	337.20
Th	1.44	1.78	0.81	2.45	2.58	1.38	0.88	1.30	1.08	2.30	1.89
U	0.50	0.75	0.24	0.86	0.63	0.45	0.30	0.43	0.50	2.15	1.07
Nb	4.97	4.51	2.36	3.57	4.32	1.84	1.57	2.39	2.38	4.89	3.41
Ta	0.52	0.27	0.13	0.24	0.45	0.14	0.10	0.40	0.50	0.46	0.42
Sr	216.00	316.00	54.40	314.00	170.00	105.00	83.80	499.40	787.50	1101.80	946.70
Zr	95.50	113.00	53.70	129.00	106.00	72.80	53.10	56.90	59.80	95.20	95.30
Hf	2.29	2.60	1.23	3.33	2.38	1.76	1.13	1.43	1.51	2.52	2.49
La	7.43	10.10	4.22	11.10	10.30	6.24	5.05	4.71	4.88	16.07	10.45
Ce	18.20	23.10	9.89	27.70	24.30	13.90	10.70	10.70	10.60	29.83	21.26
Pr	2.55	3.30	1.42	4.00	3.32	1.87	1.50	1.51	1.46	4.27	2.85
Nd	12.00	15.20	6.67	18.60	14.80	8.58	6.55	6.74	6.00	18.54	11.97
Sm	3.26	4.03	1.85	4.89	3.79	2.16	1.71	1.71	1.50	4.01	2.76
Eu	0.99	1.35	0.62	1.42	1.17	0.65	0.49	0.70	0.85	1.43	1.05
Gd	3.40	4.09	1.92	4.97	3.83	2.32	1.72	1.73	1.51	4.11	2.57
Tb	0.57	0.70	0.34	0.85	0.66	0.38	0.29	0.31	0.26	0.65	0.45
Dy	3.63	4.48	2.25	5.62	4.30	2.44	1.91	1.83	1.48	3.68	2.61
Ho	0.74	0.91	0.46	1.15	0.86	0.51	0.39	0.34	0.30	0.69	0.46
Er	2.13	2.56	1.33	3.35	2.52	1.43	1.10	0.99	0.84	1.90	1.30
Tm	0.33	0.38	0.20	0.52	0.39	0.22	0.17	0.15	0.13	0.29	0.21
Yb	2.05	2.43	1.33	3.33	2.51	1.41	1.10	0.99	0.84	1.85	1.35
Lu	0.31	0.36	0.21	0.49	.38	0.23	0.17	0.14	0.12	0.26	0.19
Y	20.60	25.10	13.10	32.00	24.10	13.50	10.50	10.38	8.24	20.76	13.35
∑REE	78.19	98.08	45.81	120.00	97.24	55.84	43.35	42.95	39.00	108.34	72.83
La/Sm	1.47	1.62	1.47	1.47	1.75	1.86	1.91	1.78	2.10	2.58	2.44
La/Yb	2.60	2.98	2.28	2.39	2.94	3.17	3.29	3.40	4.19	6.24	5.55
Gd/Yb	1.37	1.39	1.19	1.23	1.26	1.36	1.29	1.44	1.49	1.84	1.57
δEu	0.90	1.01	1.00	0.87	0.93	0.89	0.86	1.22	1.70	1.06	1.18

注: 微量稀土元素测试在国土资源部武汉矿产资源监督检测中心完成, 分析采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析方法。除∑REE 外, 所有数据均为标准化数据。微量元素采用原始地幔标准化, 稀土元素采用球粒陨石标准化, 据 Sun & McDonough(1989)。

(2) 包体 (La/Yb)_N = 3.40~6.24 (Bo 的平均值为 3.80, Uo 为 5.89) (La/Sm)_N = 1.78~2.58 (Bo 的平均值为 1.94, Uo 为 2.51) (Gd/Yb)_N = 1.44~1.84 (Bo 的平均值为 1.47, Uo 为 1.71), 而 I 号岩体的 (La/Yb)_N = 2.28~3.29 (La/Sm)_N = 1.47~1.91 (Gd/Yb)_N 略大于 1, 为 1.19~1.39。以上数据, 显示包体轻、重稀土元素之间以及轻、重稀土元素内部分异程度均强于 I 号岩体, 且 Uo 较之含矿包体 Bo 的分异程度更强。稀土元素的分异程度反映了岩浆的分异结晶程度, 轻、重稀土元素分异越强, 岩浆的分异结晶越充分, 因此包体属于岩浆演化后期的产物, 且母岩浆经历了较为充分的岩浆分异。

(3) 包体, 尤其是 Bo , 具有 Eu 正异常, δEu 值为 1.06~1.70, 这与包体中分布较多斜长石的岩相学特征一致, 也说明包体原始岩浆早期并没有经历 Eu 的亏损; 而 I 号岩体具有微弱的 Eu 负异常或无异常, δEu 值在 0.86~1.01 之间, 多数样品略微小于 1, 但随着基性程度降低, δEu 略有增大趋势, 说明 I 号岩体早期斜长石分离结晶作用比较微弱, 随着岩浆演化, 斜长石堆晶作用有所增加。

5 讨论

5.1 包体成因: 分离结晶/岩浆混染

同化混染作用是形成岩浆型 Cu-Ni 硫化物矿床最重要的机制 (如 Sudbury、Duluth、Voisey's Bay 和 Petchenga 矿床) 之一, 准确地评价同化混染作用的方式及程度与探索成矿过程密切相关。那么包体的形成是不是也与岩浆混染作用有关呢?

图拉尔根 I 号岩体及包体的哈克图解 (图 7) 显示, I 号岩体具有良好的线性关系, SiO_2 与 Na_2O 、 CaO 、 P_2O_5 、 Al_2O_3 分别呈良好正相关, 与 K_2O 呈弱正相关, 表明了单斜辉石和斜长石的分离结晶作用 (邓宇峰等, 2011); 与 TiO_2 的正相关关系与其在结晶分异过程中不相容性有关; 与 MgO 、 FeO^T 分别呈负相关, 说明了橄榄石与辉石的分离结晶作用。总体来看, 岩浆分异作用在 I 号岩体的形成过程中占主导地位。包体的样品分布或高或低, 或者交叉于图拉尔根 I 号岩体的演化趋势线。 Na_2O 、 CaO 、 Al_2O_3 与 SiO_2 呈弱正相关, 但总体含量明显高于 I 号岩体各岩相; Al_2O_3 的含量高, 暗示斜长石的含量高, 这与包体的宏观特征一致; P_2O_5 、 K_2O 、 FeO^T 、 TiO_2 与 SiO_2 呈弱负相关, MgO 基本保持一致。包体与 I 号岩体

之间如此明显的差异, 说明包体的形成过程中存在外来物质的加入, 不是由 I 号岩体的原始岩浆直接演化而来的。

不相容元素 La 、 Nd 、 Zr 、 Yb 在没有岩浆混染的情况下, 随着岩浆分异演化会逐渐富集, 因此同源岩浆分异演化趋势中, La 、 Nd 、 Zr 、 Yb 与 SiO_2 会呈现较好的正相关性。在图拉尔根 I 号岩体及包体的 SiO_2 与 La 、 Nd 、 Zr 、 Yb 相关性图解中 (图 8), I 号岩体除一件角闪辉橄岩样品 TL-1-3 外, 其他超基性岩-基性岩石样品均具有很好的正相关性, 而包体样品本身的相关性很差, 且与图拉尔根 I 号岩体的相关线交叉, 再次证明了包体形成过程中岩浆混染作用的存在。

5.2 包体成因: 岩浆混染的来源

在图拉尔根 I 号岩体中可见凝灰岩的捕掳体, 说明岩浆在演化侵位过程中局部发生了围岩同化混染作用。除野外地质观察外, 还有一系列岩石地球化学指标可以判定岩浆混染的来源。图拉尔根 I 号岩体, 尤其是包体, 明显亏损 Nb 、 Ta , 强烈富集 U 、 Pb 。高场强元素 Nb 、 Ta 的亏损是大陆拉斑玄武岩普遍的特征, 这可能是陆壳混染作用的结果 (Naldrett, 1999), 或源区存在俯冲的洋壳物质。

Nb 与 U 、 Ce 与 Pb 具有相似的总分配系数, 因此 Nb 、 U 、 Ce 、 Pb 在地幔部分熔融过程中不发生明显分异, 可以反映岩浆源区的地球化学特征。洋中脊玄武岩 (MORB) 和洋岛玄武岩 (OIB) 的 Nb/U 比值 47 ± 10 , 原始地幔中 Nb/U 比值约为 34, 大陆地壳的 Nb/U 比值约 9~12; 典型地幔的 Ce/Pb 比值 25 ± 5 和地壳 Ce/Pb 比值 < 15 (Hofmann, 1986; Arndt and Christensen, 1992)。图拉尔根 I 号岩体的 Nb/U 值 4.09~9.94, 平均值为 6.43, Ce/Pb 比值 1.00~4.48, 平均值为 2.88; 包体 Nb/U 值处于 2.28~5.58 之间, 平均值为 3.94, Ce/Pb 值为 0.23~1.94, 平均值为 0.74。从以上数据来看, 图拉尔根 I 号岩体和包体均曾遭受一定程度的陆壳混染, 但两者的值又都小于大陆地壳的参数值, 可能岩体和包体都受到后期流体作用的影响, 且包体的影响程度更强烈 (表 3)。

5.3 包体成因: 捕掳体/不混溶

一系列的岩石学、岩相学以及岩石地球化学数据已经证明包体的形成是由陆壳混染作用导致的, 那包体是直接捕掳的地壳物质, 还是经历陆壳混染后由于某种原因发生液态不混溶固结而成呢?

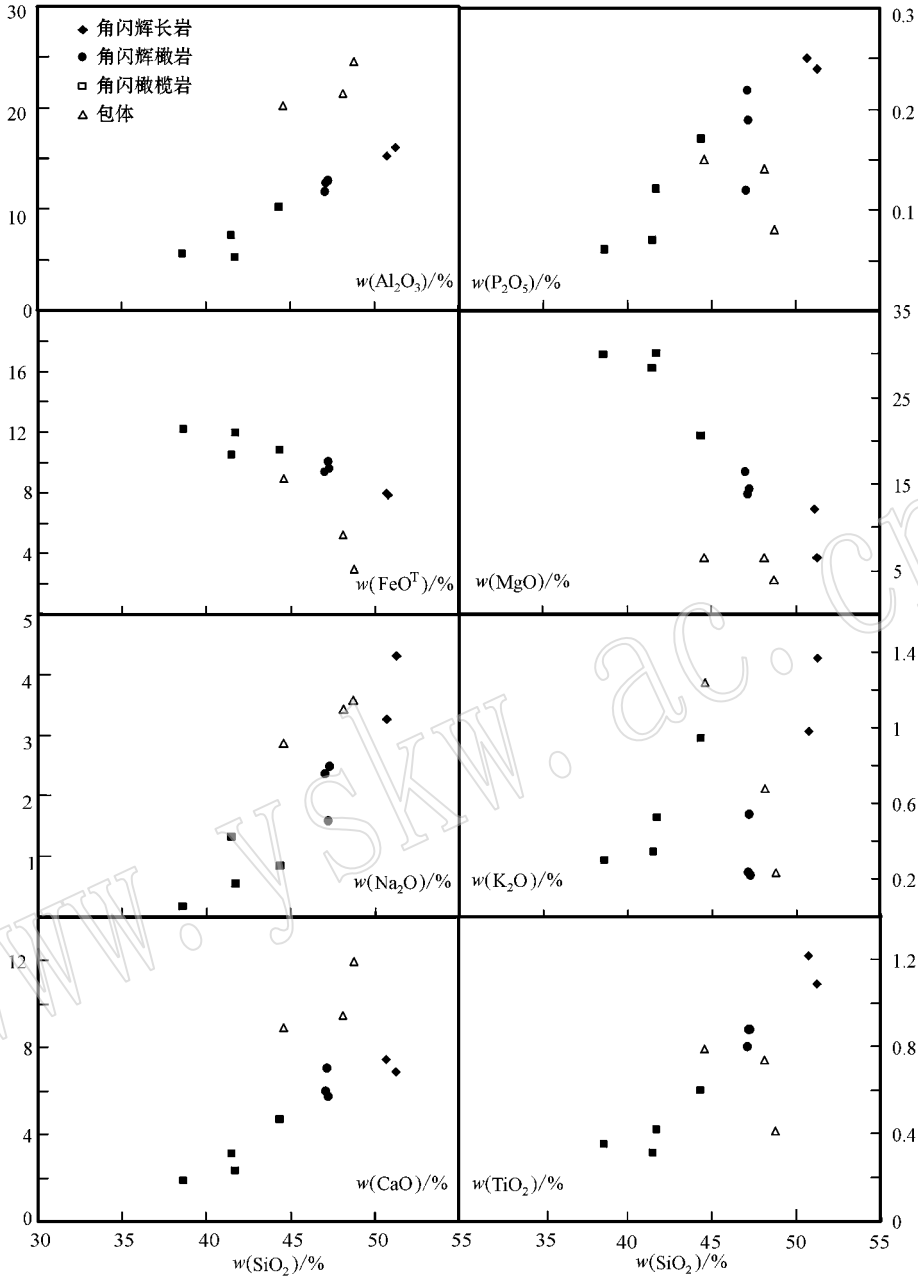


图 7 图拉尔根 I 号岩体及包体的哈克图解

Fig. 7 Harker diagram for rocks of Tulargen complex I and mafic enclaves

在岩石学特征中,致密棱角-次棱角状不含矿包体 U_{01} 从形态上看与捕掳体类似,但是含矿包体 B_0 和疏散分布的不含矿包体 U_{02} 基本不可能是固态捕掳体,含矿包体 B_0 中矿石矿物类型、结构、结晶顺序与寄主岩矿石还是存在较高的相似度,而且疏散分布的不含矿包体 U_{02} 与寄主岩的分布形式基本上也排除了捕掳体这一可能性。此外,从岩相学特征来看,在寄主岩与包体的接触部位常存在寄主岩局部

插入包体中,且进入包体的矿物基本上全部绿泥石化,寄主岩越接近包体,其本身低温热液蚀变程度越强,总体来看,包体对寄主岩造成的蚀变影响说明在图拉尔根岩体固结过程中包体处于液态或半固态且富含气水热液成分,如此活跃的物理化学环境,基本否定了包体是地壳固态捕掳体的可能。

液态不混溶作用是岩浆演化和成矿作用的重要机理之一,由于温度、压力、成分等物化条件的改变,

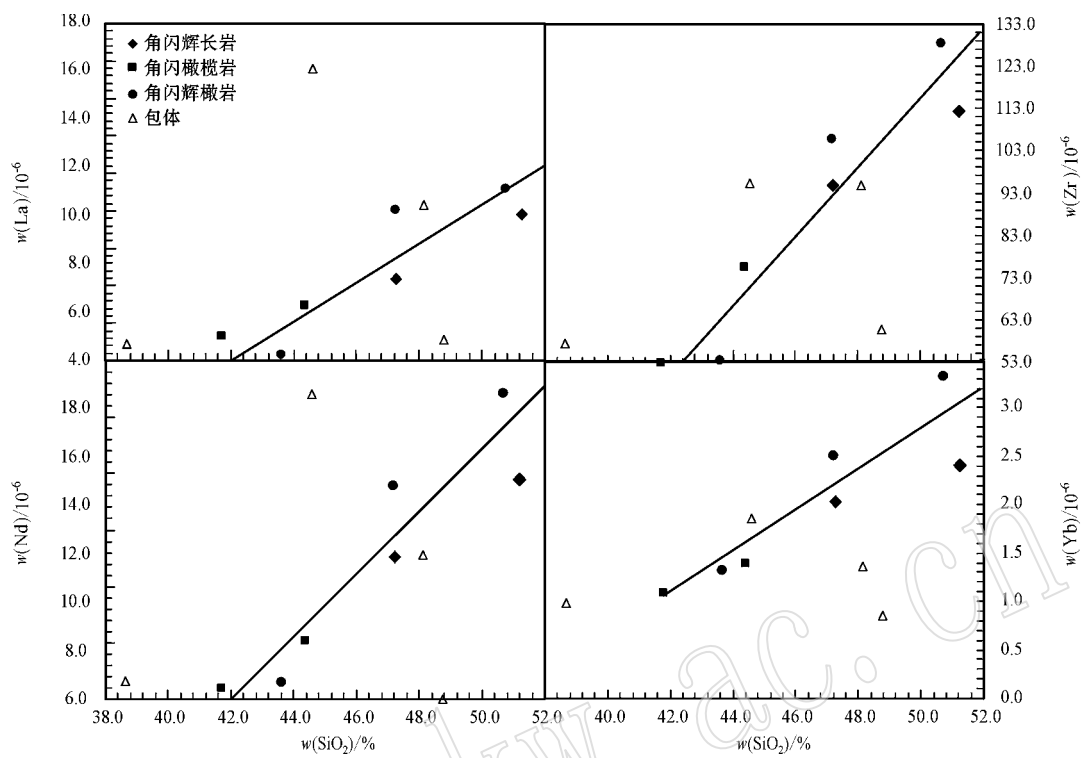


图 8 La、Zr、Nd、Yb - SiO₂ 的相关性图解

Fig. 8 Diagram of La , Zr , Nd and Yb versus SiO₂

表 3 地球化学比值参数对比

Table 3 Geochemical parameters of Nb/U and Ce/Pb in primitive rock , Tulargen complex I , enclaves , and average crust

	Nb/U	Ce/Pb	数据来源
原始地幔	34	25 ± 5	Sun and McDonough(1989)
图拉尔根 I 号岩体	4.09~9.94	1.00~4.48	本文
包体	2.28~5.58	0.23~1.94	
平均地壳	8.45	<15	Sun and McDonough(1989)

使原来均一的岩浆分离成两个共轭依存、成分和熔体性质有差异的液相(桑祖南等,2002)。Philpotts (1979)曾在实验中证实,液态不混溶作用在火成岩的分异中具有重要作用,拉斑玄武岩岩浆在结晶作用期间能发展为不混溶的液相。富铁程度高的基性岩浆可分异成两个不混溶相,其中一相富 Si、Al、K,而另一相富铁和其他铁镁质阳离子(Mc Birney , 1975)并且富铁相的 Na₂O/K₂O 比值较大, P₂O₅、TiO₂、MgO、MnO、Zr 和 REE 含量较高,而富硅酸盐相的 Na₂O、K₂O、Al₂O₃ 和 Rb 含量较高(Watson , 1976 ; Naslund , 1983)。从岩石地球化学数据来看,

包体与 I 号岩体的成分与前人研究的液态不混溶作用分相成分大致相吻合,说明图拉尔根岩体中的斜长-辉长岩包体是不混溶作用的产物。

5.4 包体的成岩过程及对矿床成岩、成矿作用的指示

世界级铜镍硫化物矿床研究表明,岩浆型铜镍硫化物矿床形成的关键在于岩浆中的 S 达到饱和并与亲铜元素结合形成硫化物,随之硫化物熔体从硅酸盐岩浆中熔离出来,在一定空间内与足够的硅酸盐岩浆混合使亲铜元素品位提高,并保存于合适的空间(Naldrett , 2004)。地壳混染对于岩浆型铜镍硫化物矿床形成起着重要作用(Zhang *et al.* , 2008)。地壳物质(如 SiO₂) 的加入以及橄榄石、辉石等矿物的结晶引起岩浆中 SiO₂ 含量的升高、FeO 含量降低,从而降低了岩浆中硫的溶解度,促使 S 饱和并熔离成矿(David *et al.* , 1974)。

如前所述,图拉尔根 I 号岩体由经历了良好的岩浆分异作用的原始岩浆脉动侵入,其成岩成矿过程如下:

富含 Ni、Cu 和 PGE 的原始岩浆,在岩浆演化过程中由于橄榄铬铁矿及辉石等镁铁质矿物的分离结晶作用,促使岩浆中 S 溶解度降低达到 S 饱和,发生

硫化物熔离。由于重力分异作用,使得岩浆房中出现分层现象。①顶部无矿硅酸盐岩浆,第一期脉动上涌时侵位地表或近地表形成不含矿的辉长岩和角闪辉长岩,可能由于侵位过程中富 SiO_2 和 CaO 的地壳混染促使 S 溶解度出现二次饱和,发生少量的硫化物熔离,形成就地熔离的星点状矿石;②岩浆房中部含矿硅酸盐岩浆,相对滞后脉动上涌侵位形成浸染状矿化的角闪辉橄岩相。岩浆侵位过程中混染大量的中下地壳富 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 及 H_2O 成分,使得原始岩浆中产生成分、温度、氧逸度、硫逸度等物理化学条件的不均一,进而发生不混溶的现象,这是包体的主要形成阶段。陆壳成分还促进 S 的二次熔离,并与岩浆演化产生的气水热液流体对硫化物熔浆进行交代富集。富含气水热液的硫化物熔浆相比于原始硅酸盐岩浆,与混染的陆壳成分更为接近,因此,两者更容易与原始岩浆发生不混溶,形成了散乱分布的 Bo 和 Uo ;③岩浆房中下部的富矿再分次脉动上侵,最后形成稠密浸染状矿化的角闪橄岩;④岩浆房底部的硫化物熔体,最后由于构造脉动上升贯入到成矿部位,或是贯入到围岩中,或是贯入到岩体中上部陡缓转折端,形成突变界线的块状矿石。

6 结论

辉长-斜长岩包体在图拉尔根 I 号岩体的角闪辉橄岩相中普遍分布,是由于角闪辉橄岩相在上升侵位过程中陆壳混染,造成原始岩浆发生不混溶作用形成的。哈克图解和 SiO_2 与不相容元素 La 、 Nd 、 Zr 、 Yb 的相关性图解表明岩浆混染作用对包体成岩具有重要作用。包体和图拉尔根 I 号岩体都亏损 Nd 、 Ta ,并且包体中 K 、 Pb 、 Sr 、 P 含量非常高,包体的 Nb/U 、 Ce/Pb 值都更偏向大陆地壳的值,这些都说明陆壳混染的可能性较高,或存在较强的流体迁移作用。 Bo 和 Uo 的形态和其与寄主岩的接触关系排除包体是地壳捕掳体的可能,暗示包体的形成是岩浆发生液态不混溶后固结产物。

致谢 新疆第六大队在野外工作过程中提供了帮助和支持,陆建培老师、周汉文老师在岩相学和矿相学观察中提供了帮助和指导,唐然坤师姐、刘阁师兄、王祥东同学、高瞻同学在论文编写过程中提供了帮助以及审稿人在论文修改中提供了意见,在此一并表示诚挚的感谢。

References

- Arndt N T and Christensen U. 1992. The role of lithospheric mantle in continental flood volcanism: Thermal and geochemical constraints [J]. *Geophysical Research*, 97: 10 967~10 981.
- Barbarin B. 1988. Field evidence for successive mixing and mingling between the Piolard Dorite and the Saint-Julien-La-Vette Monzogranite (Nord-Forsz Massif central, France) [J]. *Can. J. Earth. Sci.*, 25: 49~59.
- Chai Fengmei. 2006. Comparison on Petrologic Geochemistry of Three Mafic-ultramafic intrusions Associated with Ni-Cu Sulfide Deposits in Northern Xinjiang [D]. Beijing: China University of Geoscience (in Chinese with English abstract).
- Chai Fengmei, Zhang Zhaochong, Mao Jingwen, *et al.* 2006. Platinum Group Elements Geochemistry of Baishiquan Mafic-ultramafic intrusions in Central Tianshan Block, Xinjiang [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 27(2): 123~128 (in Chinese with English abstract).
- David R H, Peter L R and Brian J S. 1974. Solubility of sulfur in mafic magma [J]. *Economic Geology*, 69: 451~467.
- Deng Yufeng, Song Xieyan, Jie Wei, *et al.* 2011. Petrogenesis of the Huangshandong Ni-Cu Sulfide-Bearing Mafic-Ultramafic Intrusion, Northern Tianshan, Xinjiang: Evidence from Major and Trace Elements and Sr-Nd Isotop [J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(9): 1 435~1 451 (in Chinese with English abstract).
- Han Chunming, Xiao Wenjiao, Zhao Guochun, *et al.* 2010. In-situ U-Pb, Hf and Re-Os isotopic analyses of the Xiangshan Ni-Cu-Co deposit in Eastern Tianshan (Xinjiang), Central Asia Orogenic Belt: Constraints on the timing and genesis of the mineralization [J]. *Lithos*, 120: 547~562.
- Hofmann W. 1986. Chemical differentiation of the earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 90: 297~314.
- Li Jiaping, Wang Lijin, Ren Wei, *et al.* 2010. Petrological and mineralogical characteristics of tianyu and baishiquan mafic-ultramafic complexes in the middle tianshan of Xinjiang [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 25(2): 134~140 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinxiang, Qin Kezhang, Xu Xingwang, *et al.* 2007. Geochemistry of Baishiquan Cu-Ni-bearing mafic-ultramafic complex in East Tianshan, Xinjiang: Constraints on ore genesis and tectonic setting [J]. *Mineral Deposits*, 26(1): 43~57 (in Chinese with English abstract).
- Mao Qigui, Xiao Wenjiao, Han Chunming, *et al.* 2006. Zircon U-Pb age and the geochemistry of the Baishiquan mafic-ultramafic complex in the Eastern Tianshan, Xinjiang province: constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean [J]. *Acta Petrological Sinica*, 22(1):

- 153~162(in Chinese with English abstract).
- McBirney A R. 1975. Differentiation of the Skaergaard intrusion[J]. *Nature*, 253: 691~694.
- Naldrett A J. 1999. World-class Cu-Ni-PGE deposits: Key factors in their genesis[J]. *Mineralium Deposita*, 34: 227~240.
- Naldrett A J. 2004. Magmatic sulfide deposit: geology, geochemistry and exploration[J]. New York: Springer-Berlin Heidelberg.
- Naslund H R. 1983. The effect of oxygen fugacity on liquid immiscibility in iron-bearing silicate melts[J]. *American Journal of Science*, 283: 1 034~1 059.
- Philpotts A R. 1979. Silicate liquids: immiscibility in Tholeiite Basalts[J]. *Journal of Petrology*, 20: 99~118.
- Qian Zhuangzhi, Sun Tao, Tang Zhongli, *et al.* 2009. Platinum-group Elements Geochemistry and Its Significances of the Huangshandong Ni-Cu Sulfide Deposit, East Tianshan, China[J]. *Geological Review*, 55(6): 873~883(in Chinese with English abstract).
- Qin Kezhang, Ding Kuishou, Xu Yingxia, *et al.* 2007. Ore potential of protoliths and modes of Co-Ni occurrence in Tulargen and Baishiquan Cu-Ni-Co deposits, East Tianshan, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 26(1): 1~14(in Chinese with English abstract).
- Qin Kezhang, Fang Tonghui, Wang Shulai, *et al.* 2002. Plate tectonic division, evolution and metallogenic settings in eastern Tianshan Mountains, NW China[J]. *Xinjiang Geology*, 20: 302~308.
- San Jinzhu, Hui Weidong, Qin Kezhang, *et al.* 2007. Geological characteristics of Tulargen magmatic Cu-Ni-Co deposit in eastern Xinjiang and its exploration direction[J]. *Mineral Deposits*, 26(3): 307~316(in Chinese with English abstract).
- San Jinzhu, Qin Kezhang, Tang Zhongli, *et al.* 2010. Precise zircon U-Pb age dating of two mafic-ultramafic complexes at Tulargen large Cu-Ni district and its geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 3 027~3 035(in Chinese with English abstract).
- San Jinzhu and Wei Junying. 2009. The geochemistry characteristic of Tulargen No. 1 complex in Hami, Xinjiang[J]. *Xinjiang Nonferrous Metal*, 32(2): 1~3(in Chinese).
- Sang Zunan, Zhou Yongsheng, He Changrong, *et al.* 2002. An experimental study on partial melting of gabbro and its geological implication[J]. *Geoscience*, 37(4): 385~392(in Chinese with English abstract).
- Sun He, Qin Kezhang, Lin Jinxiang, *et al.* 2006. Petrographic and geochemical characteristics of the Tulargen Cu-Ni-Co sulfide Deposit, East Tianshan, Xinjiang, and its tectonic setting[J]. *China Geology*, 33(3): 606~617(in Chinese with English abstract).
- Sun He, Qin Kezhang, Li Jinxiang, *et al.* 2008. 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*, 24(5): 1 079~1 086(in Chinese with English abstract).
- Sun He, Qin Kezhang, Xu Xingwang, *et al.* 2007. Petrological characteristics and copper-nickel ore-forming processes of Early Permian mafic-ultramafic intrusion belts in East Tianshan[J]. *Mineral Deposits*, 26(1): 98~108(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes[A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basin*[C]. *Geol. Soc. Lond Spec. Publ.*, 42: 313~345.
- Tang Dongmei, Qin Kezhang, Sun He, *et al.* 2009a. PGE geochemical characteristics of Tianyu magmatic Cu-Ni deposit: implications for magma evolution and sulfide segregation[J]. *Acta Geological Sinica*, 83(5): 680~695(in Chinese with English abstract).
- Tang Dongmei, Qin Kezhang, Sun He, *et al.* 2009b. 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*, 25(4): 817~831(in Chinese with English abstract).
- Tang Dongmei, Qin Kezhang, Sun He, *et al.* 2012. The role of crustal contamination in the formation of Ni-Cu sulfide deposits in Eastern Tianshan, Xinjiang, Northwest China: Evidence from trace element geochemistry, Re-Os, Sr-Nd, zircon Hf-O, and sulfur isotopes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 145~160.
- Vernon R H. 1984. Microgranitoid enclaves in granites globules of hybrid magma quenched in a plutonic environment[J]. *Nature*, 309: 438~439.
- Watson E B. 1976. Two-liquid partition coefficients: experimental data and geochemical implications[J]. *Contr Mineralogy Petrology*, 56: 119~134.
- White A J R and Chappell B W. 1974. Ultrametamorphism and granitoid genesis[J]. *Tectonophysics*, 43: 7~22.
- White A J R, Chappell B W and Wyborn D. 1991. Enclaves of S-type granites in the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia[A]. Didier J, *et al.* *Enclaves and Granite Petrology, Development in Petrology*[C]. Amsterdam: Elsevier, 493~508.
- Wu liren. 1963. The metallogenic specialisation of mafic-ultramafic rocks, China[J]. *Geoscience*, (1): 31~42(in Chinese).
- Xia Mingzhe, Jiang Changyi, Qian Zhuangzhi, *et al.* 2010. Geochemistry and petrogenesis of Huangshandong intrusion, East Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2 413~2 430(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zuoheng, Mao Jingwen, Du Andao, *et al.* 2008. Re-Os dating of two Cu-Ni sulfide deposits in northern Xinjiang, NW China and its geological significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32: 204~217.
- Zhou Meifu, Leshner C M, Yang, Zhengxi, *et al.* 2004. Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni-Cu(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district, Eastern Xinjiang, Northwestern China: Implication for the tectonic evolution of the Central Asian

orogenic belt[J]. Chemical Geology, 209: 233~257.

附中文参考文献

- 柴凤梅. 2006. 新疆北部三个与岩浆型 Ni-Cu 硫化物矿床有关的镁铁-超镁铁质岩的地球化学特征对比研究[D]. 北京: 中国地质大学.
- 柴凤梅, 张招崇, 毛景文, 等. 2006. 新疆哈密白石泉含镁铁-超镁铁质岩体铂族元素特征[J]. 地球学报, 27(2): 123~128.
- 邓宇峰, 宋谢炎, 颜 炜, 等. 2011. 新疆北天山黄山东含铜镍矿镁铁-超镁铁岩体的岩石成因: 主量元素、微量元素和 Sr-Nd 同位素证据[J]. 地质学报, 85(9): 1435~1451.
- 李甲平, 汪立今, 任 伟, 等. 2010. 新疆东天山天宇、白石泉杂岩体岩石学、矿物学特征对比研究[J]. 地质找矿论丛, 25(2): 134~140.
- 李金祥, 秦克章, 徐兴旺, 等. 2007. 新疆东天山白石泉 Cu-Ni 硫化物矿床杂岩体的地球化学特征及其对矿床成因和构造背景的制约[J]. 矿床地质, 26(1): 43~57.
- 毛启贵, 肖文交, 韩春明, 等. 2006. 新疆东天山白石泉铜镍矿床基性-超基性岩体锆石 U-Pb 同位素年龄、地球化学特征及其对古亚洲洋闭合时限的制约[J]. 岩石学报, 22(1): 153~162.
- 钱壮志, 孙 涛, 汤中立, 等. 2009. 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]. 地质评论, 55(6): 873~883.
- 秦克章, 丁奎首, 许英霞, 等. 2007. 东天山图拉尔根、白石泉铜镍钴矿床钴、镍赋存状态及原岩含矿性研究[J]. 矿床地质, 26(1): 1~14.
- 秦克章, 方同辉, 王书来, 等. 2002. 东天山板块构造分区、演化与成矿地质背景研究[J]. 新疆地质, 20: 302~307.

- 三金柱, 惠卫东, 秦克章, 等. 2007. 新疆哈密图拉尔根全岩矿化岩浆铜-镍-钴矿床地质特征及找矿方向[J]. 矿床地质, 26(3): 307~316.
- 三金柱, 秦克章, 汤中立, 等. 2010. 东天山图拉尔根大型铜镍矿区两个镁铁-超镁铁岩体的锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 26(10): 3027~3035.
- 三金柱, 魏俊瑛. 2009. 新疆哈密市图拉尔根①号杂岩体岩石化学特征[J]. 新疆有色金属, 32(2): 1~3.
- 桑祖南, 周永胜, 何昌荣, 等. 2002. 辉长岩部分熔融实验及其地质意义研究[J]. 地质科学, 37(4): 385~392.
- 孙 赫, 秦克章, 李金祥, 等. 2006. 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, 33(3): 606~617.
- 孙 赫, 秦克章, 李金祥, 等. 2008. 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, 24(05): 1079~1086.
- 孙 赫, 秦克章, 徐兴旺, 等. 2007. 东天山镁铁质-超镁铁质岩带岩石特征及铜镍成矿作用[J]. 矿床地质, 26(1): 98~108.
- 唐冬梅, 秦克章, 孙 赫, 等. 2009a. 东疆天宇岩浆 Cu-Ni 矿床的铂族元素地球化学特征及其对岩浆演化、硫化物熔离的指示[J]. 地质学报, 83(5): 680~695.
- 唐冬梅, 秦克章, 孙 赫, 等. 2009b. 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, 25(4): 817~831.
- 吴利仁. 1963. 论中国基性岩、超基性岩的成矿专属性[J]. 地质科学, (1): 31~42.
- 夏明哲, 姜常义, 钱壮志, 等. 2010. 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, 26(8): 2413~2430.