

doi: 10.12029/gc20170612

王博林, 李文渊, 张照伟, 王亚磊, 尤敏鑫, 钱兵, 张志炳. 2017. 东天山香山中镁铁-超镁铁质岩体岩石学与矿物学特征: 对成岩成矿过程的约束[J]. 中国地质, 44(6): 1207-1233.

Wang Bolin, Li Wenyuan, Zhang Zhaowei, Wang Yalei, You Minxin, Qian Bing, Zhang Zhibing. 2017. Petrological and mineralogical characteristics of the Xiangshanzhong mafic-ultramafic intrusion in eastern Tianshan Mountains: Constrains on rock-forming and ore-forming processes[J]. Geology in China, 44(6): 1207-1233(in Chinese with English abstract).

东天山香山中镁铁-超镁铁质岩体岩石学与矿物学 特征: 对成岩成矿过程的约束

王博林^{1,2} 李文渊¹ 张照伟¹ 王亚磊¹ 尤敏鑫¹ 钱兵¹ 张志炳^{1,2}

(1. 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室 西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 香山中镁铁-超镁铁岩体产于新疆东天山地区的黄山-镜儿泉镁铁-超镁铁岩带。主要的岩石类型为二辉橄榄岩、(含长)单辉橄榄岩、橄榄辉石岩及角闪辉长岩。矿物学特征显示, 岩体造岩矿物的结晶顺序为铬尖晶石→橄榄石→斜方辉石→单斜辉石→斜长石→角闪石。电子探针分析显示, 同一侵入期次中各岩相具有良好的过渡渐变关系, 钻孔剖面上橄榄石含量与颗粒大小、单斜辉石的成分有随深度连续变化的特征, 铬尖晶石则具有良好的Cr→Fe³⁺、Ti的演化趋势, 由此反映岩体的形成主要受结晶分异作用的控制; 含长单辉橄榄岩中橄榄石和单斜辉石成分的突然变化显示岩浆结晶过程中受到了地壳物质阶段性的混染; 模拟计算表明, 橄榄石分离结晶伴随着硫化物的熔离; 钻孔ZK3693深度为295~325 m, 含长单辉橄榄岩中橄榄石、斜长石、单颗粒单斜辉石成分突然性的变化指示在区间内有新鲜的基性程度更高的岩浆注入, 而此区间内矿物的Cu、Ni品位明显高于区间外同一岩相岩体, 说明新鲜岩浆的注入是香山中岩体硫化物富集的重要原因。

关键词: 东天山; 香山; 镁铁-超镁铁岩体; 造岩矿物; 结晶分异; 地壳混染; 岩浆注入

中图分类号: P588.12 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2017)06-1207-27

Petrological and mineralogical characteristics of the Xiangshanzhong mafic-ultramafic intrusion in eastern Tianshan Mountains: Constrains on rock-forming and ore-forming processes

WANG Bolin^{1,2}, LI Wenyuan¹, ZHANG Zhaowei¹, WANG Yalei¹,
YOU Minxin¹, QIAN Bing¹, ZHANG Zhibing^{1,2}

(1. MLR Key Laboratory of Genesis and Exploration of Magmatic Ore Deposits, Xi'an Center of Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. School of Earth Science and Resources, China University of Geoscience, Beijing 100083, China)

Abstract: Mafic-ultramafic rocks in Xiangshan are located in Huangshan-Jingerquan mafic-ultramafic rock zone in east Tianshan

收稿日期: 2016-03-10; 改回日期: 2016-11-30

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项(201511020)和青年自然科学基金(41302052、41402071)联合资助。

作者简介: 王博林, 男, 1991年生, 硕士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业; E-mail: wa2302032@163.com。

Mountains, Xinjiang. The main rock types are ilmenite, (containing feldspar) clinopyroxene peridotite, olivine pyroxenite and hornblende gabbro. According to the mineralogical characteristics, the rock mineral crystallization sequence is in order of chrome spinel, olivine, orthopyroxene, clinopyroxene, plagioclase, and angle amphibole. In the same period, the transition of the lithofacies in each stage of the invasion period has a good transition. The content of olivine in the drilling section and the composition of the particles and the composition of the particles in the drilling section vary with depth. The evolution of Cr \rightarrow Fe³⁺, Ti in picotite is good. According to these features, the formation of the rock mass is mainly controlled by the crystallization differentiation. Abrupt change of olivine and the composition of the olivine in the (feldspar-bearing) clinopyroxene show the existence of crustal mixture in the process of magma crystallization. The simulation results show that the crystallization of olivine was accompanied by the melting of the sulfide. At the depths of 295–325 m in ZK3693 borehole, abrupt change of the composition of (feldspar-bearing) clinopyroxene in the olivine, plagioclase, single grain clino-feldspar and the Al \rightarrow Cr evolution of the Cr spinel indicates that there is a higher basic level of magma injection in the interval. The Cu and Ni grades of the ore in this area are obviously higher than those of the same rock mass which is not in the interval. That injection of fresh magma is an important cause of the sulfide enrichment in Xiangshan.

Key words: East Tianshan Mountains; Xiangshan; mafic-ultramafic rock; rock-forming mineral; crystallization differentiation; crustal contamination; magma injection

About the first author: WANG Bolin, male, born in 1991, master candidate, majors in mineralogy, petrology, petrology and metallogeny; E-mail: wa2302032@163.com.

Fund support: Supported by Public Welfare Industry Scientific Research Projects of Ministry of Land and Resources (No. 201511020); National Natural Science Foundation of China (No. 41302052, No. 41402071).

1 引 言

东天山黄山—镜儿泉镁铁-超镁铁岩带是中国岩浆型铜镍硫化物矿床的重要产出地。目前,在该岩带已发现镁铁-超镁铁岩体 20 余处,大多分布于近东西向的康古尔—黄山断裂两侧,其中的黄山、黄山东、图拉尔根岩体中的镍矿资源量已达大型规模,香山、土墩及圪塔山口等岩体仍有较大的找矿潜力。最近在该岩带以西新发现了白鑫滩和路北两个含矿岩体,显示岩带的西延部分也具有较好找矿前景。岩带及其西延部分的含硫化物镁铁-超镁铁岩体具有相似的岩石组合及地球化学特征(孙赫等,2006,2013;钱壮志等,2009;傅飘儿等,2009;Sun et al.,2013; Tang et al.,2013;王亚磊等,2015),且形成时代都集中在 270~300 Ma(秦克章等,2002;韩宝福等,2004;陈世平等,2005;顾连兴等,2006;三金柱等,2010;王亚磊等,2015)。

香山中岩体产出于黄山—镜儿泉镁铁-超镁铁岩带中。前人对香山中岩体进行了大量研究工作并取得了诸多成果:成岩成矿年龄集中于 278~283 Ma(李德东等,2012);母岩浆为高镁玄武质岩浆,源区为受俯冲带物质影响的亏损地幔(夏明哲,2009;肖庆华等,2010);分离结晶和同化混染作用是导致硫饱和的重要因素(Tang et al.,2013;肖凡等,2013;姜超

等,2014)。这些研究多是基于岩体年代学、岩石地球化学的研究工作,而对于矿物学的系统研究则相对较少。镁铁-超镁铁岩中造岩矿物的结构和成分可反应岩浆房中演化的全过程(包括结晶分异、岩浆混合、同化混染等),对其进行系统研究有利于探讨岩浆的演化过程及导致硫饱和、硫化物富集的原因(张招崇等,2005;吕林素等,2013)。本文以香山中岩体主成矿期不同岩相中的造岩矿物为研究对象,在系统的岩相分带及含矿性特征研究的基础上,重点开展典型矿物的内部显微结构特征、矿物成分组成、粒径变化及矿物颗粒内部成分变化的研究,结合前人岩石学及矿床学方面的研究成果,探讨香山中岩体的岩浆性质、演化过程及导致硫饱和、硫化物富集的原因,丰富矿床的形成过程,并进一步对东天山地区岩浆铜镍矿床的形成机制提供有益的线索。

2 地质背景及岩体特征

东天山位于中亚造山带南缘,以阿其克库都克—沙泉子断裂为界分为两个构造单元,北部为觉罗塔格韧性剪切带,南部为中天山地块(图 1)。黄山—镜儿泉镁铁-超镁铁岩带位于东天山造山带东段的觉罗塔格韧性剪切带内,受康古尔—黄山与苦水两条深大断裂控制,长约 270 km,宽 20~30 km,总体呈

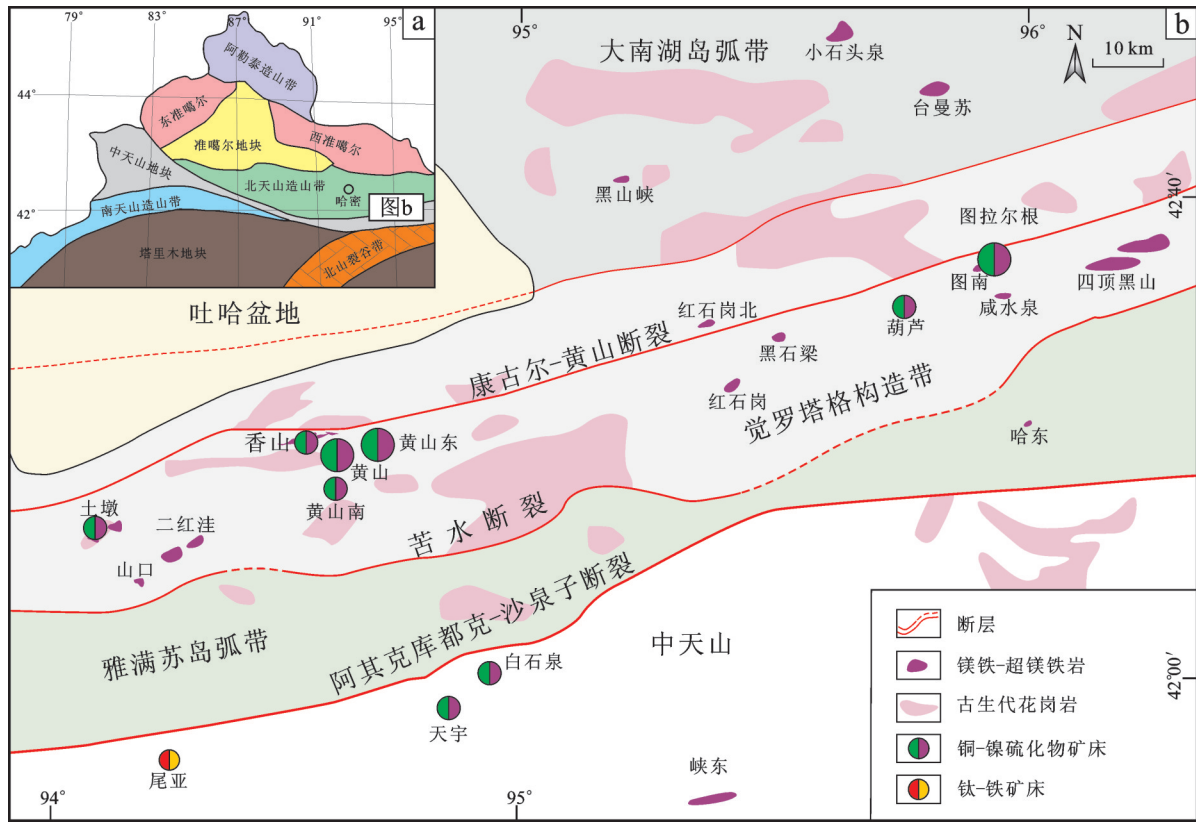


图1 新疆东天山区域地质及镁铁—超镁铁岩体分布简图(据 Sun et al.,2013 修改)

Fig. 1 Geological map showing regional geology and mafic-ultramafic complex distribution in East Tianshan Mountains (modified after Sun et al., 2013)

北东东向延伸。岩带内出露的地层主要为下石炭统雅满苏组(C_{1y})、干墩组(C_{1g})及中石炭统梧桐窝子组(C_{2w})的沉积或火山沉积建造。岩带内的含矿岩体具有规模小、多期多阶段侵位、岩相分带清楚、成群成带出现、普遍发育后期热液成矿作用的特点(顾连兴等,1994;秦克章等,2002)。

香山岩体产于黄山—镜儿泉镁铁—超镁铁岩带西侧,受控于北部香山断裂和南部黄山断裂(图2a);总体走向为北东58°,断续延伸约10 km,宽300~450 m,出露面积约2.8 km²。岩体在平面上总体呈藕节状,形成香山东岩体、香山中岩体和香山西岩体三个横剖面和纵剖面上形态都各异的膨胀体(夏明哲,2009)。香山中岩体是香山杂岩体的中间部分,也是主要含铜镍岩体;其侵入于下石炭统雅满苏组(C_{1y})的云母石英片岩、流纹质凝灰岩、安山质凝灰岩、砾岩及炭质粉砂岩中,与围岩界线清楚;岩体呈北东向展布,延伸约2.5 km,宽50~400 m,平面形态为中部膨大,两侧狭

缩的豌豆荚状(图2b)。横剖面上,近地表岩体向北倾伏,在深度约250 m处开始逐渐转为南侵,且北侧岩体较南侧岩体更陡,倾角可达70°~80°(图2c)。

3 岩石学特征

根据各岩相的穿插关系,香山岩体可划分为3个侵入期次(王玉往等,2009)。第1侵入期次主要为辉长岩相,分布于岩体各个部分,形成一系列近似环状的锥形裂隙带,约占香山中岩体总面积的65%,是香山中岩体的主体。该期次岩石类型以角闪辉长岩为主,其次为蚀变辉长岩以及橄榄辉长岩。第2侵入期次主要为超镁铁岩相,多呈脉状、透镜状分布于香山中岩体第1侵入期次辉长岩相的中部和南部,约占香山中岩体总面积的30%,是香山中岩体主要的赋矿岩相。岩石类型以(含长)单辉橄榄岩、角闪橄榄岩为主,其次为二辉橄榄岩。第3侵入期次主要为钛铁辉长岩,规模很小,仅分布在香山西岩体以及香山中岩体部分地段,呈脉状产于第

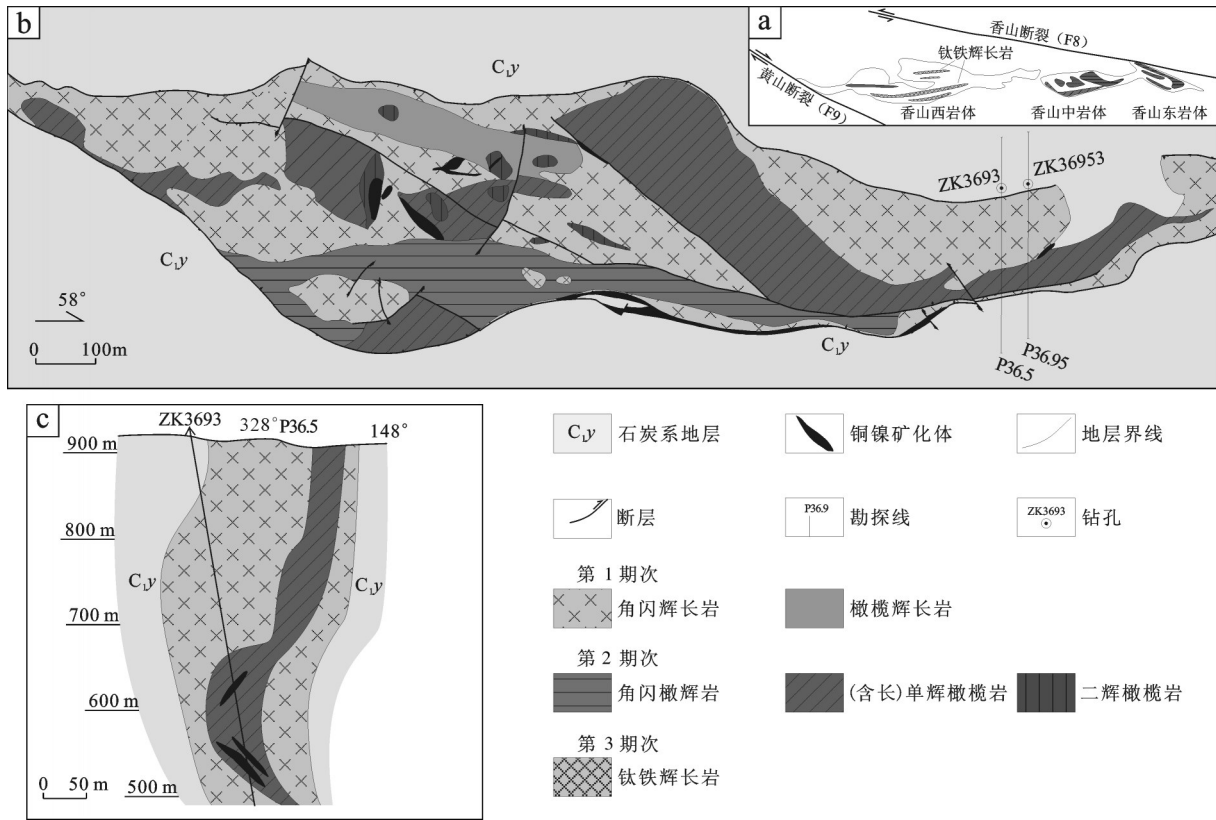


图2 香山中镁铁-超镁铁岩体地质简图(图a据竺国强等(1996)修改)
 Fig. 2 Simplified geological map of Xiangshanzhong mafic-ultramafic intrusion
 (a: modified after Zhu et al.,1996)

1 侵入期次辉长岩中(王玉往等,2006)。

香山中镁铁-超镁铁岩体的岩石具有典型的镁铁-超镁铁质深成岩结构特征。其主要岩石类型特征如下:

二辉橄橄岩: 岩石多为自形-半自形粒状结构、包橄结构、堆晶结构(图3a)、反应边结构, 块状构造, 主要由橄橄石(40%~45%)、辉石(45%~50%)、角闪石(5%~10%)组成, 含少量铬尖晶石, 几乎不含长石。该类岩石蚀变较强, 橄橄石多沿裂理发生蛇纹石化, 有的甚至被蛇纹石完全交代, 仅保留假象; 也有少部分橄橄石发生伊丁石化, 在单偏光下呈褐红色。辉石以单斜辉石为主, 多呈他形充填于橄橄石间隙或与橄橄石共结; 斜方辉石则多以包裹橄橄石的形式存在; 辉石普遍发生纤闪石化、滑石化、绿泥石化蚀变。角闪石多呈他形充填于橄橄石和辉石间隙或呈镶嵌状包裹橄橄石(图3b), 也有少部分形成辉石的反应边。铬尖晶石主要以浑圆状小包体的形式存在于橄橄石和单斜辉石中(图3b), 蚀变较弱。

含长单辉橄橄岩: 岩石呈灰黑色, 半自形粒状结构、包橄结构(图3c)、堆晶结构, 块状构造, 主要由橄橄石(40%~65%)、单斜辉石(35%~50%)、斜长石(5%~15%)和少量普通角闪石、斜方辉石以及铬尖晶石组成; 橄橄石和斜长石含量变化较大, 部分样品橄橄石含量可达80%以上。橄橄石多呈浑圆粒状或半自型粒状, 粒径在0.8~3.2 mm, 表面裂理发育, 沿裂理及边缘常发生不同程度的蛇纹石化并有铁质析出而构成网脉状结构, 蚀变较强常形成橄橄石假象; 橄橄石多被单斜辉石和斜长石包裹形成包橄结构。单斜辉石大多呈他形充填于橄橄石间隙, 也有部分呈短柱状与橄橄石共结(图3d), 粒径在1~3.5 mm, 多发生闪石化和滑石化作用。斜长石多发生钠黝帘石化, 呈他形、半自形短柱状充填于橄橄石和辉石间隙。角闪石大部分充填于橄橄石和辉石间隙中, 少部分构成辉石或橄橄石的反应边。铬尖晶石颗粒较小, 主要以包体的形式存在于橄橄石中。

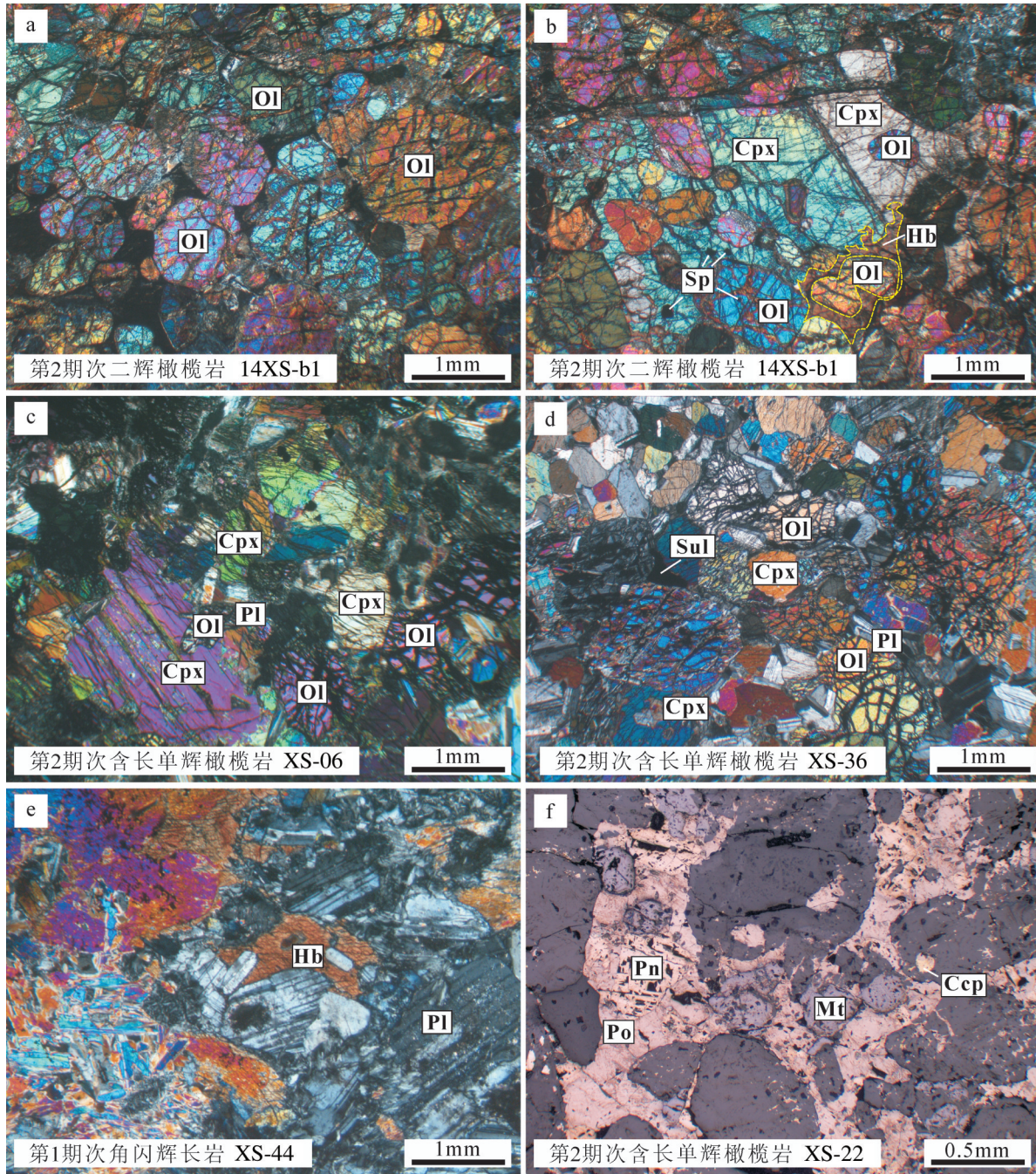


图3 香山中岩体部分岩相镜下特征

a—第2期次二辉橄榄岩, 橄榄石多为混圆粒状, 呈正堆晶结构, 沿裂隙发生了蛇纹石化; b—第2期次二辉橄榄岩, 辉石和角闪石包裹橄榄石; c—第2期次含长单辉橄榄岩, 单斜辉石和斜长石包裹橄榄石; d—第2期次含长单辉橄榄岩, 橄榄石和单斜辉石共生结构, 斜长石和少量硫化物充填于间隙中; e—第1期次角闪辉长岩, 辉石多发生闪石化作用, 角闪石呈他形充填于间隙; f—第2期次含长单辉橄榄岩, 硫化物充填于橄榄石和辉石晶粒间, 呈海绵陨铁结构; a~e 为正交偏光图像; f 为反射光图像; Ol—橄榄石; Cpx—单斜辉石; Sp—尖晶石; Pl—斜长石; Sul—金属硫化物; Hb—角闪石; Pn—镍黄铁矿; Po—磁黄铁矿; Mt—磁铁矿; Ccp—黄铜矿

Fig.3 Microphotographs of the major lithofacies from the Xiangshanzhong mafic-ultramafic intrusion

a—Iherzolite of phase II, olivine cumulus crystals in iherzolite with serpentinization; b—Iherzolite of phase II, olivine embedded in pyroxene and hornblende; c—Plagio-wehrlite of phase II, olivine embedded in clinopyroxene and plagioclase; d—Plagio-wehrlite of phase II, olivine contact with clinopyroxene; e—Bojite of phase I, pyroxene with amphibolization, and hornblende filling the crevasse; f—Plagio-wehrlite of phase II, sideronitic texture of sulfide. a~e—transmitted light (+); f—Transmitted light (-). Ol—Olivine; Cpx—Clinopyroxene; Sp—Spinel; Pl—Plagioclase; Sul—Sulfide; Hb—Hornblende; Pn—Pentlandite; Po—Pyrrhotite; Mt—Magnetite; Ccp—Chalcopyrite

角闪辉长岩: 岩石呈灰绿色, 半自形粒状结构、嵌晶结构、辉长辉绿结构(图 3e), 块状构造, 主要由斜长石(50%~60%)、辉石(25%~35%)、普通角闪石(5%~15%)和少量的楣石、磷灰石组成, 镜下可见少量粒状磁铁矿和钛铁氧化物。斜长石多为板条状, 粒度变化较大, 在 0.4~3.2 mm, 具卡钠复合双晶、聚片双晶, 部分斜长石发生了钠黝帘石化。辉石绝大多数为单斜辉石, 呈短柱状, 粒度多在 1.5~3 mm, 普遍发生了较强烈的闪石化和绿泥石化。角闪石一般为棕色, 分布不均, 多呈他形充填于长石间隙。该岩相受后期构造变形作用影响, 部分变为蚀变辉长岩, 片理化发育。

硫化物主要产于香山中岩体的含长单辉橄橄榄岩、二辉橄橄榄岩以及角闪橄辉岩中, 可见 2%~5% 的不透明矿物(镍黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿)呈星点状或稀疏浸染状充填于橄橄榄石和辉石间隙中; 蚀变程度较高的样品中可见硫化物呈胶结状产出而形成海绵陨铁结构(图 3f)。

4 矿物化学特征

本次研究选取了香山中矿区 36.9 线 ZK3693 钻孔和 36.95 线 ZK36953 钻孔, 按深度的变化进行了系统采样。两个钻孔均穿过香山中第 1 和第 2 侵入期次岩体以及 I 号矿体, 具有代表性。矿物电子探针分析在长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室完成。测试仪器为 JXI-8100 型电子探针, 氧化物测试条件为: 加速电压 15 kV, 束电流为 1.0×10^{-8} A, 束斑直径为 1 μ m, 检测限为 0.01%。

4.1 橄橄榄石成分特征

橄橄榄石电子探针分析结果见表 1。香山中岩体基性程度较高的二辉橄橄榄岩中橄橄榄石 Fo 介于 82.02~83.55, 含长单辉橄橄榄岩中橄橄榄石 Fo 介于 78.55~81.81, 基性程度较低的橄橄榄辉长岩中橄橄榄石 Fo 介于 74.42~75.48, 均属贵橄橄榄石; 香山中岩体橄橄榄石的 Fo 最大值和变化范围与东天山地区其他典型铜镍矿床相近(孙涛等, 2010; 刘艳荣等, 2012; 邓宇峰等, 2012; 毛亚晶等, 2014)。二辉橄橄榄岩与橄橄榄辉长岩中的橄橄榄石 Fo 值与 SiO₂ 含量、Ni 含量呈弱的正相关(图 4a、b), 与 Mn 含量呈弱的负相关(图 4c), 与 Ca 含量关系不明显(图 4d)。橄橄榄石 Fo 与主要元素间良好的相关性说明橄橄榄石应为同一母岩浆结晶

的产物(徐刚等, 2012)。而含长单辉橄橄榄岩中橄橄榄石的 SiO₂ 含量(36.6%~41.0%)和 Ni 含量(255.5×10^{-6} ~ 1949.3×10^{-6})变化范围较大可能与结晶过程中岩浆成分受外界影响而发生变化有关。在钻孔 ZK3693 中橄橄榄石的 Fo 值和 MgO 含量随深度的增加有先增加后减小的趋势; 而 Ni 含量随深度的变化并无明显变化规律, 但同一样品中 Ni 含量的变化较大, 差值最大可达 1250×10^{-6} 。

4.2 辉石成分特征

香山中岩体的辉石主要为斜方辉石(Opx)和单斜辉石(Cpx)。辉石电子探针分析结果见表 2、表 3。斜方辉石的 En 变化范围为 76.9~85.0, Fs 变化范围为 13.1~21.6, En-Fs-Wo 图解(图 5)显示斜方辉石均为古铜辉石, 且二辉橄橄榄岩中斜方辉石的 En 普遍大于含长单辉橄橄榄岩中的斜方辉石。

角闪辉长岩中单斜辉石的 En 变化范围为 41.5~42.4, Wo 变化范围为 28.3~28.6, 属普通辉石(图 5)。含长单辉橄橄榄岩与二辉橄橄榄岩中单斜辉石的 En 变化范围为 44.4~53.3, Wo 变化范围为 36.5~48.4, 属透辉石-顽透辉石(图 5)。角闪辉长岩中单斜辉石具有最低的 Mg[#](75.2~75.7)与 Cr₂O₃ 含量(<0.1%), 二辉橄橄榄岩中单斜辉石具有较高的 Mg[#](88.9~92.6)与 Cr₂O₃ 含量(0.6%~1.07%), 含长单辉橄橄榄岩中单斜辉石的 Mg[#](83.5~91.4)与 Cr₂O₃ 含量(0.3%~1.2%)则变化范围较大。香山中岩体的辉石与新疆北部造山后伸展环境下的镁铁-超镁铁质杂岩中的辉石具有相似的成分特征(顾连兴等, 1994; 柴凤梅, 2006; 刘艳荣等, 2012)。

含长单辉橄橄榄岩中单斜辉石的单颗粒扫描面分析结果显示(图 6), 单颗粒单斜辉石由核部到边部并不是连续变化而是存在突变的, 且变化范围较大。在样品 XS-13 中, 单颗粒单斜辉石的 Mg[#]为 83.74~87.07, 差值达 3.33; Cr₂O₃ 含量为 0.53%~0.97%, 差值达 0.44%; CaO 含量为 19.13%~22.45%, 差值达 3.32%。相对于 Mg[#]、Cr₂O₃ 含量以及 CaO 含量的变化, Al₂O₃ 含量的变化则小很多。

4.3 斜长石成分特征

斜长石电子探针分析结果见表 4。含长单辉橄橄榄岩中的斜长石 An 在 74.5~82.6, 为培长石, 角闪辉长岩中的斜长石 An 在 47.4~52.1, 为中长石-拉长石(图 7)。

表1 香山中岩体橄榄石主要氧化物成分(%)及Ni含量(10⁻⁶)
Table 1 Major oxide (%) and Ni (10⁻⁶) content of olivine from the Xiangshanzhong intrusion

样号	岩性	深度	产状	点位	FeO	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	MgO	MnO	CaO	NiO	Total	Fo	Ni	
XS-06-31	含长单辉橄榄岩	277 m	被辉石包裹	核部	18.44	39.26	0.06	41.70	0.34	0.05	0.17	100.01	80.11	1296.90	
XS-06-32				边部	18.29	38.15	0.07	42.33	0.24	0.01	0.12	99.32	80.48	966.78	
XS-06-43			被辉石包裹	核部	18.83	41.02	0.04	41.66	0.31	-	0.24	102.13	79.76	1847.10	
XS-06-45				边部	18.09	39.97	0.01	41.70	0.34	0.02	0.24	100.41	80.42	1886.40	
XS-06-69			被辉石包裹		核部	18.60	36.64	0.04	42.38	0.23	0.02	0.16	98.14	80.23	1241.88
XS-06-70					边部	18.09	38.05	-	41.99	0.29	0.04	0.20	98.71	80.53	1595.58
XS-06-73			被辉石包裹			18.43	40.78	-	42.53	0.27	0.01	0.19	102.36	80.44	1461.96
XS-06-93					核部	18.73	38.77	0.17	42.46	0.21	0.00	0.21	100.60	80.16	1619.16
XS-06-94			被辉石包裹		边部	18.11	40.07	0.01	42.04	0.35	-	0.11	100.79	80.53	896.04
XS-07-8					279 m	被辉石包裹	核部	19.33	40.23	0.08	41.50	0.30	0.05	0.16	101.70
XS-07-9	边部	19.13	40.09	-			40.57	0.31	0.01	0.25	100.44	79.07	1988.58		
XS-09-1	含长单辉橄榄岩	296 m			19.63	40.40	0.01	41.51	0.28	-	0.07	101.94	79.02	573.78	
XS-09-10				被硫化物包裹	核部	19.44	39.09	-	41.22	0.34	-	0.08	100.26	79.07	628.80
XS-09-12		被硫化物包裹	核部	19.40	37.72	0.10	41.48	0.29	-	0.19	99.26	79.21	1501.26		
XS-09-17		被硫化物包裹		19.66	38.92	-	40.92	0.33	0.02	0.09	99.97	78.76	707.40		
XS-09-2		被辉石包裹		19.03	39.27	0.06	41.53	0.38	-	0.07	100.38	79.54	510.90		
XS-09-7		被硫化物包裹	核部		19.75	36.81	-	41.81	0.33	0.04	0.13	98.87	79.05	1029.66	
XS-09-8		边部		19.90	39.87	0.03	40.97	0.23	0.01	0.11	101.15	78.58	888.18		
XS-10-1		303 m			18.70	37.87	0.01	42.55	0.27	0.05	0.15	99.65	80.21	1163.28	
XS-10-10				被辉石包裹	核部	18.96	37.37	0.02	42.68	0.40	0.07	0.20	99.81	80.05	1548.42
XS-10-11		被辉石包裹		边部	18.93	36.29	0.08	42.32	0.37	0.02	0.12	98.23	79.93	943.20	
XS-10-12	核部			19.01	40.52	0.02	42.39	0.32	0.02	0.14	102.42	79.89	1061.10		
XS-10-13	303 m		边部	18.40	40.26	0.01	42.35	0.31	0.05	0.15	101.54	80.39	1163.28		
XS-10-2			被辉石包裹	核部	18.54	37.59	-	42.27	0.32	0.03	0.05	98.90	80.24	385.14	
XS-10-21	被硫化物包裹		核部	18.26	40.23	-	41.85	0.31	0.04	0.14	100.93	80.33	1100.40		
XS-10-22			边部	18.45	39.62	0.01	42.41	0.30	-	0.16	101.04	80.37	1273.32		
XS-11-1	含长单辉橄榄岩	309 m			18.39	38.37	0.04	41.20	0.18	0.03	0.15	98.45	79.97	1194.72	
XS-11-11				被硫化物包裹	核部	18.32	36.38	-	42.24	0.32	0.03	0.25	97.65	80.43	1949.28
XS-11-16		被硫化物包裹		18.15	40.28	-	41.42	0.25	0.07	0.09	100.32	80.26	699.54		
XS-11-18		被硫化物包裹	边部	17.69	39.86	0.04	40.83	0.30	0.03	0.05	98.85	80.44	377.28		
XS-11-19		被硫化物包裹	核部		17.62	40.61	-	41.58	0.29	-	0.20	100.36	80.78	1572.00	
XS-11-2				边部	18.36	39.46	-	41.74	0.25	0.01	0.22	100.12	80.20	1729.20	
XS-11-20		被硫化物包裹	边部	17.96	40.28	0.01	41.62	0.30	0.01	0.17	100.53	80.50	1312.62		
XS-11-21		被硫化物包裹	核部		18.37	40.14	0.01	42.00	0.29	-	0.12	101.02	80.29	919.62	
XS-11-6				边部	17.97	39.29	-	42.02	0.27	-	0.18	99.80	80.64	1430.52	
XS-11-7		被硫化物包裹		18.35	39.14	-	41.84	0.19	-	0.11	99.64	80.24	825.30		
XS-11-8	被硫化物包裹		18.14	38.03	-	41.66	0.24	0.03	0.15	98.27	80.36	1155.42			
XS-11-9	被硫化物包裹		18.26	38.14	0.05	41.63	0.28	0.03	0.15	98.57	80.24	1210.44			
XS-12-12	319 m		被辉石包裹	核部	18.16	39.71	-	42.21	0.31	-	0.24	100.66	80.55	1902.12	
XS-12-13				边部	18.10	39.67	-	41.96	0.33	0.00	0.22	100.32	80.51	1760.64	
XS-12-19		被硫化物包裹			18.04	38.00	0.06	41.16	0.32	0.01	0.10	97.73	80.26	746.70	
XS-12-20				边部	18.00	38.43	-	42.39	0.19	0.01	0.20	99.30	80.76	1587.72	
XS-12-21		被硫化物包裹	核部		17.80	37.95	0.05	42.43	0.33	0.04	0.17	98.92	80.94	1336.20	
XS-12-22				边部	18.55	39.57	0.02	42.11	0.28	-	0.17	100.73	80.18	1344.06	
XS-12-23		被硫化物包裹	边部		18.27	39.23	-	42.24	0.32	-	0.08	100.14	80.46	628.80	
XS-12-24				核部	17.92	40.60	0.02	42.03	0.33	0.01	0.09	101.08	80.69	707.40	
XS-12-25		被硫化物包裹	边部	18.35	39.38	-	42.02	0.24	-	0.14	100.21	80.32	1061.10		
XS-12-26		含长单辉橄榄岩			核部	18.16	40.13	0.01	42.36	0.32	0.01	0.24	101.29	80.60	1847.10
XS-12-27	被硫化物包裹				边部	17.74	40.14	-	41.99	0.25	0.02	0.14	100.42	80.84	1123.98
XS-12-28	324 m		被辉石包裹	核部	17.81	39.70	0.05	42.21	0.31	-	0.18	100.29	80.85	1446.24	
XS-13-19				边部	18.36	40.84	-	42.48	0.31	0.04	0.15	102.22	80.48	1179.00	
XS-13-20	被辉石包裹				18.18	38.64	0.02	42.40	0.23	0.06	0.11	99.69	80.60	848.88	
XS-13-44				边部	16.94	39.70	-	42.75	0.30	-	0.13	99.82	81.81	1053.24	
XS-13-46	橄榄石堆晶			核部	17.23	38.71	0.01	43.27	0.31	0.00	0.05	99.62	81.73	393.00	
XS-13-47				边部	17.10	39.12	0.03	43.12	0.25	0.01	0.14	99.83	81.79	1068.96	
XS-13-48	橄榄石堆晶			核部	17.68	37.32	0.05	43.25	0.27	0.06	0.13	98.82	81.34	1006.08	
XS-13-49				边部	17.06	37.63	0.02	43.45	0.26	0.04	0.09	98.69	81.94	683.82	
XS-13-58	被辉石包裹			核部	17.44	38.96	0.05	42.87	0.25	0.05	0.05	99.75	81.41	353.70	
XS-13-60				边部	17.32	40.78	0.01	42.74	0.28	0.01	0.02	101.23	81.47	157.20	

续表1

样号	岩性	深度	产状	点位	FeO	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	MgO	MnO	CaO	NiO	Total	Fo	Ni
XS-13-61			被辉石包裹	核部	17.61	36.86	0.08	43.21	0.31	0.05	0.02	98.20	81.39	172.92
XS-13-63				边部	17.28	37.52	-	42.85	0.20	0.05	0.05	97.96	81.54	385.14
XS-14-11		320 m	被辉石包裹	核部	17.76	40.02	0.01	41.91	0.32	0.06	0.14	100.25	80.79	1108.26
XS-14-12				边部	18.38	38.77	0.01	40.99	0.22	0.05	0.14	98.62	79.89	1068.96
XS-14-3			被硫化物包裹	核部	18.17	39.57	0.04	41.46	0.28	0.04	0.21	99.80	80.26	1666.32
XS-14-4				边部	17.88	39.85	-	41.26	0.32	0.00	0.06	99.56	80.43	432.30
XS-15-1		331 m			18.04	37.50	-	41.85	0.26	0.07	0.19	97.95	80.52	1485.54
XS-15-10			被辉石包裹	核部	18.14	38.52	-	41.86	0.27	0.02	0.14	99.04	80.43	1108.26
XS-15-11				边部	17.87	37.94	0.02	42.04	0.26	0.01	0.12	98.30	80.74	958.92
XS-15-12			被辉石包裹	核部	18.09	39.54	0.05	40.91	0.21	0.02	0.10	98.99	80.12	770.28
XS-15-13				边部	17.90	39.10	-	41.26	0.26	0.06	0.11	98.84	80.42	856.74
XS-15-5			橄榄石堆晶	边部	17.96	37.15	0.03	41.89	0.29	0.06	0.18	97.59	80.60	1406.94
XS-15-6	含长单辉橄榄岩	331 m		核部	18.06	37.99	0.02	41.80	0.24	0.06	0.14	98.37	80.48	1084.68
XS-15-7			橄榄石堆晶	核部	18.01	39.81	0.03	41.94	0.31	0.05	0.13	100.30	80.58	1045.38
XS-15-8				边部	18.36	37.84	-	41.85	0.34	0.06	0.21	98.74	80.24	1674.18
XS-16-1		334 m	被辉石包裹	核部	17.95	39.18	-	41.89	0.36	0.02	0.21	99.66	80.61	1627.02
XS-16-2				边部	17.94	37.89	0.02	42.13	0.31	0.09	0.22	98.74	80.71	1705.62
XS-16-7			被辉石包裹	核部	18.41	39.27	0.04	41.37	0.38	0.04	0.20	99.81	80.01	1556.28
XS-16-9				边部	18.22	39.41	0.02	41.39	0.29	0.05	0.20	99.69	80.19	1556.28
XS-17-5		336 m	被辉石包裹	核部	19.10	40.02	0.02	40.72	0.32	-	0.13	100.46	79.16	1021.80
XS-17-6				边部	19.84	40.31	0.00	41.28	0.31	0.01	0.15	102.05	78.75	1210.44
XS-17-8			被辉石包裹		19.75	39.63	0.01	40.61	0.30	0.03	0.09	100.62	78.55	668.10
XS-33-1			被辉石包裹	核部	17.81	39.26	0.03	42.84	0.36	0.03	0.06	100.43	81.08	448.02
XS-33-2				边部	17.34	40.23	0.01	43.05	0.23	0.02	0.06	101.06	81.56	448.02
XS-36-1					19.49	38.92	-	40.90	0.30	0.04	0.14	99.92	78.90	1116.12
XS-36-2					19.29	37.63	-	40.69	0.33	0.04	0.13	98.18	78.98	1029.66
XS-36-3					17.80	40.44	0.04	42.45	0.25	0.04	0.13	101.16	80.95	1029.66
XS-36-9					17.44	40.77	0.03	43.10	0.21	0.03	0.12	101.79	81.49	903.90
XH1-2-1	辉橄岩				16.79	39.56	0.00	43.00	0.21	0.06	0.29	99.95	82.02	2279.40
XH1-2-2					16.38	39.62	0.04	43.25	0.33	0.07	0.17	99.95	82.47	1336.20
XH1-2-1					15.82	40.52	0.00	43.61	0.30	0.05	0.03	100.35	83.08	235.80
XH1-2-5					15.88	40.53	0.02	43.74	0.26	0.08	0.13	100.70	83.07	1021.80
Xh1-1-2					16.15	39.65	0.00	43.72	0.19	0.08	0.16	100.01	82.83	1257.60
Xh1-1-3	辉橄岩				15.82	39.93	0.00	43.62	0.28	0.06	0.18	100.01	83.09	1414.80
Xh1-1-4					15.09	40.37	0.00	43.02	0.28	0.12	0.14	99.23	83.55	1100.40
Xh1-1-5					16.15	39.93	0.00	43.91	0.18	0.03	0.14	100.39	82.89	1100.40
XZ-3-1	橄辉岩				21.97	39.26	-	37.70	0.33	0.08	0.03	99.45	75.35	235.80
XZ-3-2					22.24	39.34	0.02	38.11	0.37	0.03	0.08	100.22	75.33	628.80
XZ-3-3					22.22	39.13	-	37.62	0.39	0.06	0.08	99.59	75.10	628.80
XZ-3-5					22.86	39.46	-	37.33	0.34	0.01	0.07	100.12	74.42	550.20
XZ-3-7					20.36	37.06	6.69	35.18	0.27	0.21	0.01	100.01	75.48	78.60
XZ-3-8					22.94	39.30	-	37.74	0.34	0.04	0.09	100.46	74.56	707.40

注: XH、Xh数据引自夏明哲,2009; XZ数据引自姜超等,2014。

斜长石的 SiO₂ 含量介于 46.1%~56.7%, CaO 含量介于 9.7%~17.0%, Al₂O₃ 含量介于 27.6%~33.7%, Na₂O 含量介于 2.0%~5.9%。角闪辉长岩中斜长石的 CaO 含量、Al₂O₃ 含量明显低于含长单辉橄榄岩中的斜长石, 而 Na₂O 含量、SiO₂ 含量则明显高于后者, 反映出斜长石遵循岩浆结晶分异的演化规律。单颗粒斜长石成分总体变化较小, 并未见明显的环带特征, 反映出在斜长石结晶时温度、压力以及岩浆的成分较稳定(图 8)。

4.4 角闪石成分特征

角闪石电子探针分析结果见表 5。香山中岩体的角闪石 Ca_B≥1.5, (Na+K)_A≥0.5, 属钙角闪石。根据最新的角闪石命名规则(Leake et al.,1997,2003),

香山中岩体的角闪石为韭闪石和钛闪石, 个别为浅闪石(图 9)。角闪石的化学成分显示出相对富 MgO (13.06%~16.78%)、CaO(9.7%~11.7%) 而贫 K₂O (0.35%~0.62%)、Na₂O(2.06%~3.02%) 的特征; 同时 TiO₂ 含量(0.50%~4.82%)变化较大, 单个样品(XS-06、XS-09)不同的角闪石 TiO₂ 含量差值可达 3%以上, 且与早期结晶的橄榄石类和辉石类矿物相比, 角闪石的 TiO₂ 含量有明显增加的趋势。

4.5 铬尖晶石成分特征

铬尖晶石电子探针分析结果见表 6。香山中岩体铬尖晶石具有相对富 Fe、Ti、Al 贫 Cr、Mg 的特征 (FeO_T 为 32.4%~50.6%, TiO₂ 为 0.70%~12.0%, Al₂O₃ 为 13.4%~21.3%, Cr₂O₃ 为 19.7%~36.9%, MgO 为

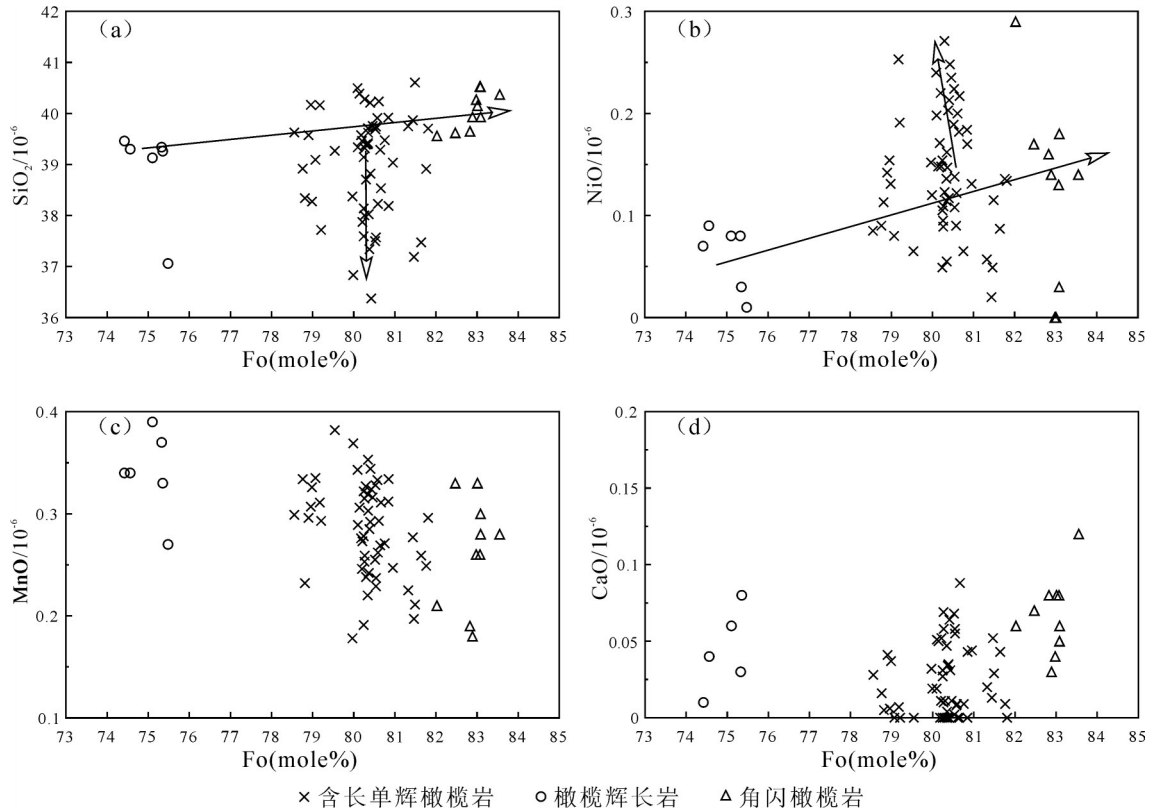


图4 香山中岩体橄榄石成分相关性图(Δ数据引自夏明哲,2009;○数据引自姜超等,2014)

Fig.4 Compositional correlation diagrams of olivine in Xiangshanzhong mafic-ultramafic intrusion (Δ data after Xia, 2009; data after Jiang Chao et al., 2014)

0.6%~8.7%); 其 $Cr^{\#}$ 为46.6~59.3, 与东天山地区其他典型铜镍矿床铬尖晶石的 $Cr^{\#}$ 相近(刘民武,2003;冯宏业等,2014;), 明显低于金川和喀拉通克矿床中铬尖晶石的 $Cr^{\#}$ (汤中立,1998;刘民武,2003), 高于夏日哈木矿床中铬尖晶石的 $Cr^{\#}$ (Li et al.,2015)。在尖晶石组成判别图(图10)中铬尖晶石几乎都落在大陆镁铁质侵入岩区铬尖晶石的组成范围内。

5 讨论

5.1 矿物结晶条件

对矿物形成温度的估算大多是基于岩石相平衡原理, 通过大量的实验数据与结论来推算得出的。

铬尖晶石和橄榄石作为最先结晶的矿物, 其结晶温度可近似代表岩浆结晶的初始温度。根据Fe-Mg在共生橄榄石和尖晶石中的平衡关系, 得出橄榄石开始结晶的温度: $T(^{\circ}C) = (4250Cr^{\#} + 1343) / (\ln K_D^0 + 1.825Cr^{\#} + 0.571) - 273$ (Fabriès,1979), 其中 $Cr^{\#} = Cr / (Cr + Al)$; $\ln K_D^0 = 0.34 + 1.06(Cr^{\#})^2$, 由此方程式

计算出橄榄石结晶的初始温度为1360~1393 $^{\circ}C$, 高于全球软流圈地幔温度(软流圈地幔温度1280~1350 $^{\circ}C$)(McKenzie et al.,1988), 与现代热点的温度相当。

徐义刚(1993)利用Bertrand et al.(1985)提出并被广泛使用的二辉石温度计推导出了Ca单斜辉石经验温度计: $T(^{\circ}C) = 1575 + 288.64 \times \ln[1 - Ca / (1 - Na)]_{Cpx}$, 由此方程式计算出香山中岩体单斜辉石的结晶温度为860~1227 $^{\circ}C$; 而根据邓晋福(1987)修正过的单斜辉石温度计方程式: $T(^{\circ}C) = 2258.55 - 22.217 \times (Ca / Ca + Mg + Fe^{2+})_{Cpx} + 11 \times \omega Al_2O_3$, 计算得到的结晶温度为981~1212 $^{\circ}C$, 不同的计算方法得到的单斜辉石结晶温度跨度较大, 但范围相似, 因此, 计算结果可近似代表单斜辉石的结晶温度。

根据火成岩中角闪石Al含量与平衡压力之间良好的线性关系, 前人总结出多个钙角闪石全铝压力计方程式, 根据 $p_{H286} = (-3.92 + 5.03Al^I)$ kbar (Hammarstrom et al.,1986)、 $p_{H87} = (-4.76 + 5.64 Al^I)$

续表2

样号	XS-13										XS-13(单颗粒辉石扫描分析)										XS-14																																							
	岩性										含长单辉橄辉岩																																																	
深度/m	324.00										324.00										320.00																																							
Na ₂ O	0.30	0.37	0.39	0.43	0.39	0.34	0.34	0.26	0.28	0.43	0.49	0.34	0.41	0.32	0.31	0.19	0.30	0.33	0.46	0.32	0.30	0.37	0.39	0.43	0.39	0.34	0.34	0.26	0.28	0.43	0.49	0.34	0.41	0.32	0.31	0.19	0.30	0.33	0.46	0.32	0.30	0.37	0.39	0.43	0.39	0.34	0.34	0.26	0.28	0.43	0.49	0.34	0.41	0.32	0.31	0.19	0.30	0.33	0.46	0.32
FeO	5.74	4.90	5.09	5.41	4.39	5.26	4.84	4.39	5.05	4.52	5.20	5.75	4.85	5.19	5.45	5.22	5.41	5.22	5.33	4.48	5.74	4.90	5.09	5.41	4.39	5.26	4.84	4.39	5.05	4.52	5.20	5.75	4.85	5.19	5.45	5.22	5.41	5.22	5.33	4.48	5.74	4.90	5.09	5.41	4.39	5.26	4.84	4.39	5.05	4.52	5.20	5.75	4.85	5.19	5.45	5.22	5.41	5.22	5.33	4.48
SiO ₂	51.07	51.66	51.24	53.37	50.93	52.50	53.19	52.10	52.80	51.23	52.30	52.41	52.41	53.57	53.29	53.78	53.35	53.24	52.64	52.45	51.07	51.66	51.24	53.37	50.93	52.50	53.19	52.10	52.80	51.23	52.30	52.41	52.41	53.57	53.29	53.78	53.35	53.24	52.64	52.45	51.07	51.66	51.24	53.37	50.93	52.50	53.19	52.10	52.80	51.23	52.30	52.41	52.41	53.57	53.29	53.78	53.35	53.24	52.64	52.45
Cr ₂ O ₃	0.65	0.59	0.47	0.68	0.87	0.58	0.50	0.97	0.92	0.90	0.93	0.79	0.78	0.55	0.76	0.59	0.53	0.82	0.62	1.00	0.65	0.59	0.47	0.68	0.87	0.58	0.50	0.97	0.92	0.90	0.93	0.79	0.78	0.55	0.76	0.59	0.53	0.82	0.62	1.00	0.65	0.59	0.47	0.68	0.87	0.58	0.50	0.97	0.92	0.90	0.93	0.79	0.78	0.55	0.76	0.59	0.53	0.82	0.62	1.00
MgO	18.18	15.62	15.74	16.05	15.80	15.81	16.80	16.38	17.77	15.10	15.03	17.05	15.34	16.54	17.06	17.22	16.88	16.93	16.57	15.26	18.18	15.62	15.74	16.05	15.80	15.81	16.80	16.38	17.77	15.10	15.03	17.05	15.34	16.54	17.06	17.22	16.88	16.93	16.57	15.26	18.18	15.62	15.74	16.05	15.80	15.81	16.80	16.38	17.77	15.10	15.03	17.05	15.34	16.54	17.06	17.22	16.88	16.93	16.57	15.26
MnO	0.16	0.15	0.22	0.16	0.20	0.19	0.13	0.11	0.19	0.17	0.16	0.16	0.12	0.17	0.19	0.09	0.24	0.11	0.17	0.15	0.16	0.15	0.22	0.16	0.20	0.19	0.13	0.11	0.19	0.17	0.16	0.16	0.12	0.17	0.19	0.09	0.24	0.11	0.17	0.15	0.16	0.15	0.22	0.16	0.20	0.19	0.13	0.11	0.19	0.17	0.16	0.16	0.12	0.17	0.19	0.09	0.24	0.11	0.17	0.15
CaO	19.09	22.48	22.10	21.48	22.35	21.84	21.30	20.54	17.26	21.43	21.47	19.13	22.45	20.41	19.87	20.41	20.61	20.61	20.44	22.01	19.09	22.48	22.10	21.48	22.35	21.84	21.30	20.54	17.26	21.43	21.47	19.13	22.45	20.41	19.87	20.41	20.61	20.61	20.44	22.01	19.09	22.48	22.10	21.48	22.35	21.84	21.30	20.54	17.26	21.43	21.47	19.13	22.45	20.41	19.87	20.41	20.61	20.61	20.44	22.01
Al ₂ O ₃	2.91	3.01	3.11	2.39	2.96	3.24	2.64	3.19	3.16	3.27	3.29	3.32	3.17	2.86	2.89	2.78	2.87	2.67	3.09	3.53	2.91	3.01	3.11	2.39	2.96	3.24	2.64	3.19	3.16	3.27	3.29	3.32	3.17	2.86	2.89	2.78	2.87	2.67	3.09	3.53	2.91	3.01	3.11	2.39	2.96	3.24	2.64	3.19	3.16	3.27	3.29	3.32	3.17	2.86	2.89	2.78	2.87	2.67	3.09	3.53
TiO ₂	0.42	0.73	0.75	0.51	0.40	0.75	0.39	0.38	0.34	0.57	0.47	0.41	0.46	0.37	0.38	0.31	0.39	0.30	0.56	0.41	0.42	0.73	0.75	0.51	0.40	0.75	0.39	0.38	0.34	0.57	0.47	0.41	0.46	0.37	0.38	0.31	0.39	0.30	0.56	0.41	0.42	0.73	0.75	0.51	0.40	0.75	0.39	0.38	0.34	0.57	0.47	0.41	0.46	0.37	0.38	0.31	0.39	0.30	0.56	0.41
Total	98.55	99.55	99.13	100.48	98.37	100.49	100.14	98.35	97.77	97.67	99.35	99.37	100.02	100.06	100.20	100.68	100.59	100.26	99.90	99.65	98.55	99.55	99.13	100.48	98.37	100.49	100.14	98.35	97.77	97.67	99.35	99.37	100.02	100.06	100.20	100.68	100.59	100.26	99.90	99.65	98.55	99.55	99.13	100.48	98.37	100.49	100.14	98.35	97.77	97.67	99.35	99.37	100.02	100.06	100.20	100.68	100.59	100.26	99.90	99.65
6个氧为基准计算的阳离子																																																												
Na(M2)	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02
Fe ³⁺	0.07	0.05	0.06	0.01	0.05	0.02	0.01	-	-	0.01	-	0.00	0.01	-	-	-	0.00	0.01	-	0.07	0.05	0.06	0.01	0.05	0.02	0.01	-	-	0.01	-	0.00	0.01	-	-	0.00	0.01	-	0.07	0.05	0.06	0.01	0.05	0.02	0.01	-	-	0.01	-	0.00	0.01	-	-	0.00	0.01	-					
Fe ²⁺	0.11	0.10	0.10	0.16	0.08	0.14	0.14	0.14	0.16	0.13	0.16	0.17	0.13	0.16	0.17	0.16	0.16	0.16	0.14	0.11	0.10	0.10	0.16	0.08	0.14	0.14	0.14	0.16	0.13	0.16	0.17	0.13	0.16	0.17	0.16	0.16	0.16	0.14	0.11	0.10	0.10	0.16	0.08	0.14	0.14	0.14	0.16	0.13	0.16	0.17	0.13	0.16	0.17	0.16	0.16	0.16	0.14			
Si(T)	1.88	1.90	1.89	1.95	1.89	1.92	1.94	1.94	1.97	1.92	1.93	1.93	1.92	1.96	1.94	1.95	1.94	1.94	1.93	1.88	1.90	1.89	1.95	1.89	1.92	1.94	1.94	1.97	1.92	1.93	1.93	1.92	1.96	1.94	1.95	1.94	1.94	1.93	1.88	1.90	1.89	1.95	1.89	1.92	1.94	1.94	1.97	1.92	1.93	1.93	1.92	1.96	1.94	1.95	1.94	1.94	1.93			
Cr(M1)	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	
Mg(M1+M2)	1.00	0.86	0.87	0.87	0.88	0.86	0.91	0.91	0.99	0.85	0.83	0.93	0.84	0.90	0.93	0.93	0.92	0.92	0.84	1.00	0.86	0.87	0.87	0.88	0.86	0.91	0.91	0.99	0.85	0.83	0.93	0.84	0.90	0.93	0.93	0.92	0.92	0.84	1.00	0.86	0.87	0.87	0.88	0.86	0.91	0.91	0.99	0.85	0.83	0.93	0.84	0.90	0.93	0.93	0.92	0.92	0.92	0.84		
Mn(M2)	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	
Ca(M2)	0.75	0.89	0.88	0.84	0.89	0.85	0.83	0.82	0.69	0.86	0.85	0.75	0.88	0.80	0.78	0.79	0.80	0.80	0.87	0.75	0.89	0.88	0.84	0.89	0.85	0.83	0.82	0.69	0.86	0.85	0.75	0.88	0.80	0.78	0.79	0.80	0.80	0.87	0.75	0.89	0.88	0.84	0.89	0.85	0.83	0.82	0.69	0.86	0.85	0.75	0.88	0.80	0.78	0.79	0.80	0.80	0.87			
Ti(M1)	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
A ^{IV} (T)	0.12	0.10	0.11	0.05	0.11	0.08	0.06	0.06	0.03	0.08	0.07	0.07	0.08	0.04	0.06	0.05	0.06	0.07	0.07	0.12	0.10	0.11	0.05	0.11	0.08	0.06	0.06	0.03	0.08	0.07	0.07	0.08	0.04	0.06	0.05	0.06	0.07	0.07	0.12	0.10	0.11	0.05	0.11	0.08	0.06	0.06	0.03	0.08	0.07	0.07	0.08	0.04	0.06	0.05	0.06	0.07	0.07			
A ^{IV} (M1)	0.01	0.03	0.03	0.05	0.02	0.06	0.05	0.08	0.10	0.07	0.08	0.07	0.06	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.09	0.01	0.03	0.03	0.05	0.02	0.06	0.05	0.08	0.10	0.07	0.08	0.07	0.06	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06	0.09	0.01	0.03	0.03	0.05	0.02	0.06	0.05	0.08	0.10	0.07	0.08	0.07	0.06	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06	0.09			
En	51.77	45.25	45.66	46.50	46.03	45.89	48.25	48.75	53.84	45.72	45.04	50.11	44.88	48.48	49.60	49.46	48.85	48.39	45.43	51.77	45.25	45.66	46.50	46.03																																				

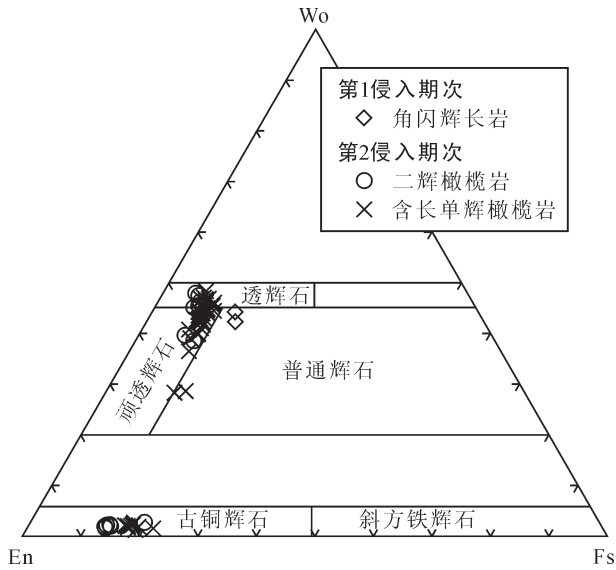


图5 香山中岩体辉石 En-Fs-Wo 判别图
(○数据引自 Tang et al.,2013)

Fig.5 En-Fs-Wo diagrams of pyroxene in Xiangshanzhong mafic-ultramafic intrusion (○ data from Tang et al., 2013)

kbar (Hollister et al.,1987)、 $p_{S92}=(-3.01+4.76 Al^I)$ kbar (Schmidt,1992) 计算得到角闪石结晶压力分别为 5.1~7.1 kbar、5.8~7.6 kbar、5.9~7.4 kbar, 不同的计算方法得出的结果相近, 可近似代表岩浆结晶的压力。由此推断岩浆在深部岩浆房结晶的温度介于 860~1393°C, 结晶深度约 17~25 km(按 1 kbar \approx 3.3 km 计算), 即造岩矿物在地壳中结晶。

5.2 岩浆来源及岩浆性质

5.2.1 岩浆源区

香山中岩体的角闪石 Si/(Si+Al+Ti) 比值为

0.688~0.766, Al₂O₃ 含量为 11.5%~12.5%, 具有幔源角闪石的特征(姜常义等,1984), TiO₂-Al₂O₃图解(图 11a)也指示角闪石为幔源角闪石。A^N-(Na+K)图解(图 11b)则显示角闪石大部分来源于地幔, 个别浅闪石具有壳源区特征, 可能是俯冲流体交代作用的产物。同时, 单个样品(XS-09)出现成分差异较大的韭闪石和浅闪石, 且可见角闪石以辉石反应边形式存在, 也反映出部分角闪石可能为次生角闪石, 这暗示原生岩浆含水且后期可能有流体相的参与。铬尖晶石 TiO₂-Fe³⁺/(Cr+Al+Fe³⁺)判别图(图 10b)中, 一个铬尖晶石样品单独落入岛弧岩浆区, 也显示出岩浆具有岛弧岩浆的某些特征, 暗示了源区有俯冲带物质加入。因此, 可推断岩浆主体来源于地幔, 同时受到俯冲带物质的影响。前人对香山中岩体微量元素以及 Nd、Sr、Pb 同位素的研究也证实了这一结果(肖庆华,2010;孙涛等,2010)。

5.2.2 母岩浆性质

研究表明单斜辉石的主量元素成分可以反映出母岩浆特征 (Leterrier et al.,1982; 邱家骧等, 1987)。单斜辉石 Al₂O₃-SiO₂图解(图 12a)显示香山中岩体母岩浆属亚碱性系列, 而 A^N-Ti 图解(图 12b)则反映出香山中岩体的母岩浆 Ti 含量较高, 具有拉斑玄武岩和碱性玄武岩双重特征。

香山中岩体铬尖晶石 TiO₂ 含量为 0.7%~12%, 平均为 2.3%, 高于新疆北部其他含铜镍镁铁-超镁铁岩体(刘民武,2003;冯宏业等,2014;夏昭德等, 2015)。香山中岩体的铬尖晶石几乎都以浑圆状包裹于橄榄石中, 说明它们应是岩浆早期结晶的产物,

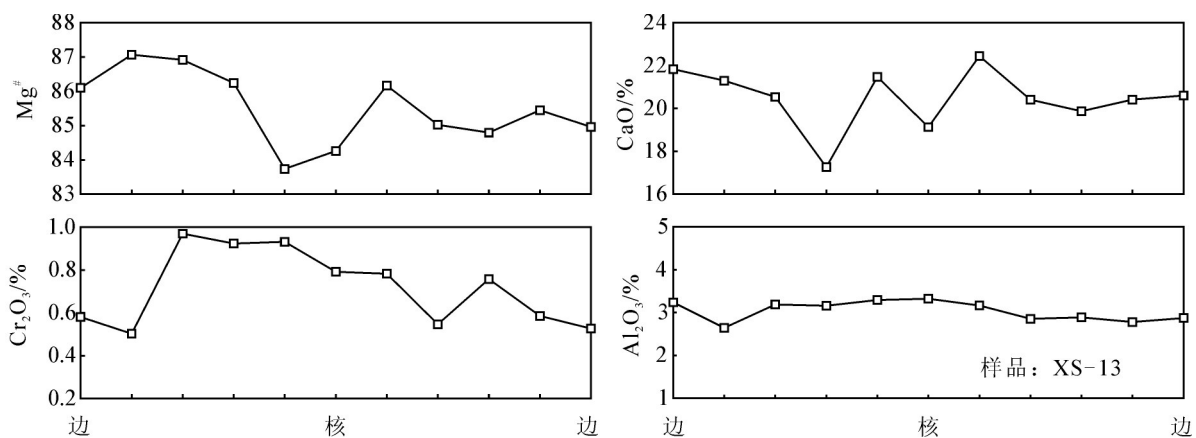


图6 含长单辉橄榄岩中单颗粒单斜辉石成分变化图

Fig. 6 Clinopyroxene profile compositional variations of plagioclase-wehrlite

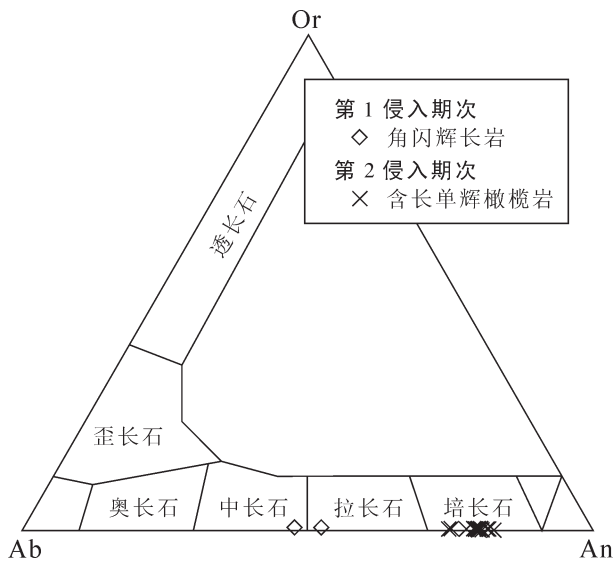


图7 斜长石 Ab-An-Or 判别图
Fig. 7 Ab-An-Or diagrams of plagioclase

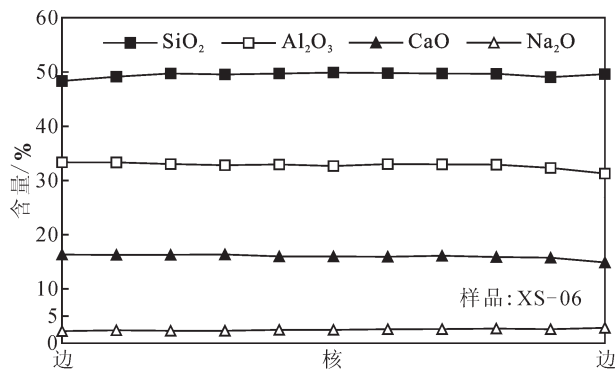


图8 含长单辉橄岩中单颗粒斜长石成分变化图
Fig. 8 Plagioclase profile compositional variations of plagioclase in clinopyroxene gabbro

其中被橄榄石包裹的铬尖晶石的TiO₂含量最高可达12%,表明铬尖晶石结晶时岩浆应是相对富Ti的,这也暗示了香山中岩体的母岩浆应该是Ti含量相对较高的岩浆。与拉斑玄武岩相比,碱性玄武岩更加富TiO₂(>2%),在尖晶石组成判别图(图10b)中,多数铬尖晶石表现出大陆溢流拉斑玄武岩区铬尖晶石的特征,其余的少数表现出钙碱性玄武岩区铬尖晶石富Ti的特征。因此,推断香山中岩体的母岩浆并非典型的拉斑玄武岩浆,而可能是Ti含量偏高的拉斑玄武岩,具有向碱性玄武岩浆过渡的趋势。

5.3 结晶分异和地壳混染

5.3.1 结晶分异

结晶分异作用是指岩浆在冷却过程中结晶出

矿物以及矿物在重力作用下与残余熔浆分离的过程。结晶分异作用使得岩浆中Cr、Mg含量逐渐降低而Si、Al、Ca含量逐渐富集(苏本勋等,2009)。早结晶出的超镁铁质矿物(如橄榄石、辉石)会沉降于熔体底部形成超镁铁质岩,而晚结晶的矿物堆积于上部形成镁铁质岩。香山中岩体超镁铁质岩产出于镁铁质岩中部,说明岩体不是一次岩浆侵入的结果。这与东天山众多含铜镍镁铁-超镁铁岩体相似,具有多期次侵位的特点(毛亚晶等,2014)。香山中岩体同一期次侵入的岩体具有良好的岩相垂直分带特征。第1侵入期次由底部往上连续产出角闪辉长岩、角闪辉长岩、辉长岩。第2侵入期次以超镁铁质岩为主,底部为以正堆晶相橄榄石和斜方辉石、单斜辉石为主要矿物的二辉橄岩;上部为基性程度略低的含长单辉橄岩,该岩相中橄榄石主要以与辉石共结、被单斜辉石和角闪石包裹的形式存在,斜长石和其余的辉石充填在橄榄石间隙中形成典型的填隙结构,这些特征表明,橄榄石结晶较早,然后是单斜辉石和斜长石、角闪石,与正常结晶分异的顺序一致。在钻孔ZK3693中,随着深度由深至浅,含长单辉橄岩中橄榄石的含量和颗粒大小逐渐变小,单斜辉石的MgO含量总体上有连续减少而CaO含量有连续增加的趋势(图13),这符合结晶分异过程中矿物成分的变化规律。

前人研究认为岩浆成因的铬尖晶石的成分主要受熔体成分的控制,早期结晶的铬尖晶石一般具有较高的Cr[#],随着岩浆的演化有Cr→Al, Cr→Fe³⁺、Ti演化的趋(罗照华等,2000; Barnes et al.,2001)。成分判别图(图10a-c)显示铬尖晶石在结晶过程中有向富Fe、Ti端元演化的趋势,这种趋势是因为随着铬尖晶石的结晶,部分橄榄石、辉石甚至斜长石也从母岩浆中结晶使得岩浆中Fe/Mg比值和Ti含量升高,而随着结晶温度的降低以及铬尖晶石与硅酸盐矿物特别是橄榄石发生Fe²⁺和Mg交换,使得铬尖晶石的Fe²⁺/(Mg+Fe²⁺)比值升高;良好的演化曲线说明岩浆遵循结晶分异的演化规律(Barnes et al., 2001)。岩相的过渡渐变关系、矿物的连续性以及矿物成分有规律的变化说明岩浆经历了比较充分的结晶分异作用。

5.3.2 地壳混染

幔源岩浆在上升侵位过程中通常会受到不同

表5 香山中岩体角闪石主要氧化物成分(%)
Table 5 Major oxide content (%) of hornblende in Xiangshanzhong intrusion

样号	XS-06	XS-07	XS-09	XS-10	XS-13	XS-17	XS-36	XS-25						
岩性	角闪辉长岩													
Na ₂ O	2.68	2.52	2.43	2.89	2.06	2.76	2.35	2.98	2.88	2.75	2.87	3.02	2.29	2.70
FeO	7.29	7.54	7.44	7.89	12.08	8.03	8.39	7.81	8.26	8.25	7.57	8.24	9.40	10.91
P ₂ O ₅	0.00	0.04	0.06	0.03	0.01	0.04	0.01	0.00	0.08	0.08	0.04	0.00	0.00	0.03
SiO ₂	43.41	45.43	40.81	39.90	40.61	41.93	44.95	39.85	40.35	41.17	40.31	42.74	42.73	42.03
Cr ₂ O ₃	1.24	0.38	1.22	1.20	0.63	0.67	0.42	0.99	0.63	0.77	0.68	0.83	0.80	0.03
K ₂ O	0.56	0.67	0.35	0.46	0.41	0.37	0.55	0.52	0.49	0.54	0.60	0.47	0.50	0.52
MgO	14.98	16.77	15.45	14.42	16.07	14.53	16.01	14.56	14.46	14.48	15.34	15.00	16.12	13.06
MnO	0.13	0.11	0.14	0.08	0.22	0.08	0.14	0.14	0.08	0.09	0.15	0.15	0.18	0.17
CaO	11.70	11.60	11.47	11.39	9.67	11.36	10.95	11.20	11.46	11.74	11.63	11.34	10.56	11.10
Al ₂ O ₃	12.06	11.96	11.82	12.33	11.70	11.87	10.93	12.13	12.47	11.53	12.08	12.20	12.27	12.12
NiO	0.04	0.07	0.02	0.08	0.07	0.00	0.02	0.02	0.02	0.05	0.04	0.00	0.01	0.06
TiO ₂	2.84	0.50	3.61	4.58	1.50	4.82	1.12	4.21	4.75	3.25	3.85	4.08	3.48	4.63
Total	96.93	97.58	94.82	95.26	95.03	96.45	95.85	94.37	95.96	94.14	95.28	98.13	98.33	97.35
Si	6.32	6.48	6.07	5.97	6.01	6.16	6.54	6.01	5.99	6.20	6.01	6.17	6.10	6.18
A ^v	1.68	1.52	1.93	2.03	1.99	1.84	1.46	1.99	2.01	1.80	1.99	1.83	1.90	1.82
Σ(T)	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Cr	0.09	0.00	0.10	0.13	0.08	0.10	0.14	0.04	0.14	0.14	0.07	0.07	0.09	0.09
Fe ³⁺	0.55	0.09	0.18	0.07	0.13	0.21	0.01	0.31	0.25	0.08	1.05	0.12	0.10	0.11
A ^v	0.16	0.28	0.20	0.23	0.14	0.17	0.39	0.50	0.14	0.14	0.05	0.17	0.25	0.24
Ti	0.37	0.51	0.39	0.47	0.43	0.37	0.31	0.05	0.40	0.52	0.17	0.53	0.37	0.44
Mg	3.43	2.86	3.46	3.26	3.41	3.43	3.25	3.57	3.43	3.21	3.55	3.20	3.25	3.23
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	0.39	1.25	0.67	0.84	0.81	0.72	0.88	0.53	0.63	0.90	0.12	0.96	0.94	0.88
Σ(C)	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Mg ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	0.00	0.06	0.04	0.00	0.34	0.00	0.08	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Mn	0.00	0.01	0.02	0.01	0.03	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Ca	1.82	1.77	1.83	1.82	1.53	1.79	1.71	1.81	1.82	1.90	1.86	1.75	1.61	1.75
Na	0.18	0.15	0.11	0.16	0.10	0.21	0.19	0.16	0.16	0.09	0.12	0.22	0.19	0.24
Σ(B)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Na	0.58	0.55	0.59	0.67	0.49	0.58	0.47	0.69	0.70	0.55	0.75	0.62	0.45	0.53
K	0.10	0.12	0.07	0.09	0.08	0.07	0.10	0.10	0.09	0.10	0.11	0.09	0.09	0.10
Σ(A)	0.69	0.67	0.66	0.76	0.56	0.64	0.57	0.79	0.79	0.65	0.86	0.71	0.54	0.63
Ti	0.31	0.05	0.40	0.52	0.17	0.53	0.12	0.48	0.53	0.37	0.43	0.44	0.37	0.51
Si	6.32	6.48	6.07	5.97	6.01	6.16	6.54	6.01	5.99	6.20	6.01	6.17	6.10	6.18

以23个氧为基准计算的阳离子

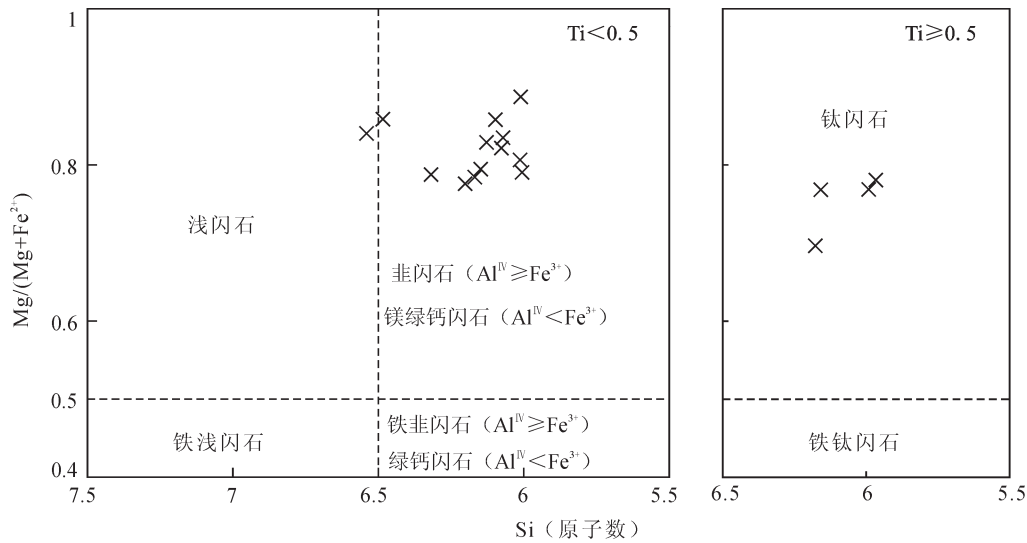


图9 香山中岩体角闪石分类图(底图据 Leake et al.,1997)

Fig. 9 Classification of hornblende in Xiangshanzhong mafic-ultramafic intrusion (modified after Leake et al., 1997)

程度的地壳同化混染作用。地壳硅铝质的加入可使幔源岩浆的Si、Al等物质的富集,而造成Cr、Mg、Ni、Ti和Fe等物质的亏损(Stevenson et al.,2009)。与结晶分异作用使岩浆成分发生连续性变化不同,地壳混染对岩浆成分的影响更有可能是阶段性、突变性的。

在钻孔ZK3693深度为336 m的含长单辉橄榄岩样品(XS-17)中,橄榄石的Fo、MgO含量明显低于离地表更近的其他橄榄石,同时该样品中可见橄榄石的辉石反应边,说明在橄榄石结晶过程中由于富Si物质的混染使SiO₂突然达到过饱和状态而在橄榄石边缘结晶出辉石,而辉石受后期蚀变影响又发生了闪石化。在相同物理化学条件下,CaO倾向于进入斜长石,而在同时结晶的单斜辉石中则相对亏损,因此,同化混染形成的单斜辉石具有相对富Si而贫Ca、Ti的特征^[54],同时地壳混染阶段性、突变性的特征,易使岩浆成分在短时间内混合不均而导致矿物成分变化范围较大。样品XS-17中的单斜辉石与产出深度更小的单斜辉石相比具有富Si贫Ca、Ti且矿物成分变化范围大的特征(图13),由此可推断XS-17样品中矿物在形成过程中同化混染了地壳富Si组分,但矿物成分变化并不是十分明显,说明同化混染程度并不高。这一推断符合前人通过元素地球化学模拟得出的地壳混染程度(下地壳7%,上地壳5%)(Tang et al.,2013)。

5.4 硫饱和及富集作用

岩浆铜镍硫化物矿床形成的关键是硅酸岩浆在演化过程中达到硫达到饱和状态,产生不混溶的硫化物液滴,在合适的空间保存下来(Anthony, 2004)。一般认为引起硫饱和的机制主要有:岩浆过冷却作用、围岩的混染作用、岩浆结晶分异作用、岩浆混合作用等(Naldrett,1999;Li et al.,2005)。

由于香山中岩体并未发现岩体与围岩的冷凝边以及围岩捕掳体,因此难以说明岩浆的过冷却对硫饱和起到重要作用。如前所述,香山中岩体的同化混染作用较弱, $\delta^{34}\text{S}$ 多为接近零的正值也显示硫主要来源于上地幔(孙燕等,1996),这与金川、喀拉通克、黄山、葫芦和图拉尔根等岩浆型铜镍矿床具有相似性(汤中立等,1998),因此地壳混染作用也不能视为香山中岩体成矿的决定因素。

5.4.1 橄榄石分离结晶作用

东天山地区含铜镍镁铁-超镁铁岩体的原始岩浆在演化过程中发生的硫化物熔离与橄榄石的分离结晶作用密切相关(刘艳荣等,2012;Tang et al., 2013;毛亚晶等,2014)。橄榄石是岩浆中最早结晶的硅酸盐矿物之一,也是Mg、Fe、Ni的主要寄主矿物。最早结晶的橄榄石具有最高的Fo,可近似反映出分离结晶开始时岩浆的成分。以Ni在橄榄石和硅酸盐岩浆之间的分配系数为7,在硫化物和硅酸盐岩浆之间的分配系数为500,橄榄石-岩浆的

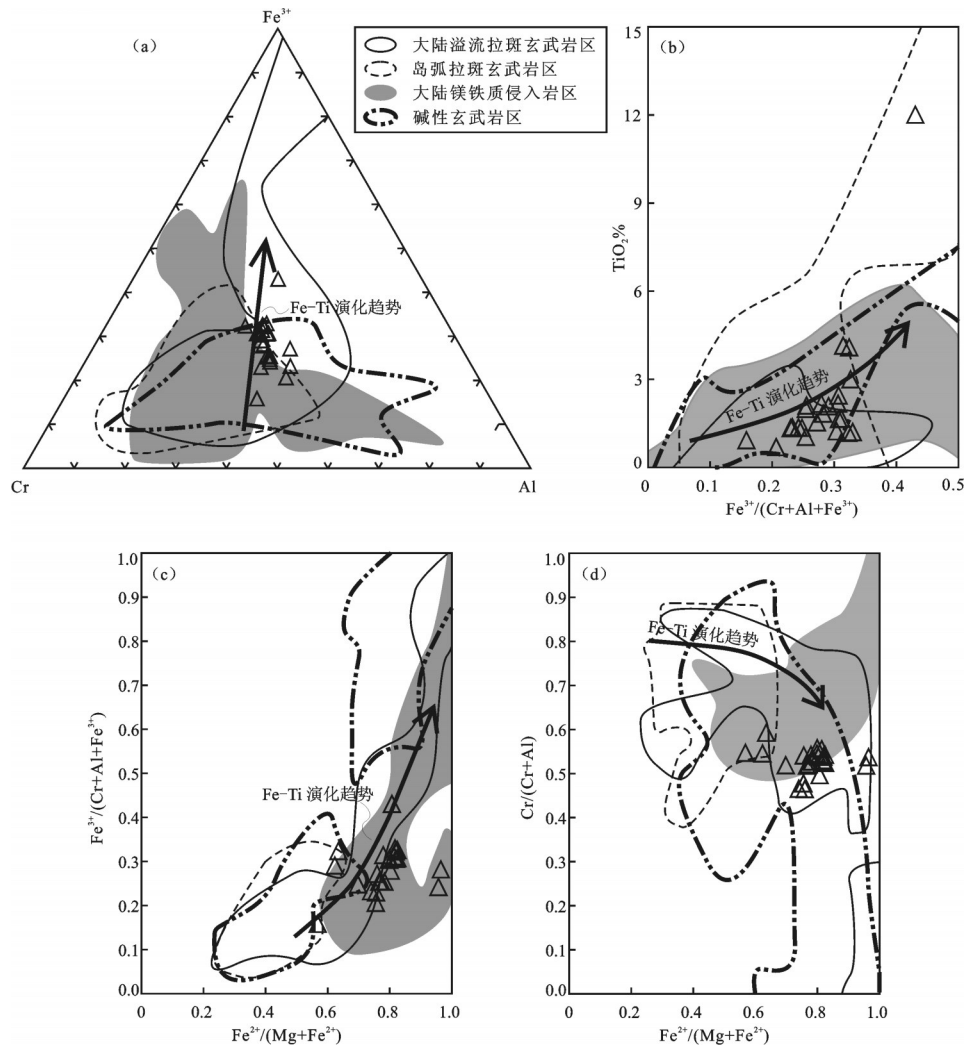


图 10 香山中岩体尖晶石组成判别图(底图据 Barnes et al., 2001 修改)

a—Cr—Al—Fe³⁺判别图; b—Fe³⁺/(Cr + Al + Fe³⁺)—Fe²⁺/(Mg+Fe²⁺)判别图; c—Cr/(Cr+Al)—Fe²⁺/(Mg+Fe²⁺)判别图;
d—TiO₂—Fe³⁺/(Cr + Al + Fe³⁺)判别图

Fig. 10 Compositional correlation diagrams of spinel in Xiangshanzhong mafic-ultramafic intrusion (modified after Barnes et al., 2001)

Mg—Fe 分配系数 (FeO/MgO)_{橄榄石} / (FeO/MgO)_{岩浆} = (0.3 ± 0.03) (Roeder et al., 1970) 对橄榄石的结晶过程进行模拟。模拟结果显示, 部分橄榄石分布于母岩浆正常演化趋势线(AB 曲线)下方, 说明部分橄榄石中 Ni 是相对亏损的, 反映出分离结晶过程中伴随有硫化物的熔离; 部分橄榄石沿趋势线 D 分布, 应是橄榄石与后期隙间硅酸盐反应导致 Fo 降低的结果; 另外一些橄榄石沿趋势线 E 分布, 则说明橄榄石与隙间硫化物发生了 Fe—Ni 交换, 使得橄榄石中 Ni 含量增高(图 14); 而单个样品中橄榄石的 Ni 含量变化范围较大, 可能是隙间硫化物与硅酸盐共同作用的

结果(图 13)。钻孔 ZK3693 中, 被硫化物包裹的橄榄石核部的 Ni 含量明显高于边部, 也说明在单颗粒橄榄石结晶的过程中发生了硫化物的熔离, 致使边部的 Ni 发生了亏损(图 15a)。然而, 众多橄榄石分布于母岩浆正常演化趋势线(AB 曲线)上方, 且偏离程度较大, 这显然不能只用橄榄石与隙间硫化物的 Fe—Ni 交换来解释(图 14); 且若发生 Fe—Ni 交换, 橄榄石边部的 Ni 含量应明显高于核部, 但含长单辉橄榄岩中被单斜辉石包裹的橄榄石同样表现出 Ni 含量较高, 且核部和边部的 Ni 含量并没有明显差异(图 15b)的特征, 说明其 Ni 含量的升高并不是由于

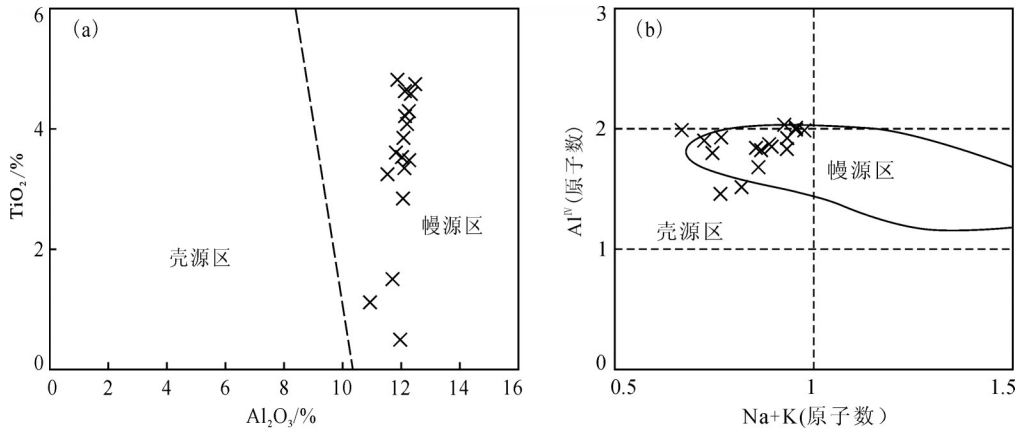


图11 香山中岩体角闪石源区判别图

a—角闪石 TiO₂-Al₂O₃图解(底图据姜常义等,1984); b—角闪石 A^{IV}-(Na+K)判别图(底图据 Kay et al.,1983 修改)

Fig. 11 Source area diagrams of hornblende in Xiangshanzhong mafic-ultramafic intrusion

a-TiO₂-Al₂O₃ diagram of hornblende (after Jiang et al., 1984); b-A^{IV}-(Na+K) diagram of hornblende (after Kay et al., 1983)

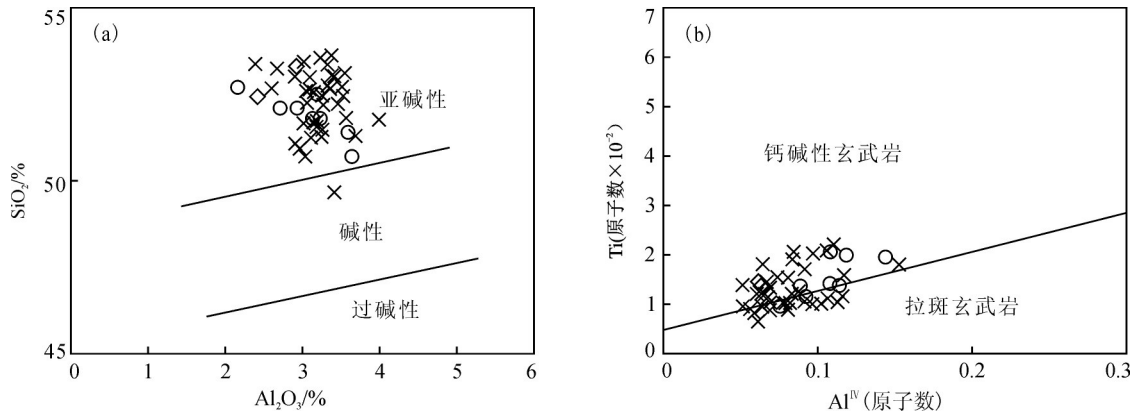


图12 香山中岩体单斜辉石岩石系列判别图

a—单斜辉石 Al₂O₃-SiO₂判别图; b—单斜辉石 A^{IV}-Ti判别图(底图据 Leterrier et al.,1982); 图例同图5

Fig. 12 Discrimination diagrams of clinopyroxenes in Xiangshanzhong mafic-ultramafic intrusion

a-Al₂O₃-SiO₂ diagram of clinopyroxenes; b-A^{IV}-Ti diagram of clinopyroxenes (after Leterrier et al., 1982)

后期的Fe-Ni交换,而更可能是分离结晶过程中岩浆成分改变造成的。

5.4.2 岩浆混合作用

新疆北部地区的含铜镍镁铁-超镁铁岩体大多发生有岩浆混合作用(Li et al.,2005;柴凤梅,2006;苏本勋等,2011;毛亚晶等,2014)。新鲜的基性程度更高的岩浆注入可以提高母岩浆中Mg、Fe、Ni等元素的含量及岩浆温度,有利于硫达到饱和状态并富集。

在钻孔ZK3693深度295~325 m,橄榄石的含量以及橄榄石中的Fo和MgO含量相对于其上覆和下伏岩体更高, Ni含量也有突然升高的趋势,而斜长石An和SiO₂含量相对于其上覆和下伏岩体更低,

说明在此区间内发生结晶作用的岩浆比区间外的岩浆具有更高的基性程度,应是先期正常演化的岩浆与基性程度更高的新鲜岩浆混合的结果。结晶分异和同化混染作用会使岩浆中Mg、Fe、Cr等元素含量逐渐减少而Si、Na、K等元素逐渐富集;只有新鲜的基性程度更高的岩浆注入才能使矿物的Mg[#]升高。同时,温度和压力的变化也可使辉石的成分发生变化。在镁铁质岩浆结晶过程中,矿物的成分除了受熔体成分控制外,还受到结晶环境的制约;其中CaO含量的变化与温度的变化密切相关(Canil et al.,1996;Pearson et al.,2003), Al₂O₃含量的变化受压力变化的影响^[61], Cr₂O₃含量的变化则受温度与压力

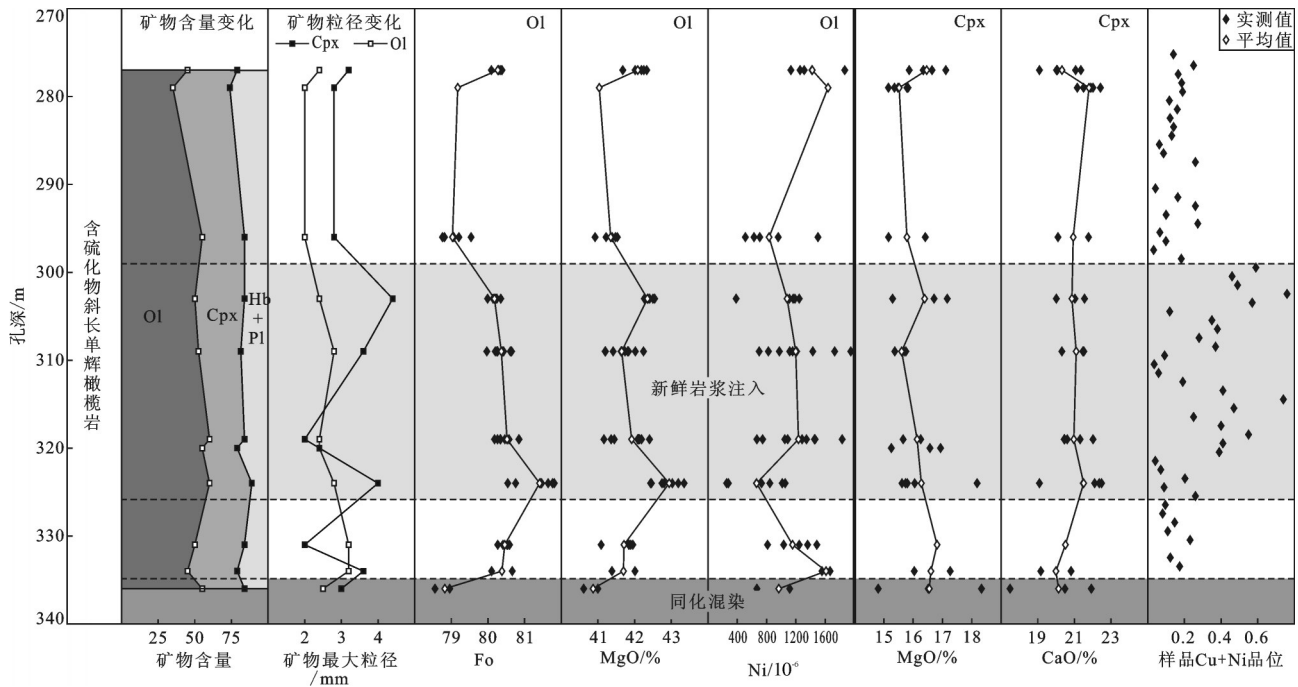


图 13 香山中岩体 ZK3693 钻孔橄榄石和单斜辉石的粒径、成分变化图

Ol—橄榄石; Cpx—单斜辉石; Hb—角闪石; Pl—斜长石

Fig. 13 Grain size and mineral compositional variations of olivine and clinopyroxene crystals in drill hole ZK3693 in Xiangshanzhong mafic-ultramafic intrusion

Ol—Olivine; Cpx—Clinopyroxene; Hb—Hornblende; Pl—Plagioclase

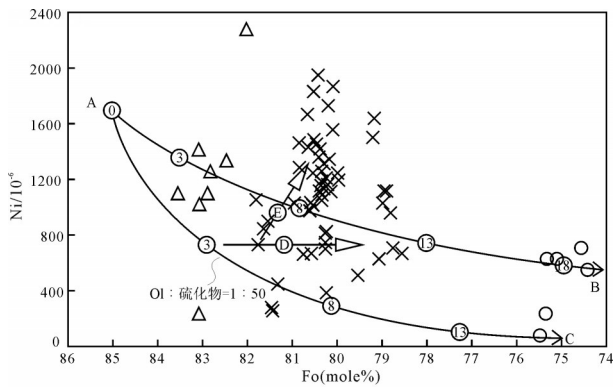


图 14 香山中岩体橄榄石 Fo-Ni 相关性图

图例同图 4

Fig. 14 Fo-Ni diagram of olivine in Xiangshanzhong mafic-ultramafic intrusion

共同作用。在钻孔 ZK3693 深度 295~325 m, 含长单辉橄榄岩中单颗粒辉石的成分存在不连续变化(图 6), Mg[#]、Cr₂O₃ 含量以及 CaO 含量均有突变性升高和降低的现象, 表明单斜辉石结晶时, 岩浆的成分是

变化的; 而 Cr₂O₃ 含量与 CaO 含量变化较大, Al₂O₃ 含量与 Cr₂O₃ 含量的变化具有一致性, 但强度明显小很多, 说明结晶过程中温度的变化比压力的变化更明显, 而新鲜岩浆的加入可明显改变熔体的温度却对压力影响相对较小。

在钻孔 ZK3693 深度 295~325 m 发生的新鲜岩浆注入明显提高了矿石的 Ni、Cu 品位(图 13); 此区间内矿石的 Cu+Ni 品位大多集中在 0.4% 左右, 部分可达 0.6% 以上, 明显高于其上覆和下伏同一岩相岩体(普遍小于 0.2%)。综上所述, 新鲜的基性程度更高的岩浆注入能够促进硫化物的熔离, 是香山中岩体硫化物富集的重要因素。

5.5 成矿作用探讨

香山中岩体的形成主要受结晶分异作用的控制, 演化过程中地壳混染和新鲜岩浆的注入在某些特定的阶段起到了重要作用。在香山岩体钻孔 ZK3693 的含长单辉橄榄岩中, 硫化物是普遍可见的, 只有含量多少的区别, 说明岩浆演化早期橄榄石的分离结晶作用与硫化物熔离密切相关; 而有新

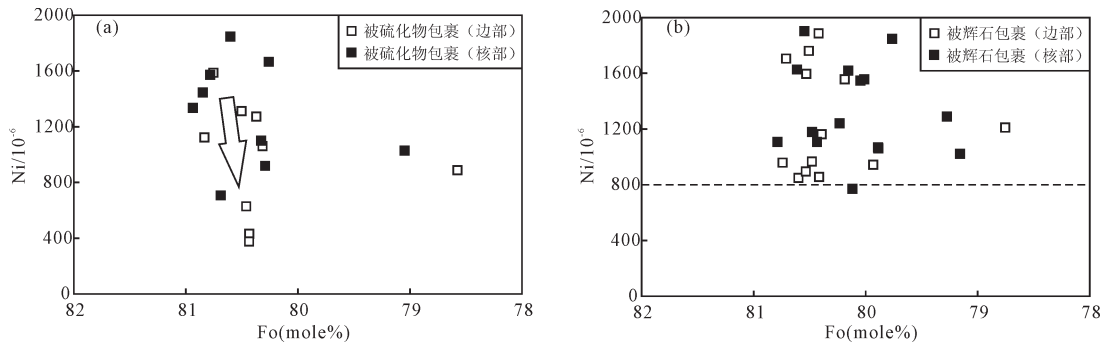


图 15 香山中岩体含长单辉橄榄岩中橄榄石核部和边部的Fo-Ni相关线图
Fig. 15 Fo-Ni diagram of edge and center of olivine in plagioclite

鲜岩浆注入的区间内,硫化物含量明显的增加则说明新鲜岩浆的注入对硫化的熔离和富集起到了重要的促进作用。

东天山地区的含铜镍镁铁-超镁铁岩体均受到结晶分异作用的控制;地壳混染作用也普遍存在,但由于混染程度普遍较低,所以对成岩成矿的影响有限。东天山其他含铜镍镁铁-超镁铁岩体的岩浆源区、母岩浆性质、岩石学与矿物学特征与香山中岩体具有相似的特征,说明它们应具有大体相似的形成过程;同时,与香山中岩体的演化过程类似,普遍具有多期多阶段侵位的特点(刘艳荣等,2012),这为岩浆演化过程中新鲜岩浆的注入提供了可靠的证据。因此,新鲜岩浆的注入也有可能是东天山地区其他含铜镍镁铁-超镁铁岩体硫化物熔离和富集的关键因素。

6 结论

(1)香山中岩体暗色矿物结晶顺序为铬尖晶石→橄榄石→斜方辉石→单斜辉石→斜长石→角闪石,结晶温度介于860~1393℃,岩浆房深度距地表约17~25 km。

(2)香山中岩体的原始岩浆来源于上地幔,受俯冲带物质的影响,为钛含量偏高的拉斑玄武岩浆。

(3)香山中岩体的形成主要受结晶分异作用的控制,地壳混染对岩体的形成有阶段性的影响。

(4)橄榄石的分离结晶伴随有硫化物的熔离作用,而新鲜的基性程度更高的岩浆注入能提高母岩浆中成矿金属元素的含量,促进硫化物的熔离,是香山中岩体硫化物富集的重要原因。

致谢: 本次研究的野外工作得到了新疆有色地质质查局 704 大队尹熙文工程师的帮助;长安大学

刘民武老师在矿物电子探针分析过程中提供了帮助;审稿专家及编辑老师对论文提出了宝贵修改意见,在此表示诚挚的感谢。

References:

Anthony J N. 2004. Magmatic Sulfide Deposits: Geology, Geochemistry and Exploration[M]. New York, Oxford University Press, 1-186.

Barnes S J, Roeder L. 2001. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 42: 2279-2302.

Bertrand P, Mercier J C C. 1985. The mutual solubility of coexisting ortho- and clinopyroxene: toward an absolute geothermometer for the natural system?[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 76(1-2): 109-122.

Canil D, O'Neill H C. 1996. Distribution of ferric iron in some upper-mantle assemblages[J]. *Journal of Petrology*, 37: 609-635.

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 Geosciences (in Chinese with English abstract).

Chen Shiping, Wang Denghong, Qu Wenjun, Chen Zhenghui, Gao Xiaoli. 2005. Geological feature and ore formation of The Hulu Cu-Ni sulfide deposit, Eastern Tianshan, Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*. 23(3): 230-223(in Chinese with English abstract).

Deng Jinfu. 1987. Rock phase equilibrium and its origin[M]. Wuhan: Wuhan College of Geology Press.

Deng Yufeng, Song Xieyan, Zhou Taofa, Yuan Feng, Chen Liemeng, Zheng Wenqin. 2012. Correlations between Fo number and Ni content of olivine of the Huangshandong intrusion, eastern Tianshan, Xinjiang, and the genetic significances[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 2224-2234(in Chinese with English abstract).

Fabriès J. 1979. Spinel-olivine geothermometry in peridotites from ultramafic complexes [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69: 329-336.

- Feng Hongye, Xu Yingxia, Tang Dongmei, Qin Kezhang, Mao Yajing, Guo Haibing, San Jinzhu. 2014. Mineralogical characteristics of olivine and spinel from Getashankou Cu–Ni–bearing mafic–ultramafic intrusions in eastern Tianshan, NW China[J]. *Geology and Exploration*, 50(2): 346–359(in Chinese with English abstract).
- Fu Piaocer, Hu Peiqing, Zhang Mingjie, Jia Yuanqin, Tang Zhongli, Li Wenyuan. 2009. Metallogenic magmatism of Huangshan Cu–Ni sulfide deposit in Xinjiang[J]. *Geochinica*, 38: 432–448(in Chinese with English abstract).
- Gu Lianxing, Chu Jianlin, Guo Jichun, Liao Jingjuan, Yan Zhengfu, Yang Hao, Wang Jinzhu. 1994. The east Xinjiang–type mafic–ultramafic complexes in orogenic environments[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 10(4): 339–356(in Chinese with English abstract).
- Gu Lianxin, Zhang Zunzhong, Wu Changzhi, Wang Yinxi, Tang Junhua, Wang Chuansheng, Xi Aihua, Zheng Yuanchuan. 2006. Some problems on granites and vertical growth of continental crust in Eastern Tianshan NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1103–1120 (in Chinese with English abstract).
- Hammarstrom J M, Zen E A. 1986. Aluminum in hornblende: an empirical igneous geobarometer[J]. *American Mineralogist*, 71: 1297–1313.
- Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, Li Lihui, Li Zonghuai. 2004. SHRIMP zircon U–Pb ages of Kalatongke No. 1 and Huangshandong Cu–Ni–bearing mafic–ultramafic complexes, north Xinjiang, and geological implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(22): 2324–2328.
- Hollister LS, Grissom GC, Peters EK, Stowell H H, Sisson V B. 1987. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc–alkaline plutons[J]. *American Mineralogist*, 72: 231–239.
- Jiang Changyi, An Sanyuan. 1984. On chemical characteristics of calcic amphiboles from igneous rocks and their petrogenesis significance[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 4(3): 10–15.
- Jiang Chao, Qian Zhuangzhi, Zhang Jiangjiang, Sun Tao, Xu Gang, Meng Deming. 2014. Characteristics and genetic significances of olivine from Xiangshan complex in Eastern Tianshan, Xinjiang[J]. *Geoscience*, 28(3): 478–488 (in Chinese with English abstract).
- Kay SM, Snedden W T, Foster B P, Kay R W. 1983. Upper mantle and crustal fragments in the Ithaca kimberlites[J]. *Journal of Geology*, 91(3): 277–290.
- Leake B E. 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphibole of the International Mineralogical Association, Commission on new minerals and mineral names[J]. *Amer. Mineral.*, 82: 1019–1037.
- Leake B E, Woolley A R, Birch W D, Burke E A, Ferraris G, Grice J D, Hawthorne F C, Kisch H J, Krivovichev V G, Schumacher J C, Stephenson N C N, Whittaker E J W. 2004. Nomenclature of amphiboles: additions and revisions to the International Mineralogical Association's amphibole nomenclature[J]. *Mineralogical Magazine*, 68(1), 209–215.
- Leterrier J, Maury R C, Thonon P, Girard D, Marchal M. 1982. Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo–volcanic series[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 59(1): 139–154.
- Li C, Ripley E M. 2005. Empirical equations to predict the sulfur content of mafic magmas at sulfide saturation and applications to magmatic sulfide deposits[J]. *Mineral Deposita*, 40(2): 218–230.
- Li C, Zhang Z W, Li W Y, Wang Y L, Sun T, Ripley E M. 2015. Geochronology, petrology and Hf–S isotope geochemistry of the newly–discovered Xiarihamu magmatic Ni–Cu sulfide deposit in the Qinghai–Tibet plateau, Western China[J]. *Lithos*, (216–217): 224–240.
- Li Dedong, Wang Yuwang, Wang Jingbin, Wang Lijuan, Long Lingli, Liao Zhen. 2012. The timing order of mineralization and diagenesis for Xiangshan complex rocks, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 2103–2112(in Chinese with English abstract).
- Liu Mingwu. 2003. Geochemical Comparison of Several Nickel Deposits in China[D]. Xi'an: Northwest University (in Chinese with English abstract).
- Liu Yanrong, Lv Xinbiao, Mei Wei, Hui Weidong. 2012. Compositions of olivine from the mafic–ultramafic complexes in eastern Tianshan, Xinjiang and implications to petrogenesis: Examples from Huangshandong and Tulargen complexes[J]. *Geochimica*, 41(1): 78–88(in Chinese with English abstract).
- Luo Zhaohua, Marakushev A A, Paniakh H H, Su Shangguo. 2000. The origin of copper–nickel sulfide deposits—Exemplified by Norilsk (Russia) and Jinchuan (China)[J]. *Mineral Deposits*, 19(4): 330–339(in Chinese with English abstract).
- Lv Linsu, Mao Jingwen, Zhou Zhenhua, Li Hongbo, Zhang Zuoheng, Wang Yunfeng. 2013. Mineral chemistry of ore–bearing ultramafic rocks from the Hongqiling Nos. 1 and 7 intrusions in Jilin Province: Constraints on the magmatic processes and the metallogenesis of Ni–Cu sulfide deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1): 319–344(in Chinese with English abstract).
- Mao Yajing, Qin Kezhang, Tang Dongmei, Xue Shengchao, Feng Hongye, Tian Ye. 2014. Multiple stages of magma emplacement and mineralization of eastern Tianshan, Xinjiang: Exemplified by the Huangshan Ni–Cu deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1575–1594(in Chinese with English abstract).
- McKenzie D and Bickle M J. 1988. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere [J]. *Journal of Petrology*, 29(3): 625–679.
- Naldrett A J. 1999. World–class Ni–Cu–PGE deposits: key factors in their genesis[J]. *Mineralium Deposita*, 34(3): 227–240.
- Pearson D G, Canil D, Shirey S B. 2003. Mantle samples included in

- volcanic rocks: xenoliths and diamonds[C]//Carlson R W, Holland H D, Turekian K K(eds.). *The Mantle and Core, Treatise on Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, 171-275.
- Qian Zhuangzhi, Sun Tao, Tang Zhongli, Jiang Changyi, He Ke, Xia Mingzhe, Wang Jianzhong. 2009. Platinum- group Elements Geochemistry and Its Significances of the Huangshandong Ni-Cu Sulfide Deposit, East Tianshan, China[J]. *Geological Review*, 55(6): 873-884 (in Chinese with English abstract).
- Qin Kezhang, Fang Tonghui, Wang Shulai, Zhu Baoqing, Feng Yimin, Yu Haifeng, Xiu Qunye. 2002. Plate tectonics division, evolution and metallogenic settings in eastern Tianshan mountains, NW-China[J]. *Xiangjiang Geology*, 20(4): 302-308 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiaxiang, Liao Qunan. 1987. The Main Characteristics and Genetic Information of Clinopyroxene Megaacrysts in Cenozoic Basalt of Eastern China[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 6(1): 53-56 (in Chinese with English abstract).
- Roeder P L, Emslie R F. 1970. Olivine- liquid equilibrium[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 29(4): 275-289.
- San Jinzhu, Qin Kezhang, Tang Zhongli, Su Benxun, Sun He, Xiao Qinghua, Liu Pingping . 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): 3027-3035(in Chinese with English abstract).
- Schmidt M W. 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the al-in-hornblende barometer[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 110: 304-310.
- Stevenson R K, Henry P, Gariépy C. 2009. Isotopic and geochemical evidence for differentiation and crustal contamination from granitoids of the Berens river subprovince, superior province, Canada[J]. *Precambrian Research*, 168(1): 123-133.
- Su B X, Qin K Z, Sun H, Tang Dongmei, Xiao Qinghua, Cao Mingjian. 2009. Petrological and mineralogical characteristics of Hongshishan mafic-ultramafic complex in Beishan area, Xinjiang: Implications for assimilation and fractional crystallization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 873- 887(in Chinese with English abstract).
- Su Benxun, Qin Kezhang, Tang Dongmei, Deng Gang, Xiao Qinghua, Sun He, Lu Hongfei, Dai Yucai. 2011. Petrological features and implications for mineralization of the Poshi mafic- ultramafic intrusions in Beishan area Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(12): 3627-3639(in Chinese with English abstract).
- Sun He, Qin Kezhang, Li Jinxiang, Xu Xingwang, San Jinzhu, Ding Kuishou. 2006. Petrographic and geochemical characteristics of the Tulargen Cu- Ni- Cosulfide Deposit, East Tianshan, Xinjiang, and its tectonic setting[J]. *Geology in China*, 33(3): 606- 617 (in Chinese with English abstract).
- Sun Tao, Qian Zhuangzhi, Tang Zhongli, He Ke, Sun Yali, Wang Jianzhong, Xia Mingzhe. 2010. Zircon U-Pb chronology, platinum group element geochemistry characteristics of Hulu Cu-Ni deposit, East Xinjiang, and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3339-3349 (in Chinese with English abstract).
- Sun T, Qian Z Z, Deng Y F, Tang Q Y. 2013. PGE and isotope (Hf - Sr- Nd- Pb) constraints on the origin of the Huangshandong magmatic Ni- Cu sulfide deposit in the Central Asian Orogenic Belt, Northwestern China[J]. *Economic Geology*, 108: 1849-1864
- Sun T, Qian Z Z, Li C, Xia M Z, Yang S H. 2013. Petrogenesis and economic potential of the Erhongwa mafic-ultramafic intrusion in the Central Asian Orogenic Belt, NW China: Constraints from olivine chemistry, U- Pb age and Hf isotopes of zircons, and whole-rock Sr-Nd-Pb isotopes[J]. *Lithos*, 182(7): 185-199.
- Sun Yan, Mu Jillu, Xiao Yuanfu. 1996. The Characteristics of shallow-rich ore body in copper-nickel sulphide deposits in Xiangshan, Xinjiang[J]. *J. Mineral. Petrol.*, 16(1): 51- 57(in Chinese with English abstract).
- Tang D M, Qin K Z, Su B X, Sakyi P A, Liu Y S, Mao Q, Santosh M, Ma Y G. 2013. Magma source and tectonics of the Xiangshanzhong mafic-ultramafic intrusion in the Central Asian Orogenic Belt, NW China, traced from geochemical and isotopic signature[J]. *Lithos*, 170-171(6): 144-163.
- Tang Zhongli and Barnes S J. 1998. *Metallogenic Mechanism of Magmatic Sulfide Deposits*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-160(in Chinese with English abstract).
- Wang Yalei, Zhang Zhaowei, You Minxin, Li Xin, Li Kan, Wang Bolin. 2015. Chronological and geochemical characteristics of the Baixintan Ni-Cu deposit in Eastern Tianshan Mountains, Xinjiang, and their implications for Ni- Cu mineralization[J]. *Geology in China*, 42(3): 452-467(in Chinese with English abstract).
- Wang Yuwang, Wang Jingbin, Wang Lijuan, Peng Xiaoming, Hui Weidong, Qin Quanxin. 2006. A Intermediate Type of Cu- Ni Sulfide and V- Ti Magnetite Deposit: Xiangshanxi Deposit, Hami, Xinjiang, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 61- 73(in Chinese with English abstract).
- Wang Yuwang, Wang Jingbin, Wang Lijuan, Long Lingli. 2009. Characteristics of two mafic- ultramafic rock series in the Xiangshan Cu- Ni- (V)Ti- Fe ore district, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 888- 900(in Chinese with English abstract).
- Xia Mingzhe. 2009. *The Mafic- ultramafic Intrusions in Huangshan Region Eastern Tianshan, Xinjiang: Petrogenesis and Mineralization Implication*[D]. Xi' an: Chang' an University (in

- Chinese with English abstract).
- Xia Zhaode, Xia Mingzhe, Fan Yazhou. 2015. The olivine and chrome spinel composition characteristics of the Hongshishan mafic-ultramafic intrusion in the Beishan area, Xinjiang and its genesis[J]. *Xinjiang Geology*, 33(1): 33-40(in Chinese with English abstract).
- Xiao Fan, Wang Minfang, Jiang Chuling, Yang Wusheng. 2013. Platinum group elements geochemistry and its implication for the Xiangshan Cu-Ni sulfide deposit, east Tianshan, China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 32(1): 123-138.
- Xiao Qinghua. 2010. Origin of Xiangshanxi Cu-Ni-Ti-Fe Composite Deposit in Eastern Tianshan, NW China, and Its Implications[D]. Graduate University of Chinese Academy of Sciences(in Chinese with English abstract).
- Xiao Qinghua, Qin Kezhang, Tang Dongmei, Su Benxun, Sun He, San Jinzhu, Cao Mingjian, Hui Weidong. 2010. Xiangshanxi composite Cu-Ni-Ti-Fe deposit belongs to comagmatic evolution product: Evidence from one microscopy, zircon U-Pb chronology and petrological geochemistry, Hami, Xinjiang, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 503-522 (in Chinese with English abstract).
- Xu Gang, Tang Zhongli, Wang YaLei, Yan Haiqing, Jiao Jiangang, Wang Jianzhong. 2012. Features and genetic significance of olivine from Heishan magmatic sulfide ore-bearing intrusion in Beishan area, Gansu Province[J]. *Mineral Deposits*, 31(5): 1075-1086(in Chinese with English abstract).
- Xu Yigang. 1993. Geothermometers Applicable to the mantle xenoliths[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 9(2): 167-180(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Xiao Xuchang, Wang Jun, Wang Yong, Luo Zhaohua. 2005. Mineral chemistry of the Pulu Cenozoic Volcanic rocks on the West Kunlun Mountains and its constraint on the magmatic process[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 25(3): 237-248(in Chinese with English abstract).
- Zhu Guoqiang, Yang Shufeng, Chen Hanlin. 1996. Tectonic stress analysis of Huangshan Cu-Ni metallogenic belt and discussion structural controlling rock and ore model[J]. *J. Mineral Petrol.*, 16(1): 86-93(in Chinese with English abstract).
- 邓宇峰, 宋谢炎, 周涛发, 袁峰, 陈列猛, 郑文勤. 2012. 新疆东天山黄山山东岩体橄榄石成因意义探讨[J]. *岩石学报*, 28(7): 2224-2234.
- 冯宏业, 许英霞, 唐冬梅, 秦克章, 毛亚晶, 郭海兵, 三金柱. 2014. 东天山圪塔山口铜镍矿区镁铁-超镁铁质岩体橄榄石与尖晶石矿物学特征[J]. *地质与勘探*, 50(2): 346-359.
- 傅飘儿, 胡沛青, 张铭杰, 贾元琴, 汤中立, 李文渊. 2009. 新疆黄山铜镍硫化物矿床成矿岩浆作用过程[J]. *地球化学*, 38: 432-448.
- 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 王银喜, 唐俊华, 汪传胜, 鄯爱华, 郑远川. 2006. 关于东天山花岗岩与陆壳的垂向增长的若干认识[J]. *岩石学报*, 2(25): 1103-1120.
- 顾连兴, 诸建林, 郭继春, 廖静娟, 严正富, 杨浩, 王金珠. 造山带环境中的东疆型镁铁超镁铁杂岩[J]. *岩石学报*, 10(4): 339-356.
- 韩宝福, 季建清, 宋彪, 李立辉, 李宗怀. 2004. 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*, 49(22): 2324-2328.
- 姜常义, 安三元. 1984. 论火成岩中钙质角闪石的化学组成特征及其岩石学意义[J]. *矿物岩石*, 4(3): 10-15.
- 姜超, 钱壮志, 张江江, 孙涛, 徐刚, 孟德明. 2014. 新疆东天山香山岩体橄榄石特征及其成因意义[J]. *现代地质*, 28(3): 478-488.
- 李德东, 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 龙灵利, 廖震. 2012. 新疆香山杂岩体的成岩与成矿时序[J]. *岩石学报*, 28(7): 2103-2112.
- 刘民武. 2003. 中国几个镍矿床的地球化学比较研究[D]. 西安: 西北大学.
- 刘艳荣, 吕新彪, 梅微, 惠卫东. 2012. 新疆东天山镁铁-超镁铁岩体中橄榄石成分特征及其成因意义: 以黄山东和图拉尔根为例[J]. *地球化学*, 41(1): 78-88.
- 罗照华, A A 马拉库舍夫, H A 潘妮妮, 苏尚国. 2000. 铜镍硫化物矿床的成因——以诺里尔斯克(俄罗斯)和金川(中国)为例[J]. *矿床地质*, 19(4): 330-339.
- 吕林素, 毛景文, 周振华, 李宏博, 张作衡, 汪云峰. 2013. 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*, 28(1): 319-344.
- 毛亚晶, 秦克章, 唐冬梅, 薛胜超, 冯宏业, 田野. 2014. 东天山岩浆铜镍硫化物矿床的多期次岩浆侵位与成矿作用——以黄山铜镍矿床为例[J]. *岩石学报*, 30(6): 1575-1594.
- 钱壮志, 孙涛, 汤中立, 姜常义, 何克, 夏明哲, 王建中. 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]. *地质论评*, 55(6): 873-884.
- 秦克章, 方同辉, 王书来, 朱宝清, 冯益民, 于海峰, 修群业. 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(4): 302-308.
- 邱家骧, 廖群安. 1987. 中国东部新生代玄武岩中单斜辉石巨晶的主要特征及成因信息[J]. *岩石矿物学杂志*, 6(1): 56-63.
- 三金柱, 秦克章, 汤中立, 苏本勋, 孙赫, 肖庆华, 刘平平. 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.
- 苏本勋, 秦克章, 孙赫, 唐冬梅, 肖庆华, 曹明坚. 2009. 新疆北山地区

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(北京).
- 陈世平, 王登红, 屈文军, 陈郑辉, 高晓理. 2005. 新疆葫芦铜镍硫化物矿床的地质特征与成矿年代[J]. *新疆地质*, 23(3): 230-233.
- 邓晋福. 1987. 岩石相平衡与岩石成因[M]. 武汉: 武汉地质学院出版社.

红石山镁铁-超镁铁岩体的岩石矿物学特征:对同化混染和结晶分异过程的启示[J]. 岩石学报, 25(4): 873-887.

苏本勋, 秦克章, 唐冬梅, 邓刚, 肖庆华, 孙赫, 卢鸿飞, 代玉财. 2011. 新疆北山地区坡十镁铁-超镁铁岩体的岩石学特征及其对成矿作用的指示[J]. 岩石学报, 27(12): 3627-3639.

孙赫, 秦克章, 李金祥, 徐兴旺, 三金柱, 丁奎首. 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: 606-617.

孙涛, 钱壮志, 汤中立, 何克, 孙亚莉, 王建中, 夏明哲. 2010. 新疆葫芦铜镍矿床锆石U-Pb年代学、铂族元素地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 26(11): 3339-3349.

孙燕, 慕纪录, 肖渊甫. 1996. 新疆香山铜镍硫化物矿床浅富矿体特征[J]. 矿物岩石, 16(1): 51-57.

汤中立, Barnes S J. 1998. 岩浆硫化物矿床成矿机制[M]. 北京: 地质出版社, 1-160.

王亚磊, 张照伟, 尤敏鑫, 李鑫, 李佩, 王博林. 2015. 东天山白鑫滩铜镍矿锆石U-Pb年代学、地球化学特征及对Ni-Cu找矿的启示[J]. 中国地质, 42(3): 452-467.

王玉往, 王京彬, 王莉娟, 龙灵利. 2009. 新疆香山铜镍铁矿区两个镁铁-超镁铁岩系列及特征[J]. 岩石学报, 25(4): 888-900.

王玉往, 王京彬, 王莉娟, 彭晓明, 惠卫东, 秦全新. 2006. 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, 80(1): 61-73.

夏明哲. 2009. 新疆东天山黄山岩带镁铁-超镁铁质岩石成因及成矿作用[D]. 陕西: 长安大学.

夏昭德, 夏明哲, 范亚洲. 2015. 新疆北山地区红石山岩体橄榄石与铬尖晶石成分特征及成因意义[J]. 新疆地质, 33(1): 33-40.

肖凡, 王敏芳, 姜楚灵, 杨武胜. 2013. 东天山香山铜镍硫化物矿床铂族元素地球化学特征及其意义[J]. 地质科技情报, 32(1): 123-138.

肖庆华, 秦克章, 唐冬梅, 苏本勋, 孙赫, 三金柱, 曹明坚, 惠卫东. 2010. 新疆哈密香山西铜镍-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, 26(2): 503-522.

肖庆华. 2010. 新疆东天山香山西铜镍-钛铁复合型矿床成因研究及意义[D]. 北京: 中国科学院研究生院.

徐刚, 汤中立, 王亚磊, 闫海卿, 焦建刚, 王建中. 2012. 甘肃北山黑山岩浆铜镍硫化物矿床橄榄石特征及成因意义[J]. 矿床地质, 31(5): 1075-1086.

徐义刚. 1993. 适用于幔源包体的地质温度计[J]. 岩石学报, 9(2): 167-180.

张招崇, 肖序常, 王军, 王永, 罗照华. 2005. 西昆仑普鲁新生代火山岩的矿物化学特征及其对岩浆程的约束[J]. 矿物学报, 25(3): 237-248.

竺国强, 杨树锋, 陈汉林. 1996. 黄山铜镍矿成矿带构造控岩控矿模式初探[J]. 矿物岩石, 16(1): 86-93.

2016年度地质科学类期刊前30名影响因子排序表

序号	刊物名称	影响因子	序号	刊物名称	影响因子
1	第四纪研究	2.585	16	中国地质灾害与防治学报	0.858
2	石油实验地质	2.213	17	地层学杂志	0.840
3	地质学报	2.166	18	地质通报	0.768
4	岩石学报	1.705	19	地质科技情报	0.736
5	中国地质	1.391	20	世界地质	0.733
6	地质论评	1.349	21	岩石矿物学杂志	0.711
7	古地学报	1.336	22	地质科学	0.684
8	矿床地质	1.168	23	工程地质学报	0.633
9	沉积学报	1.098	24	物探与化探	0.557
10	中国岩溶	1.047	25	高校地质学报	0.541
11	大地构造与成矿学	0.971	26	矿物岩石	0.513
12	岩矿测试	0.944	27	微体古生物学报	0.468
13	水文地质工程地质	0.919	28	海洋地质与第四纪地质	0.458
14	地质与勘探	0.914	29	西北地质	0.434
15	现代地质	0.873	30	新疆地质	0.351

注:表中数据引自中国科学技术信息研究所编《2017年版中国科技期刊引证报告(核心版)》,北京:科学技术文献出版社。