

王敏芳, 夏庆霖, 肖凡, 等. 新疆东天山土墩基性-超基性杂岩体橄榄石成分特征及其成因意义[J]. 中国地质, 2014, 41(5): 1452-1463.  
Wang Minfang, Xia Qinglin, Xiao Fan, et al. Composition features and genetic significance of olivine from the Tudun mafic-ultramafic complex, East Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. Geology in China, 2014, 41(5): 1452-1463(in Chinese with English abstract).

# 新疆东天山土墩基性-超基性杂岩体橄榄石成分特征及其成因意义

王敏芳<sup>1,2</sup> 夏庆霖<sup>1,2</sup> 肖凡<sup>3</sup> 郭晓南<sup>1</sup> 王伟<sup>1</sup> 刘坤<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学资源学院, 湖北 武汉 430074; 2. 地质过程与矿产资源国家重点实验室 中国地质大学, 湖北 武汉 430074;  
3. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 橄榄石通常是玄武质岩浆最早结晶出的矿物之一, 其化学成分可以很好地反演母岩浆成分、岩浆结晶分异、硫化物熔离等成岩及成矿信息。本文以土墩镁铁质-超镁铁质杂岩体为研究对象, 采用电子探针对岩体中的橄榄石矿物颗粒进行化学成分测试。利用橄榄石的Fo值和其中Ni含量, 计算得到土墩杂岩体母岩浆中MgO含量约为12.95%, 是一种富镁的玄武质岩浆。同时, 定量模拟结果表明, 土墩杂岩体母岩浆中硫化物熔离几乎与橄榄石结晶作用同时进行, 早阶段由橄榄石结晶(分离结晶程度约2%)而导致硫化物的熔离程度为0.2%。随后, 橄榄石分离结晶程度在6%~7%时, 硫化物熔体的熔离程度仅为0.01%。这些表明土墩杂岩体发生过一定程度的硫化物熔离, 但成矿前景不是很好。此外, 部分数据显示出Ni-Fo的负相关性, 表明少许富铁橄榄石和晶间硫化物熔浆发生了Fe-Ni物质交换反应, 这对橄榄石的成分有重要影响。

**关键词:** 分离结晶; 硫化物熔离; 晶间硫化物熔浆; 成因意义; 橄榄石; 土墩; 新疆

**中图分类号:** P571.1; P581 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2014)05-1452-12

## 1 引言

新疆是中国仅次于甘肃金川、非常重要的岩浆型Cu-Ni-(PGE)硫化物矿床产地, 在东天山一带相继发现了一批大、中型岩浆型铜镍硫化物矿床, 包括土墩、黄山西、黄山东、香山、葫芦、图拉尔根、白石泉、天宇等铜镍岩浆硫化物矿床(点), 构成了黄山-镜儿泉铜镍成矿带, 镍总储量达百万t(图1)<sup>[1-4]</sup>。目前, 对于该成矿带内含矿岩体年代学<sup>[5-9]</sup>、岩石学<sup>[3,10]</sup>和地球化学<sup>[11-19]</sup>等方面做了不少研究工作, 但是对主要造岩矿物的成因意义研究比较薄弱。目前仅对图拉尔

根和黄山东大型铜镍赋矿岩体<sup>[20-22]</sup>开展了相应研究, 但对地球化学性质和成岩成矿年代学特征相似的土墩、香山等中型铜镍硫化物矿床的赋矿岩体却未有报道, 因此本文选择中等规模的土墩铜镍硫化物矿床开展其赋矿岩体的橄榄石成因研究, 旨在通过对不同规模铜镍硫化物矿床赋矿岩体的对比研究, 进而有利于对中等规模矿床的资源前景进行评价。

在镁铁质-超镁铁质岩浆结晶分离作用中, Ni和Mg表现出相容性元素性质, 倾向于进入橄榄石等结晶相中。由于成矿元素Ni在硅酸盐矿物和硫

收稿日期: 2013-09-06; 改回日期: 2014-01-13

基金项目: 中国地质调查局计划项目(1212011085466、12120114016601)、国家自然科学基金面上项目(41272097)、地质过程与矿产资源国家重点实验室 开放课题(GPMR201006)和中央高校基本科研业务费专项资金(CUG120702)联合资助。

作者简介: 王敏芳, 女, 1980年生, 副教授, 矿床学专业; E-mail: wang\_minfang@163.com。

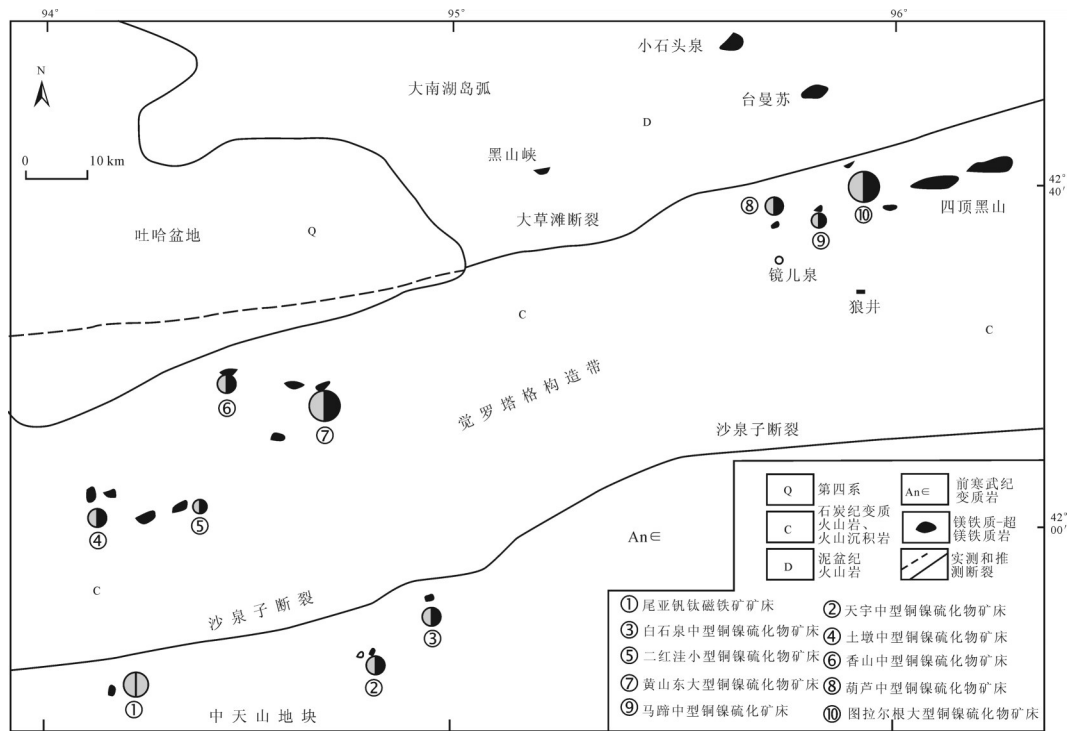


图1 东天山黄山—镜儿泉铜镍成矿带矿床分布位置图(据文献[3])

Fig.1 Distribution of Cu-Ni sulfide deposits in the Huangshan-Jingerquan metallogenic belt, East Tianshan Mountains, Xinjiang (after reference [3])

化物中分配系数差异明显,当岩浆体系达到硫饱和并发生硫化物熔体熔离时,橄榄石中Ni含量将明显亏损,而岩浆体系处于硫不饱和状态时,橄榄石中Ni含量与Fo值则主要受母岩浆成分影响。因此,橄榄石作为岩浆最早结晶出来的矿物之一,其化学组分不是恒定不变的,不仅受母岩浆成分约束,而且还受橄榄石结晶分离程度和硫化物熔离时间的影响。除此之外,结晶分离的橄榄石与晶间熔浆的物质再交换也会引起其组分的改变<sup>[22,23]</sup>。所以,发育有铜镍矿化的镁铁质-超镁铁质杂岩体中橄榄石成分的变化特征蕴含着丰富的成岩成矿作用信息。因此,本文通过对赋矿的土墩杂岩体中橄榄石开展化学成分特征研究,定量模拟计算了岩浆分离结晶过程和硫化物熔离成矿的信息,进而判断母岩浆性质,探讨橄榄石成分与母岩浆成分、岩浆结晶分异和硫化物熔离之间的内在联系。

## 2 岩体地质特征

土墩基性-超基性杂岩体位于天山地槽褶皱

带北天山优地槽,觉罗塔格复背斜苦水向斜东山口—双岔沟背斜的北翼,干洞大断裂带(F<sub>12</sub>)附近,侵位于中石炭统梧桐窝子组,面积0.98 km<sup>2</sup>,地表为不规则的椭圆形,岩体向南倾伏,向下逐渐变缓,下盘上板倾角为60°~70°,向下略有变缓之势,空间上形似一不规则的透镜状单斜岩体<sup>[24]</sup>(图2)。

土墩基性-超基性杂岩体侵入时代是海西期晚期(锆石U-Pb年龄(298.4±0.9) Ma,另文发表),是一个分次侵入形成的复式岩体,分南岩体和北岩体,边部有辉长岩环绕。南部岩体为单辉辉橄岩-单辉橄橄岩型,北部为二辉橄橄岩-单辉橄橄岩型,其间有辉长岩插入。岩体地表有10~20 m深的风化壳,南岩体从中部向外,依次有硅化、碳酸盐化、粘土化或高岭土地带;北岩体普遍有碳酸盐化现象。

南岩体具有侧向分异特征,从中心向边缘依次为单辉橄橄岩相→含长单辉橄橄岩相→辉长岩相;北岩体结晶分异具韵律旋回特点,从顶板到底板依次为含长单辉角闪橄橄岩相→含长方辉角闪橄橄岩相→含长单辉橄橄岩角闪辉石岩相。各岩体岩相

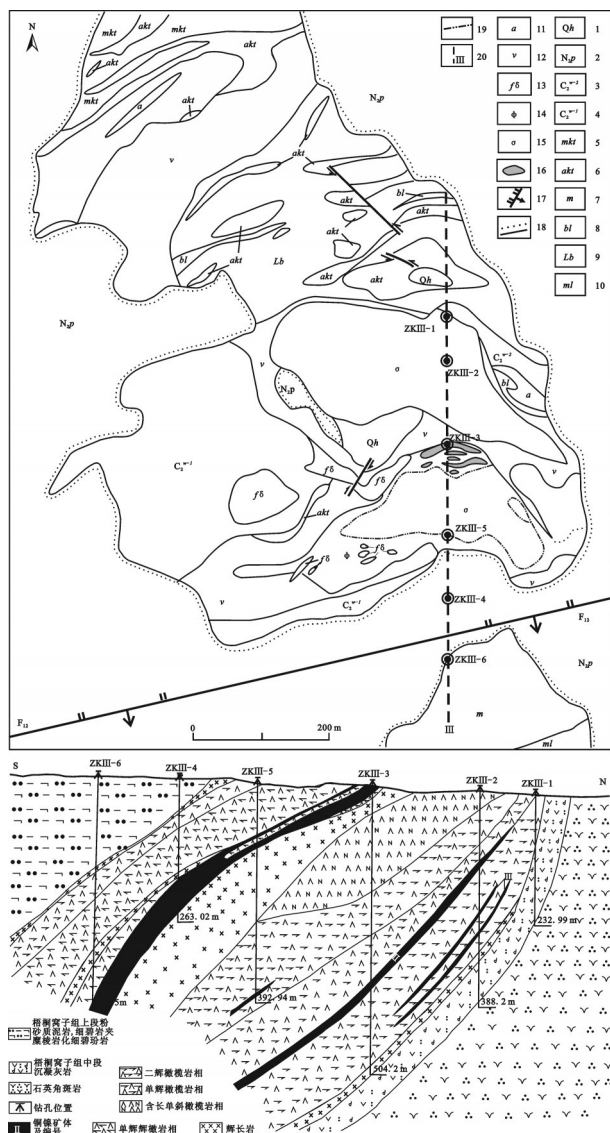


图2 土墩矿区地质简图及勘探线剖面图(据文献[24])  
 1—第四系洪积松散砂土;2—中新世橙红色粉砂质泥岩、白色砾岩;  
 3—上石炭统沉凝灰岩夹火山角砾岩、含炭硅质板岩;4—上石炭统  
 角斑岩、糜棱岩化角斑岩、石英角斑岩夹沉火山角砾凝灰岩;  
 5—糜棱岩化角斑岩;6—石英角斑岩;7—糜棱岩化细碧玢岩;  
 8—沉凝灰岩;9—沉火山角砾岩;10—糜棱岩;11—石英脉;  
 12—中粗粒辉长岩;13—细粒闪长岩;14—辉橄岩;15—橄辉岩;  
 16—矿体;17—断层;18—不整合/整合地质界线;19—岩相界线;  
 20—勘探线位置及编号

Fig.2 Geological map of the Tudun Cu-Ni sulfide deposit (after reference [24])

- 1-Quaternary alluvial loose sand; 2-Miocene pink sandy mudstone, white conglomerate; 3-Upper Carboniferous sedimentary tuff intercalated with volcanic breccia, coal-bearing siliceous slate; 4-Upper Carboniferous keratophyre, mylonitized keratophyre, quartz keratophyre intercalated with sedimentary volcanic breccia tuff; 5-Mylonitized keratophyre; 6-Quartz keratophyre; 7-Mylonitized spilite porphyrite; 8-Sedimentary tuff; 9-Sedimentary volcanic breccia; 10-Mylonite; 11-Quartz vein; 12-Medium-coarse grained gabbro; 13-Fine-grained diorite; 14-Pyroxene peridotite; 15-Peridotite; 16-Orebody; 17-Fault; 18-Unconformity/conformity; 19-lithofacies boundary; 20-Exploration line and its number

之间成过渡关系,而南岩体与北岩体之间野外尚未见到明确的相互关系,同时与环绕在南、北岩体周围的辉长岩之间,三者之间接触关系不明。前人依据同位素年龄和岩石学、矿物学及岩石化学方面的特征,确定不同岩性具先后侵入次序,北岩体为第1次,辉长岩为第2次,南岩体为第3次<sup>[24]</sup>。

超基性岩主要矿物成分有橄榄石、普通辉石、紫苏辉石、古铜辉石,其次有角闪石、基性斜长石,副矿物有铬铁矿、榍石以及黄铜矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿等;基性岩主要矿物为辉石、斜长石,其次有普通角闪石、橄榄石,副矿物有磁铁矿、磷灰石,以及黄铁矿、镍黄铁矿、黄铁矿等金属硫化物。岩石具半自形—自形晶粒状结构、变余嵌晶结构、辉长结构等。各种岩石都有不同程度的蚀变现象,蚀变矿物主要有蛇纹石、绿泥石、纤闪石等。

笔者曾经对土墩岩体开展了详细的岩石地球化学特征研究,结果表明土墩岩体属于拉斑玄武岩系列,岩浆在岩浆房和/或侵位过程中存在着分离结晶作用。同时,稀土元素配分曲线为LREE富集的右倾型,暗示在岩浆演化过程中存在着橄榄石和辉石的分离结晶,而明显不同于蛇绿岩套中岩石的LREE亏损的分布模式<sup>[25]</sup>。

前人研究表明,土墩铜镍硫化物矿床与土墩基性—超基性岩有空间上和成因上的联系<sup>[22]</sup>,南岩体由于分异程度高,因此矿化比较富集。矿石类型主要有稀疏浸染状矿石、稠密浸染状矿石及块状矿石3种类型,金属矿物主要有磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、铬铁矿、磁铁矿等,非金属矿物主要有橄榄石、辉石、普通角闪石、斜长石等<sup>[25]</sup>。

### 3 样品采集和测试方法

本次研究的样品均采自土墩矿床南部主含矿岩体矿石堆,室内详细的岩相学研究表明,拟测试样品中均含有含量不等的新鲜橄榄石矿物颗粒,考虑到蚀变作用会对橄榄石的成分造成影响,因此在实验测试中,均选择偏离矿物裂隙和矿物边缘的位置进行电子探针微区分析。橄榄石成分测试在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)的EPMA实验室完成,电子仪器型号为日本JXA-8100,工作加速电压15 kV,电流20 nA,分析束直径为10 $\mu$ m,寻峰时间为10 s。分析时所用标



样为美国生产的标样 SPI#2753-abAB, 分析精度为 0.01%。

#### 4 橄榄石的矿物学特征

如前所述,土墩矿床的铜镍矿化主要与南岩体有关,因此本次重点开展对南岩体不同岩相中橄榄石的矿物学特征研究。镜下观察发现,橄榄石主要赋存在单辉辉橄岩和含长单辉橄岩相中。其中,橄橄榄岩相主要矿物为橄榄石 75%~80%、单斜辉石 5%~10%,基性斜长石 15%,普通角闪石 1%~2%,以及微量的金属矿物;辉橄岩相主要矿物为橄榄石

50%~65%,普通辉石 25%~35%,角闪石 1%~5%,斜长石 <5%,金属矿物 2%~5%。

辉橄岩相分布于南岩体中部,延深稳定,为南岩体的主要岩相,局部相变为斜辉辉橄岩和蛇纹石化纯橄橄榄岩。岩石呈黑灰色、半自形粒状结构、块状构造(图 3-a)。橄榄石含量较多,颗粒大,常呈自形一半自形粒状结构,蚀变微弱,颗粒间隙分布有辉石、角闪石或斜长石等。橄橄榄岩相呈环带状分布于南岩体辉橄岩相的周围,呈深灰色、暗灰绿色,半自形粒状结构,块状构造。橄橄榄石颗粒大,具半自形粒状—浑圆状结构、堆晶结构发育(图 3-b),在橄

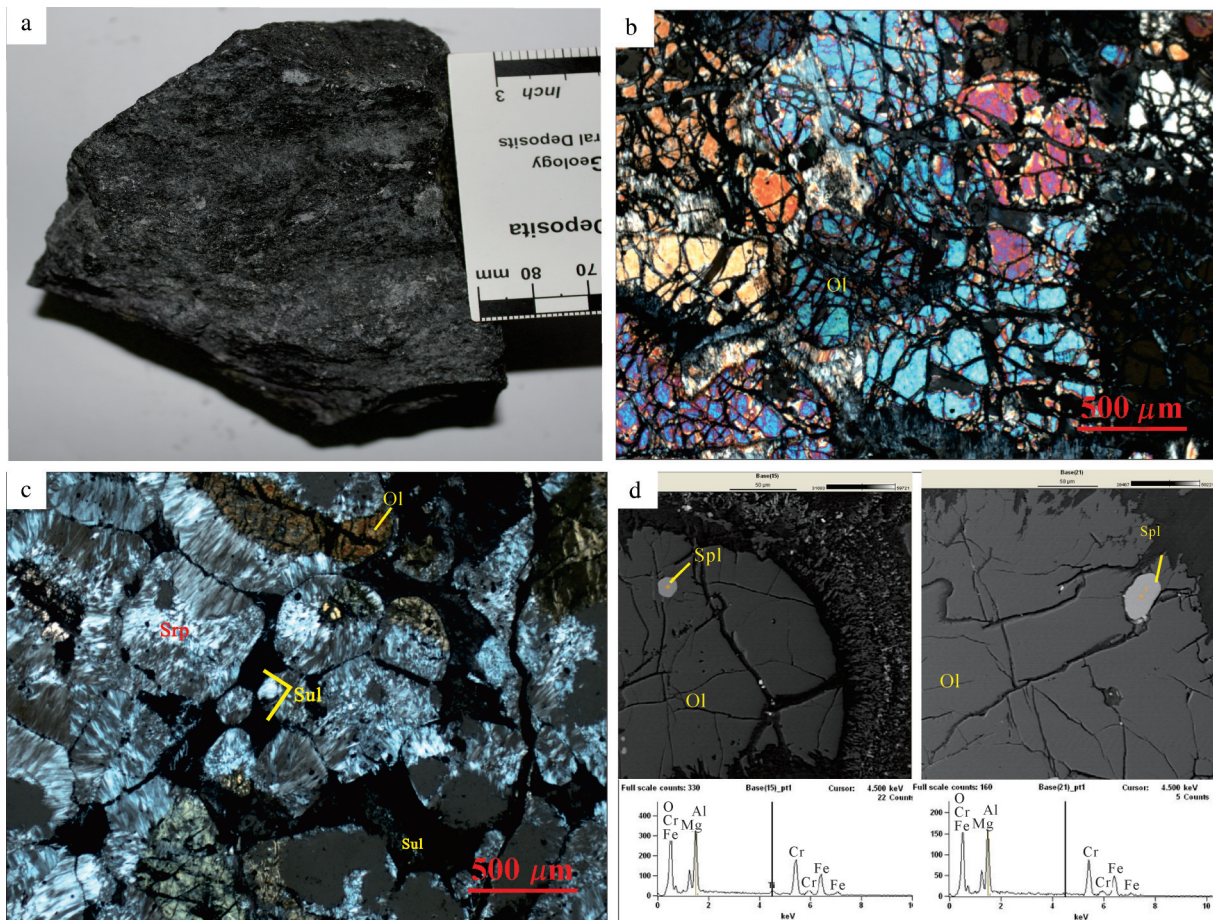


图3 土墩岩体岩石学特征

a—土墩辉橄岩手标本照片,岩石呈黑灰色、半自形粒状结构、块状构造;b—土墩橄橄榄岩中橄榄石堆晶结构,正交偏光;c—沿橄橄榄石裂隙及边缘发育较强蛇纹石化,且在橄橄榄石晶间有较多金属硫化物,正交偏光;d—土墩橄橄榄石中尖晶石包体的BSE图像及能谱  
Ol—橄橄榄石;Cpx—单斜辉石;Hbl—角闪石;Opx—斜方辉石;Spl—尖晶石;Srp—蛇纹石;Sul—金属硫化物

Fig.3 Selected photos showing textures of rocks from the Tudun mafic-ultramafic complex

a—Photograph showing textures of rocks from the Tudun mafic-ultramafic complex; b—Olivine cumulus texture, crossed nicols; c—Serpentinization along fissures and fringes of olivine, filled with sulfide, crossed nicols, spectrum

Abbreviations: Ol—Olivine; Cpx—Clinopyroxene; Hbl—Hornblende; Opx—Orthopyroxene; Spl—Spinel; Srp—Serpentine; Sul—Sulfide

榄石裂隙及边缘发生蛇纹石化,且晶间有较多金属硫化物(图3-c),橄榄石中见到尖晶石矿物包裹体(图3-d)。

## 5 分析结果

电子探针分析数据表明,土墩岩体橄榄石均为贵橄榄石,Fo值介于82.0%~84.7%,Ni含量为 $1172 \times 10^{-6}$ ~ $2493 \times 10^{-6}$ ,其化学成分见表1。根据镜下鉴定结果,在TD10(蛇纹石化橄榄岩)和TD16(蛇纹石化辉橄岩)样品中见到少量辉石和角闪石,且橄榄石多发生了蛇纹石化,而样品TD14(橄橄岩)中几乎全为橄榄石,且橄榄石很新鲜,几乎没有发生蚀变,因此,认为TD14在3个样品中的基性程度相对最高,这与岩石地球化学分析的数据也是一致的<sup>[25]</sup>。电子探针测试数据表明,TD14的Fo值介于84.3%~84.7%,而TD10和TD16样品的Fo值分别介于84.1%~84.5%和82.0%~82.6%,这与室内岩相学观察结果是吻合的。一般认为,随着岩浆演化作用的进行,岩浆中MgO逐渐减少,FeO相对增加,因此形成的橄榄石的Fo值也逐渐变小。

测试结果表明,3个不同岩性样品中Ni的含量也具有一定的变化范围,TD16(蛇纹石化辉橄岩)中Ni含量为 $1172.1 \times 10^{-6}$ ~ $1683.5 \times 10^{-6}$ ,TD10(蛇纹石化橄橄岩)中Ni含量为 $1612.7 \times 10^{-6}$ ~ $2493.7 \times 10^{-6}$ ,TD14(橄橄岩)中Ni含量为 $1305.9 \times 10^{-6}$ ~ $1714.9 \times 10^{-6}$ 。整体上具有基性程度高的岩石Ni含量相对较高。

## 6 讨 论

### 6.1 母岩浆性质

矿物是成岩成矿的最终产物,其蕴含的成矿作用信息非常丰富,而橄榄石作为玄武质岩浆最早结晶出来的矿物之一,其成分特征不仅能探讨岩浆结晶演化过程,而且能提供丰富的成矿信息<sup>[23,26-30]</sup>。因此,本文根据橄榄石—熔体平衡原理<sup>[31]</sup>和质量平衡原理,利用橄榄石成分以及以橄榄石为主要堆积矿物的岩石的MgO含量与其他氧化物含量的关系,进一步计算得出土墩杂岩体的母岩浆成分<sup>[32]</sup>。

Roeder and Emslie(1970)通过实验研究<sup>[31]</sup>,发现原始岩浆在结晶过程中,橄榄石与熔浆之间的铁镁交换遵循一定的分配系数:

$$K_D = X(\text{FeO/MgO})^{\text{Ol}} / X(\text{FeO/MgO})^{\text{Melt}} \quad (1)$$

其中, $X(\text{FeO/MgO})^{\text{Ol}}$ 表示,Fe、Mg在橄榄石中的摩尔分数比值, $X(\text{FeO/MgO})^{\text{Melt}}$ 表示,Fe、Mg在熔体中的摩尔分数。

然而, $K_D$ 受温度、压力及岩浆成分的影响较小,可以视为常量,通常取值0.30。

由于早期结晶的橄榄石与晶间残余熔体之间要发生再平衡作用,使得早期结晶的橄榄石中镁含量会比在原生岩浆中结晶橄榄石的镁含量低。因此,认为Fo值最高的橄榄石的组成可能更接近于液相线橄榄石的组成。从表1可知,土墩岩体样品中,橄榄石实测Fo的最高值为84.7%,依据公式<sup>[23]</sup>:

$$w_{\text{MgO}}/w_{\text{FeO}} = 0.56095 \times K_D \times \text{Fo} / (1 - \text{Fo}) \quad (2)$$

计算出与其共存的熔体的 $\text{MgO/FeO}^{\text{T}} = 0.93$ (按质量百分比计算, $\text{FeO}^{\text{T}}$ 为全铁),远远小于岩体全岩样品的 $\text{MgO/FeO}^{\text{T}}$ 比值(均大于1.2<sup>[25]</sup>),表明各岩石的成分不能代表共存的熔体成分,进入浅部岩浆房的母岩浆中有过剩的橄榄石堆晶的加入,母岩浆可能是经过了深部橄榄石结晶的演化岩浆。与Fo值最大的橄榄石相平衡的熔体,假设其 $\text{FeO}^{\text{T}}$ 即为岩石的 $\text{FeO}^{\text{T}}$ 含量13.9%,计算得到母岩浆中MgO含量为12.95%,是一种富镁的玄武岩浆,这与根据Ni/Cu-Pd/Ir图解推测的母岩浆性质是一致的<sup>[25]</sup>。

### 6.2 分离结晶和硫化物熔离

由于 $\text{Ni}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 具有相似的有效离子半径( $\text{Ni}^{2+}$ 为0.070 nm, $\text{Mg}^{2+}$ 为0.072 nm)<sup>[33]</sup>,常呈类质同象进入早结晶的橄榄石晶格。Ni在橄榄石中的化学行为遵循亨利定律,即,当岩浆体系S不饱和时,橄榄石Ni含量受控于硅酸盐母岩浆成分和橄榄石分离结晶过程;当岩浆体系S达到饱和时,Ni是强亲硫元素,其在橄榄石和硅酸盐岩浆之间的分配系数(2.86~13.6)<sup>[34]</sup>远远小于它在硫化物熔体与硅酸盐岩浆间的分配系数(300~1000)<sup>[35]</sup>,因此Ni将优先进入到硫化物相中,导致相应橄榄石中的Ni含量必然显著下降,表现出不同程度的Ni亏损。因此,橄榄石中Ni含量不仅反映母岩浆成分的信息,还记录了母岩浆结晶分异、硫化物熔离以及后期物质交换等成矿信息<sup>[23,36]</sup>。此外,橄榄石中Ni含量还受到间隙硅酸盐熔浆或与硫化物熔体的再平衡作用的影响<sup>[37]</sup>。

为了弄清土墩杂岩体橄榄石中Ni含量的成因意义,在橄榄石结晶硫化物熔离模型的基础上,结



表1 土墩岩体橄榄石氧化物成分(%)及Ni含量( $10^{-6}$ )  
Table 1 Oxide (%) and Ni ( $10^{-6}$ ) content of olivine from the Tudun intrusion

样品编号	岩石名称	点号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	FeO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	NiO	Total	Fo	Ni	
TD16	蛇纹石化 辉橄岩	OI-1	37.88	0.03	0.04	0.02	-	-	0.03	43.62	17.09	-	0.24	0.17	99.13	82.1	1321.6	
		OI-2	38.53	0.03	0.05	0.01	-	-	-	43.42	17.12	-	0.22	0.15	99.53	82.0	1172.1	
			OI-3	38.08	0.04	0.01	-	0.02	-	0.01	43.59	17.04	-	0.23	0.16	99.17	82.2	1227.2
			OI-4	36.93	0.03	0.04	-	-	0.01	0.01	43.42	17.07	-	0.24	0.16	97.89	82.1	1274.4
			OI-5	38.60	0.04	0.03	-	0.01	0.02	0.01	43.70	16.55	0.01	0.25	0.16	99.35	82.6	1235.1
			OI-6	36.93	0.03	0.04	-	-	0.01	0.01	43.42	17.07	-	0.24	0.16	97.89	82.1	1274.4
			OI-7	38.18	0.05	0.05	0.04	0.02	-	0.03	43.41	17.09	-	0.27	0.19	99.32	82.1	1486.8
			OI-8	38.23	0.04	0.03	0.01	0.02	-	0.07	43.55	17.14	-	0.24	0.15	99.47	82.1	1203.6
			OI-9	38.36	0.03	0.06	-	-	-	0.02	43.43	16.84	-	0.21	0.16	99.10	82.3	1219.3
			OI-10	38.11	0.02	0.01	-	0.04	-	-	43.96	16.97	-	0.24	0.17	99.51	82.3	1368.8
			OI-11	38.23	0.04	0.04	-	-	-	0.05	43.68	16.93	-	0.22	0.21	99.40	82.3	1683.5
			OI-12	38.26	0.04	0.03	0.02	-	-	-	43.66	17.16	-	0.23	0.19	99.57	82.1	1455.3
TD10	蛇纹石化 橄橄岩	OI-1	38.05	0.04	0.04	-	-	0.01	0.04	45.11	15.08	-	0.25	0.21	98.83	84.3	1612.7	
		OI-2	39.13	0.02	0.04	-	-	-	0.03	44.86	15.24	-	0.16	0.25	99.73	84.1	1958.8	
			OI-3	39.24	0.06	0.03	0.02	0.02	-	0.02	44.86	14.91	-	0.22	0.28	99.66	84.4	2163.3
			OI-4	38.74	0.08	0.06	0.01	-	-	0.04	44.66	15.09	0.01	0.26	0.32	99.26	84.2	2493.7
			OI-5	38.91	0.04	0.05	0.05	0.01	-	0.04	45.08	14.99	0.02	0.23	0.27	99.68	84.4	2155.5
			OI-6	38.65	0.03	0.04	0.03	-	0.01	-	45.03	14.93	-	0.20	0.25	99.16	84.4	1998.1
			OI-7	38.96	0.06	0.05	-	-	-	0.04	44.94	15.06	-	0.25	0.30	99.65	84.3	2320.7
			OI-8	38.98	0.04	0.04	0.01	-	-	0.07	44.97	14.90	-	0.20	0.25	99.45	84.5	1943.1
			OI-9	39.30	0.04	0.04	-	-	-	0.04	45.06	14.96	0.01	0.24	0.28	99.96	84.4	2179.1
			OI-10	39.19	0.08	0.03	0.02	-	-	0.06	44.83	15.19	0.01	0.24	0.29	99.93	84.2	2242.0
			OI-11	38.21	0.03	0.07	0.01	0.01	-	0.01	45.26	15.23	0.01	0.22	0.29	99.33	84.3	2312.8
			OI-12	38.03	0.04	0.05	-	-	-	0.03	45.03	15.17	-	0.19	0.27	98.82	84.2	2124.0
			OI-13	38.23	0.04	0.03	0.02	-	-	0.06	45.16	15.06	-	0.21	0.26	99.07	84.4	2013.9
TD14	橄橄岩	OI-1	39.40	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	45.25	14.67	0.01	0.19	0.22	99.84	84.7	1714.9	
		OI-2	38.80	0.06	0.02	-	-	0.01	0.01	45.49	14.74	0.01	0.19	0.17	99.51	84.7	1345.2	
		OI-3	38.93	0.01	0.04	0.02	0.01	0.01	0.03	45.12	14.82	-	0.20	0.19	99.39	84.6	1455.3	
		OI-4	38.56	0.03	0.03	-	-	0.01	0.02	45.43	14.87	-	0.19	0.20	99.35	84.6	1534.0	
		OI-5	38.64	0.02	0.03	-	0.04	-	0.04	45.07	14.93	-	0.19	0.18	99.13	84.5	1376.7	
		OI-6	38.13	0.01	0.05	-	-	0.01	0.02	45.51	14.99	-	0.19	0.18	99.09	84.5	1423.9	
		OI-7	38.41	0.07	0.04	0.01	-	-	0.03	45.17	15.02	-	0.22	0.20	99.17	84.4	1557.6	
		OI-8	38.29	0.02	0.03	0.01	-	-	-	45.35	15.10	-	0.21	0.17	99.17	84.4	1305.9	
		OI-9	38.06	0.03	0.05	0.01	-	-	0.08	45.20	14.82	-	0.23	0.17	98.66	84.6	1321.6	
		OI-10	38.46	0.03	-	0.01	-	-	0.03	45.44	15.23	0.01	0.19	0.17	99.57	84.3	1360.9	
		OI-11	38.53	0.03	0.04	0.05	-	0.01	0.08	45.23	14.94	-	0.21	0.20	99.32	84.5	1589.1	

注:测试在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室EPMA实验室完成,仪器型号为日本JXA-8100,工作加速电压20 kV,电流20 nA,分析束直径为10 $\mu$ m,寻峰时间为10 s,分析精度为0.01%;“-”代表低于检测限。

合试验学数据,定量研究了硫化物熔离对含矿岩体中橄榄石中Ni含量的影响<sup>[38]</sup>。如前所述,橄榄石中的Ni含量严格受控于母岩浆成分和硫化物熔离,因此,依据硫化物熔离发生的时间不同,通常可以将橄榄石结晶过程中橄榄石Ni含量的定量计算分为以下3种情况:(1)在橄榄石结晶的整个过程中,岩浆始终保持着S不饱和,即没有硫化物的熔离;(2)在橄榄石结晶之前,母岩浆就已经达到S饱和,因此橄榄石在结晶过程中,伴随着硫化物熔体从硅酸盐岩浆中的分离;(3)在橄榄石结晶之前,母岩浆尚未S饱和,而在橄榄石结晶过程中S逐渐达到饱和,开始有硫化物的熔离。由于土壤岩体中橄榄石矿物内无硫化物包裹体,但辉石、角闪石等较晚结晶的矿物中含有硫化物的珠滴,说明硫化物的熔离不会在橄榄石结晶之前发生<sup>[24,25]</sup>。因此,本文仅需要考虑橄榄石结晶与硫化物熔离同时发生和橄榄石结晶后硫化物熔离发生这2种情况。

然而,在定量模拟之前,首要任务是需要对模拟参数进行确定(表2)。此外,这种定量模拟还基于2个最基本的假设:(1)在没有外来物质的加入时,在封闭岩浆房的特殊环境中,岩浆S达到饱和时,结晶的橄榄石与因结晶而出熔的硫化物熔体之间的质量比近似为恒<sup>[38]</sup>;(2)假设Al、Na、Ti和K既不进入橄榄石也不进入硫化物熔体,而且Mg、Si、Ca和Cr也不进入硫化物熔体。

橄榄石中Ni含量与硅酸盐岩浆中Ni含量之间关系可用瑞利分馏定律来描述<sup>[31]</sup>:

$$C_L^i = C_0^i F^{(D-1)} \quad (3)$$

式中: $C_L^i$ 和 $C_0^i$ 分别代表微量元素i在残余岩浆和初始岩浆中的浓度; $F$ 是初始岩浆分离结晶作用后剩余的份额(结晶度或固结程度); $D$ 是元素i在结晶相和熔体之间的总分配系数,由下式计算得到<sup>[31]</sup>:

$$D = X_\alpha K^{\alpha/L} + X_\beta K^{\beta/L} + \dots \quad (4)$$

其中, $X_\alpha$ 为结晶相中 $\alpha$ 矿物的百分含量; $K^{\alpha/L}$ 为元素i在矿物 $\alpha$ 和熔体L之间的分配系数。

定量模拟计算岩浆分离结晶和硫化物熔离过程的计算方法详见文献<sup>[27]</sup>。简言之,首先根据橄榄石中Fo值的定义<sup>[23]</sup>:

$$Fo = X(\text{MgO})^{01} / (X(\text{FeO})^{01} + X(\text{MgO})^{01}) \quad (5)$$

其中, $X(\text{MgO})^{01}$ 、 $X(\text{FeO})^{01}$ 分别表示Mg、Fe在橄榄石中的摩尔分数。

计算橄榄石不同结晶分异程度下的橄榄石Fo值。

而后,首先假定S饱和母岩浆中橄榄石分离结晶量与其结晶导致出熔的硫化物量之间的质量比值(OI/Sul),即上文所述的定量模拟计算的假设前提之一,然后给定橄榄石分批结晶的微小增量R值(即橄榄石结晶程度增量值),再依据Ni在橄榄石与硅酸盐岩浆中的分配系数(通常为7),由母岩浆成分中的Ni值计算获得与其对应结晶出的橄榄石的Ni含量(详细步骤见文献<sup>[27]</sup>)。

通过上述步骤,对土壤杂岩体中橄榄石的分离结晶过程中无硫化物熔离(曲线I)、分离结晶和硫化物熔离同时发生(曲线IIa),以及结晶过程中发生硫化物熔离(曲线IIb)3种情况的橄榄石Ni含量分别进行了模拟计算(图4)。

图4中I号曲线为橄榄石在不同结晶分异程度下Ni含量的变化曲线,可以看出随着结晶分异程度的增加,橄榄石中Fo值逐渐降低,同时Ni含量也逐渐降低。如果岩浆在橄榄石结晶时没有发生硫化物熔离,则橄榄石中Ni含量在Ni-Fo图中将投影在橄榄石分离结晶曲线上;相反,如果橄榄石Ni含量在分离结晶趋势线下,说明橄榄石实际结晶过程中有硫化物熔离作用发生<sup>[23,38]</sup>。本次土壤杂岩体中橄榄石的实测数据绝大多数投影在橄榄石分离结晶曲线之下,表明在橄榄石实际结晶过程中有硫化物

表2 橄榄石分离结晶、硫化物熔体熔离的定量模拟参数

Table 2 Modeling parameters of olivine fractional crystallization, sulfide segregation effect

模拟参数	参数取值	参数含义	数据来源
$K_D$	0.3	Mg <sup>2+</sup> 和Fe <sup>2+</sup> 在橄榄石与硅酸盐岩浆之间的分配系数	[31]
$D^{olv/sil}$	7	Ni在橄榄石与硅酸盐岩浆间的分配系数	[23, 36]
$D^{sul/sil}$	500	Ni在硫化物熔体与硅酸盐岩浆间的分配系数	[35]
Ni	330×10 <sup>-6</sup>	母岩浆中的初始Ni含量(本文取拉斑玄武质岩浆平均值)	[30]

熔离作用发生(图4)。

根据本次橄榄石的成分测试数据,我们对橄榄石分离结晶和硫化物熔离同时发生(II a模拟曲线)和橄榄石结晶过程中发生硫化物熔离(II b模拟曲线)分别进行了Ni含量的模拟计算(图4),结果表明:(II a)土墩杂岩体中的橄榄石分离结晶和硫化物的熔离几乎是同时进行的,当橄榄石分离结晶程度达到2%时,由橄榄石分离结晶导致出熔的硫化物熔体与橄榄石的质量比为1:10,导致的硫化物出熔的熔离程度为0.2%,即由分离结晶程度2%的橄榄石(0~2%)导致了0.2%的硫化物熔离;(II b)橄榄石的分离结晶从6%开始,至7%结束,结晶分异程度增量为1%,由橄榄石分离结晶导致出熔的硫化物熔体与橄榄石的质量比为1:100,导致的硫化物熔体出熔程度仅为0.01%。这一计算结果,与同一成矿带上的黄山东(橄榄石结晶分异而导致的硫化物熔

离程度约0.5%)和图拉尔根(橄榄石结晶分异而导致的硫化物熔离程度约0.3%)矿床相比<sup>[22]</sup>,土墩杂岩体的硫化物熔离程度相对较低(0.01%~0.2%),这与区内野外实际观察比较接近,表明土墩杂岩体发生过一定程度的硫化物熔离,但成矿前景不如黄山东和图拉尔根这2个矿床。这与笔者通过对矿石PGE的研究结果相一致<sup>[39]</sup>。

### 6.3 晶间熔浆效应

如前所述,早期结晶的橄榄石成分还会受到堆积后地质过程的影响,如橄榄石在液相线下与晶间熔浆局部再平衡作用<sup>[40-42]</sup>、橄榄石内部融入包裹体与主晶的局部再平衡等<sup>[43]</sup>,其中又以晶间熔浆效应对堆积后橄榄石成分的影响最为显著。因此,橄榄石的成分变化特征可用于定性判断晶间熔浆的类型。

通常来讲,若晶间熔浆为硅酸盐岩浆,橄榄石-熔体平衡会导致橄榄石堆晶的Fo值显著降低,但是

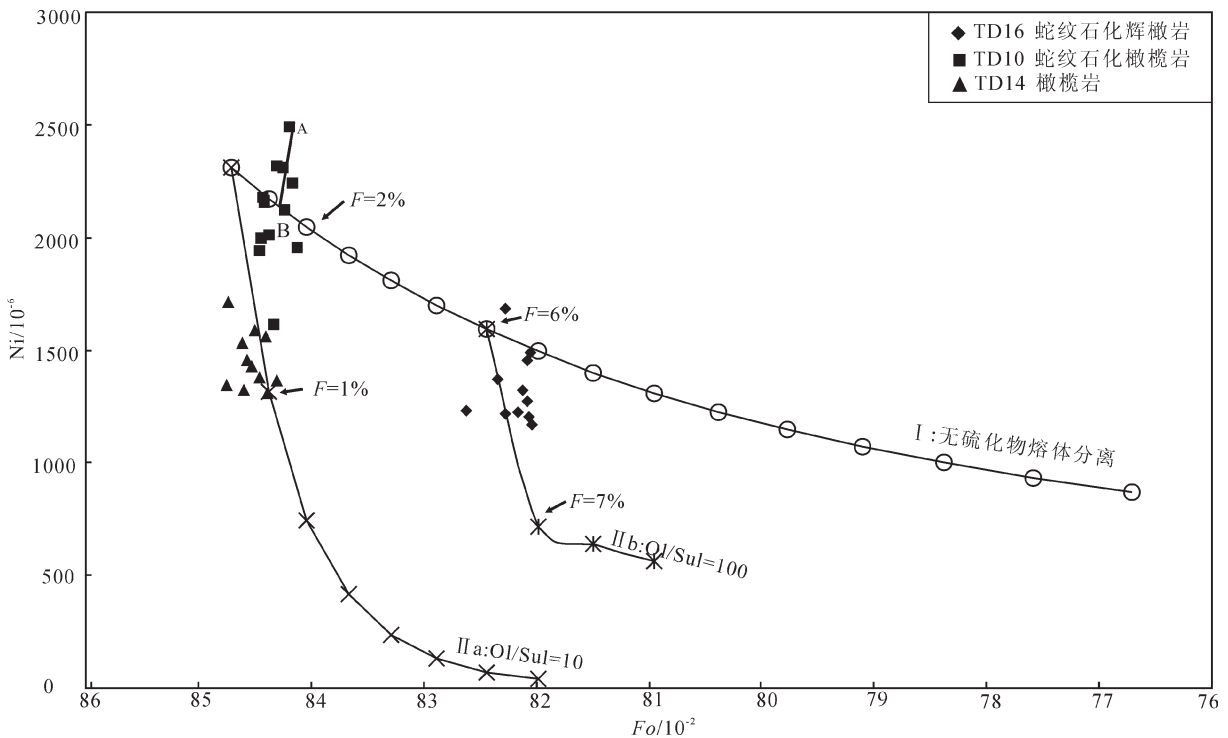


图4 土墩岩体中橄榄石分离结晶、硫化物熔离定量模拟

I—橄榄石分离结晶模拟曲线,F为橄榄石分离结晶程度;II a—橄榄石分离结晶和硫化物熔离同时发生,假定S饱和母岩浆中橄榄石分离结晶量与其结晶导致出熔的硫化物量之间的质量比(Ol/Sul)为10:1;II b—橄榄石分离结晶6%后,出现硫化物熔离,假定S饱和母岩浆中橄榄石分离结晶量与其结晶导致出熔的硫化物量之间的质量比(Ol/Sul)为100:1

Fig. 4 Modeling of olivine fractional crystallization, sulfide segregation effect of the Tudun complex

I—Curve of olivine fractional crystallization, F means fractional crystallization degree; II a—Curve of olivine fractional crystallization and sulfide segregation, the mass ratio of sulfide to olivine is about 10; II b—Curve of olivine fractional crystallization and sulfide segregation, the mass ratio of sulfide to olivine is about 100



并不会改变Ni-Fo之间的正相关关系;反之,若晶间熔浆是硫化物熔浆,则晶体-熔体平衡过程中会发生Ni-Fe交换反应,导致产生负的Ni-Fo相关关系<sup>[38]</sup>。这是因为硫化物熔浆与橄榄石之间的Ni-Fe交换反应可以表示为<sup>[23]</sup>:



该反应的平衡常数为<sup>[23]</sup>:

$$K = K_D (\gamma_{\text{NiS}}/\gamma_{\text{FeS}})^{\text{sulfide}} / (\gamma_{\text{NiO}}/\gamma_{\text{FeO}})^{\text{olivine}} \quad (7)$$

其中,  $K_D = (\text{NiS}/\text{FeS})^{\text{sulfide}} / (\text{NiO}/\text{FeO})^{\text{olivine}}$ ,  $\gamma$ 为活度系数。

在一定的温度、氧逸度、硫逸度和Ni含量条件下,  $K_D$ 是一个常数。因此,当橄榄石和硫化物熔浆发生Ni-Fe交换后,FeO含量高的橄榄石比FeO含量低的橄榄石将会容纳更多的Ni,使得在橄榄石中表现出Ni-Fo负相关关系。

图4中部分橄榄石的Ni含量高于橄榄石结晶线,尤其是橄榄岩样品(TD10),一些Fo值较低的橄榄石Ni含量反而值较高,表现出明显的Ni-Fo负相关关系(图4中A-B曲线),表明少许富铁橄榄石和晶间硫化物熔浆发生了物质交换反应,这与矿物晶间有较多金属硫化物是相符的(图3-c),也与本次得到的“熔离作用持续进行到橄榄石分离结晶7%时结束”的模拟结果相一致。

## 7 结 论

本文通过对新疆东天山成矿带土墩镁铁—超镁铁岩体中橄榄石矿物的化学成分进行系统分析,定量模拟计算了岩浆中橄榄石分离结晶和硫化物熔离的过程,取得了以下主要认识:

(1)土墩岩体母岩浆中MgO含量约为12.95%,是一种富镁的玄武质岩浆,这与根据Ni/Cu-Pd/Ir图解推测的母岩浆性质是一致的。

(2)在岩浆结晶演化过程中,土墩岩体的硫化物熔离几乎与橄榄石结晶作用同时进行,一直持续进行到橄榄石分离结晶7%时为止,由早阶段橄榄石结晶(分离结晶程度0~2%)导致出熔的硫化物熔离程度为0.2%,晚阶段橄榄石结晶(分离结晶程度6~7%)仅导致0.01%硫化物熔离,表明土墩杂岩体发生过一定程度的硫化物熔离,但成矿前景不是很好。

(3)橄榄石的成分变化与岩浆结晶和硫化物熔离有密切关系。此外,少许富铁橄榄石和晶间硫

化物熔浆发生了Fe-Ni物质交换反应,这对橄榄石的成分也有重要影响。

**致谢:**中国地质大学(武汉)张雄华教授和廖群安教授在野外工作中给予了帮助;中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室郑曙老师在橄榄石电子探针测试过程中给予了帮助;审稿专家及编辑部杨艳老师对本文提出了建设性修改意见,在此一并表示衷心的感谢!

## 参考文献 (References):

- [1] 王登红, 李纯杰, 陈郑辉, 等. 东天山成矿规律与找矿方向的初步研究[J]. 地质通报, 2006, 25(8): 910-915.  
Wang Denghong, Li Chunjie, Chen Zhenghui, et al. Metallogenic characteristics and direction in mineral search in the East Tianshan, Xinjiang, China [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(8): 910 - 915 (in Chinese with English abstract).
- [2] 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(2-4): 184-203.
- [3] 秦克章, 丁奎首, 许英霞, 等. 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, 2007, 26(1): 1-14.  
Qin Kezhang, Ding Kuishou, Xu Yingxia, et al. Ore potential of protoliths and modes of Co-Ni occurrence in Tulargen and Baishiquan Cu-Ni-Co deposits, East Tianshan, Xinjiang [J]. Mineral Deposits, 2007, 26(1): 1-14 (in Chinese with English abstract).
- [4] 娄德波, 肖克炎, 王登红, 等. 新疆黄山—镜儿泉地区岩浆型镍铜硫化物矿床远景分析[J]. 中国地质, 2013, 40(4): 1278-1289.  
Lou Debo, Xiao Keyan, Wang Denghong, et al. A prospective analysis of magmatic Ni-Cu sulfide deposits in Huangshan-Jing'erquan area, Xinjiang [J]. Geology in China, 2013, 40(4): 1278-1289 (in Chinese with English abstract).
- [5] Mao J W, Yang J M, Qu W J, et al. Re-Os age of Cu-Ni ores from the Huangshandong Cu-Ni sulfide deposit in the East Tianshan Mountains and its implication for geodynamic processes [J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 2003, 77(2): 220-226.
- [6] Zhang Z H, Mao J W, Du A D, et al. Re-Os dating of two Cu-Ni sulfide deposits in northern Xinjiang, NW China and its geological significance [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2008, 32(2-4): 204-217.
- [7] 李月臣, 赵国春, 屈文俊, 等. 新疆香山铜镍硫化物矿床Re-Os同位素测定[J]. 岩石学报, 2006, 22(1): 245-251.  
Li Yuechen, Zhao Guochun, Qu wenjun, et al. Re-Os isotopic dating of the Xiangshan deposit, East Tianshan, NW China [J].

- Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(1): 245-251.
- [8] Han B, Ji J, Song B, et al. 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, 2004, 49(22): 2424-2429.
- [9] Liu F, Zhang Z X, Li Q, et al. New precise timing constraint for the Keketuohai No. 3 pegmatite in Xinjiang, China, and identification of its parental pluton [J]. Ore Geology Reviews, 2014, 56: 209-219.
- [10] 孙涛, 钱壮志, 汤中立, 等. 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, 2010, 26(11): 3339-3349.
- Sun Tao, Qian Zhuangzhi, Tang Zhongli, et al. Zircon U-Pb chronology, platinum group element geochemistry characteristics of Hulu Cu-Ni deposit, East Xinjiang, and its geological significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(11): 3339-3349 (in Chinese with English abstract).
- [11] 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 Kezhang, Li Jinxiang, 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.
- [12] 柴凤梅. 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), 博士论文, 2006.
- Chai Fengmei. Comparison on Petrologic Geochemistry of Three Mafic-ultramafic Intrusions Associated with Ni-Cu Sulfide Deposits in Northern Xinjiang [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), Ph.D.Thesis, 2006.
- [13] 傅飘儿, 胡沛青, 张铭杰, 等. 新疆黄山铜镍硫化物矿床成矿岩浆作用过程[J]. 地球化学, 2009, 38(5): 432-448.
- Fu Piaoer, Hu Peiqing, Zhang Mingjie, et al. Metallogenic magmatism of Huangshan Cu-Ni sulfide deposit in Xinjiang [J]. Geochimica, 2009, 38(5): 432-448 (in Chinese with English abstract).
- [14] 孙赫, 秦克章, 李金祥, 等. 东天山图拉尔根铜镍钴硫化物矿床岩相-岩石地球化学特征及其形成的构造背景[J]. 中国地质, 2006, 33(3): 606-617.
- Sun He, Qin Kezhang, Li Jinxiang, et al. Petrographic and geochemical characteristics of the Tulargen Cu-Ni-Co sulfide deposit, East Tianshan, Xinjiang, and its tectonic setting [J]. Geology in China, 2006, 33(3): 606-617 (in Chinese with English abstract).
- [15] 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.
- [16] 孙燕, 肖渊甫, 冯伟, 等. 东天山香山铜镍硫化物矿床矿石矿物特征及成矿意义[J]. 中国地质, 2009, 36(4): 871-877.
- Sun Yan, Xiao Yuanfu, Feng Wei, et al. Ore mineral characteristics of the Xiangshan copper-nickel sulfide deposits in East Tianshan Mountains and their metallogenic significance [J]. Geology in China, 2009, 36(4): 871-877 (in Chinese with English abstract).
- [17] 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 Mingzhe, Jiang Changyi, Qian Zhuangzhi, et al. Geochemistry and petrogenesis of Huangshandong intrusion, East Tianshan, Xinjiang [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(8): 2413-2430 (in Chinese with English abstract).
- [18] Deng Y F, Song X Y, Chen L M, et al. Geochemistry of the Huangshandong Ni-Cu deposit in northwestern China: Implications for the formation of magmatic sulfide mineralization in orogenic belts[J]. Ore Geology Reviews, 2014, 56: 181-198.
- [19] Wang Y, Wang J, Wang L, et al. Problems of PGE metallogenesis related to mafic-ultramafic complexes in North Xinjiang, China [J]. Geoscience Frontiers, 2011, 2(2): 187-198.
- [20] 邓宇峰, 宋谢炎, 周涛发, 等. 新疆东天山黄山东岩体橄榄石成因意义探讨[J]. 岩石学报, 2012, 28(7): 2224-2234.
- Deng Yufeng, Song Xieyan, Zhou Taofa, et al. Correlations between Fo number and Ni content of olivine of the Huangshandong intrusion, eastern Tianshan, Xinjiang, and the genetic significances [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(7): 2224-2234 (in Chinese with English abstract).
- [21] 刘艳荣, 吕新彪, 梅微, 等. 新疆坡北镁铁-超镁铁杂岩体中橄榄石成分特征及其成因意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2012, 31(3): 249-256.
- Liu Yanrong, Lv Xinbiao, Mei Wei, et al. Genetic significances and composition characteristics of olivine from Pobei mafic-ultramafic complex, Xinjiang [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2012, 31(3): 249-256 (in Chinese with English abstract).
- [22] 刘艳荣, 吕新彪, 梅微, 等. 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, 2012, 41(1): 78-88.
- Liu Yanrong, Lv Xinbiao, Mei Wei, et al. Compositions of olivine from the mafic-ultramafic complexes in eastern Tianshan, Xinjiang and implications to petrogenesis: Examples from Huangshandong and Tulargen complexes [J]. Geochimica, 2012, 41(1): 78-88 (in Chinese with English abstract).
- [23] Li C, Naldrett A J, Ripley E M. Controls on the Fo and Ni Contents of olivine in sulfide-bearing mafic/ultramafic intrusions: Principles, modeling, and examples from Voisey's Bay [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(5): 177-183.
- [24] 王润民, 刘德权, 殷定泰. 新疆哈密土墩-黄山一带铜镍硫化物

- 矿床成矿控制条件及找矿方向的研究[J]. 矿物岩石, 1987, 7(1): 1-15.
- Wang Runming, Liu Dequan, Yin Dingtai. The study of Xinjiang Hami mound- Huangshan area copper- nickel sulfide deposit metallogenic controlled conditions and prospecting direction [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1987, 7(1): 1- 15 (in Chinese).
- [25] 王敏芳, 夏庆霖, 肖凡, 等. 新疆东天山土墩铜镍硫化物矿床岩石地球化学和铂族元素特征及其对成矿的指示意义[J]. 矿床地质, 2012, 31(6): 1195-1210.
- Wang Minfang, Xia Qinlin, Xiao Fan, et al. Rock geochemistry and platinum group elements characteristics of Tudun Cu- Ni sulfide deposit in East Tianshan Mountains of Xinjiang and their metallogenic implications [J]. Mineral Deposits, 2012, 31(6): 1195-1210 (in Chinese with English abstract).
- [26] 王永富. 新疆哈密土墩基性-超基性岩体特征及其含矿性研究[J]. 新疆有色金属, 2002, (3): 1-6.
- Yong Wenfu. The research of Xinjiang Hami mound mafic-ultramafic rocks characteristics and its ore-bearing potential [J]. Xinjian Nonferrous Metal, 2002, (3): 1- 6 (in Chinese with English abstract).
- [27] 李士彬, 胡瑞忠, 宋谢炎, 等. 硫化物熔离对岩浆硫化物含矿岩体中橄榄石 Ni 含量的影响——以金川岩体为例[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, 27(2): 146-152.
- Li Shibin, Hu Ruizhong, Song Xieyan, et al. Sulfide separation control in Ni content of olivine in ore-bearing intrusion of magma deposit: An example from Jinchuan intrusion [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2008, 27(2): 146-152 (in Chinese with English abstract).
- [28] 官建祥, 宋谢炎, Danyushevsky L V, 等. 峨眉火成岩省内带岩浆硫化物含矿岩体橄榄石的成因意义[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2010, 35(2): 224-234.
- Guan Jianxiang, Song Xieyan, Danyushevsky L V, et al. Genetic significances of olivine from magmatic sulfide ore-bearing intrusions in central zone of Emeishan large igneous province [J]. Earth Science——Journal of China University of Geosciences, 2010, 35(2): 224-234 (in Chinese with English abstract).
- [29] 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 Liemeng, Song Xieyan, 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 (in Chinese with English abstract).
- [30] Li C, Xu Z, de Waal S A, Ripley E M, et al. Compositional variations of olivine from the Jinchuan Ni- Cu sulfide deposit, Western China: Implications for ore genesis [J]. Mineralium Deposita, 2004, 39(2): 159-172.
- [31] Roeder P L, Emslie R F. Olivine- liquid equilibrium [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1970, 29(4): 275-289.
- [32] Chai G, Naldrett A J. The Jinchuan ultramafic intrusion: Cumulate of a high-Mg basaltic magma [J]. Journal of Petrology, 1992, 33 (2): 277-303.
- [33] Bloss F D. Crystallography and crystal chemistry[M]. New York: Holt, Rinyhart and Winston Incorporation, 1971.
- [34] Arth J G. Behavior of trace elements during magmatic processes——a summary of theoretical models and their applications [J]. Journal Research- United States Geological Survey, 1976, 4(1): 41-47.
- [35] Barnes S J, Maier W D. The fractionation of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulfide liquids [C]// Keays R R, Leshner C M, Lightfoot P C (eds.). Geological Association of Canada Short Course Notes: Dynamic Processes in Magmatic Ore Deposits and Their Application in Mineral Exploration. Geological Association of Canada, 1999: 69-106.
- [36] Li C, Ripley E M, Naldrett A J. Compositional variations of olivine and sulfur isotopes in the Noril'sk and Talnakh intrusions, Siberia: Implications for ore-forming processes in dynamic magma conduits [J]. Economic Geology, 2003, 98(1): 69-86.
- [37] Duke J, Naldrett A. A numerical model of the fractionation of olivine and molten sulfide from komatiite magma [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 39(2): 255-266.
- [38] Li C, Naldrett A. Geology and petrology of the Voisey's Bay intrusion: reaction of olivine with sulfide and silicate liquids [J]. Lithos, 1999, 47(1): 1-31.
- [39] Wang M, Guo X, Michalak P P, et al Origin of the Tudun Cu-Ni sulfide deposit in the eastern Tianshan, MW China: Constraints on the geochemistry of platinum group element[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 64: 445-454.
- [40] Borghini G, Rampone E. Postcumulus processes in oceanic - type olivine-rich cumulates: The role of trapped melt crystallization versus melt/rock interaction [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2007, 154(6): 619-633.
- [41] Cawthorn R G, Sander B, Jones I. Evidence for the trapped liquid shift effect in the Mount Ayliff intrusion, South Africa [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1992, 111(2): 194-202.
- [42] Barnes S J. The effect of trapped liquid crystallization on cumulus mineral compositions in layered intrusions [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1986, 93(4): 524-531.
- [43] Danyushevsky L V, McNeill A W, Sobolev A V. Experimental and petrological studies of melt inclusions in phenocrysts from mantle-derived magmas: An overview of techniques, advantages and complications [J]. Chemical Geology, 2002, 183(1/4): 5-24.



## Composition features and genetic significance of olivine from the Tudun mafic-ultramafic complex, East Tianshan Mountains, Xinjiang

WANG Min-fang<sup>1,2</sup>, XIA Qing-lin<sup>1,2</sup>, XIAO Fan<sup>3</sup>, GUO Xiao-nan<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, LIU Kun<sup>1</sup>

(1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 3. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

**Abstract:** Olivine is one of the earliest crystallization minerals from basaltic magma, and its composition can directly give the metallogenesis information on parent magma composition, processes of magmatic fractional crystallization, and sulfide segregation degree. In this study, the authors selected the Tudun mafic-ultramafic complex to conduct electron microprobe analysis of olivine minerals. According to the Fo and Ni values of olivine, the MgO content of parent magma, which contains the highest Fo olivine, was estimated to be 12.95%, indicating that the parent magma of the Tudun complex is a high-MgO basalt. The modeling results show that sulfide segregation and fractional crystallization almost took place at the same time. A slight sulfide segregation (about 0.2%) occurred during the early stage (0–2%) of olivine fractional crystallization process, and less sulfide segregation (about 0.01%) occurred during the later stage (6%–7%), which suggests that the metallogenic potential of the Tudun complex is limited. In addition, some data implying the negative relationship between Fo and Ni indicate that Fe–Ni exchange reaction happened between Fe-rich olivine and trapped sulfide liquid, which caused remarkable differences in olivine composition.

**Key words:** fractional crystallization; sulfide segregation; trapped sulfide liquid; genetic significance; olivine; Tudun; Xinjiang

---

**About the first author:** WANG Min-fang, female, born in 1980, associate professor, mainly engages in the study and teaching of ore genesis; E-mail: wang\_minfang@163.com.