塔里木板块东北缘坡北杂岩体矿物成分和铂族元素特征:对硫化物熔离和构造环境的约束*

王梦玺[1,2]　陈炳龙[1]　焦建刚[1,2,3]

WANG MengXi[1,2], CHEN BingLong[1] and JIAO JianGang[1,2,3]

1. 长安大学地球科学与资源学院,西安　710064
2. 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室,西安　710064
3. 教育部西部矿产资源与地质工程重点实验室,西安　710064

1. *School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an* 710064, *China*
2. *Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, Ministry of Land and Resources, Xi'an* 710064, *China*
3. *Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an* 710064, *China*

2017-12-01 收稿, 2018-03-23 改回.

Wang MX, Chen BL and Jiao JG. 2018. Mineral composition and platinum-group elements constraints on the sulfide segregation and tectonic setting of the Pobei complex, northeastern margin of the Tarim Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 34(8):2223 – 2244

Abstract　The Pobei complex is located in the Beishan rift zone in the northeastern margin of the Tarim Craton, and it is mainly composed of peridotite, clinopyroxenite, websterite, gabbro, norite and gabbronorite. The sulfide ore bodies occur in the ultramafic rocks of the Poyi intrusion and the mafic rocks of the Podong intrusion. MgO and CaO contents of clinopyroxene and An values and SiO_2 contents of plagioclase from different lithologies of the Poyi and Podong intrusions vary continuously and display negative correlations, respectively, suggesting they were formed from a same primary melt. According to the calculated composition of primary magma by previous study, we model the fractional crystallization process of the Pobei complex by MELTS program. Our model result suggests that the crystallization sequence is as follow: olivine→olivine + clinopyroxene→olivine + clinopyroxene + plagioclase→clinopyroxene + plagioclase + orthopyroxene. Sulfur reached to saturation, and sulfide subsequently segregated from the silicate melt when the crystallization fraction is as high as 20%, forming the ore body associated with ultramafic rocks of the Poyi intrusion. Therefore, composition of olivine from the dunite of the Poyi intrusion is consistent with the modeling line of olivine crystallization in terms of the composition of olivine with the highest Fo value (90.9mol%), whereas compositions of olivine from the plagioclase peridotite and clinopyroxene peridotite are lower than the modeling line, indicating that they were formed after the early stage of sulfide segregation. Sulfur content of the residual magma became undersaturated after sulfide segregation in early stage. However, the compositions of olivine from the olivine clinopyroxenite and gabbro of the Poyi intrusion are lower than the modeling line, and PGE contents of rocks from the barren olivine websterite, gabbro, norite and gabbronorite of the Podong intrusion vary from 8.9×10^{-9} to 29.0×10^{-9} and show distinctly negative anomalies relative to Ni and Cu, indicating a sulfide segregation again in late stage during magma evolving process. The segregated sulfide, which was probably ascribed to crustal contamination, formed the ore body associated with mafic rocks of the Podong intrusion. The Fo values of olivine from olivine websterite and olivine gabbronorite of the Podong intrusion (74.5mol% ~ 81.0mol%) are lower than those of olivine from the lherzolite, clinopyroxene peridotite and plagioclase peridotite of the Poyi intrusion, yet the former has higher Ni contents and wider range of Fo values with a negative correlation due to the Fe-Ni exchange between olivine and sulfide. Clinopyroxene from ultramafic rocks of the Poyi and Podong intrusions have TiO_2 content from 0.21% ~0.83%, and percentage of tetrahedral sites occupied by Al (Al_Z) from 0.8mol% to 7.8mol%, akin to the composition of cumulus clinopyroxene in a rift setting. We thus propose that the Pobei complex was formed in a rift setting related to the Permian (~280Ma) mantle plume underneath the Tarim Craton. However, the whole-rock Nd isotopic composition of the Pobei complex

* 本文受国家重点研发计划(2017YFC0601204)、中国地质调查局项目(212101102000150021-01)、国家自然科学基金项目(41672064、41502066)和陕西省高校科协青年人才托举计划项目(20160213)联合资助.

第一作者简介: 王梦玺,男,1986 年生,讲师,主要从事镁铁-超镁铁质岩体及相关矿床成因研究,E-mail: mxwang@chd.edu.cn

indicates a depleted mantle origin, not the direct product of mantle plume magmatism. In addition, dunite and wehrlite from the Pobei complex, that were weakly affected by trapped liquid, have La/Sm, Sm/Yb and La/Yb ratios similar to the melt from a mantle source composed by spinel lherzolite. Therefore, we suggest that the Pobei complex could be derived from a shallow depleted lithospheric mantle composed of spinel lherzolite, which was partially melted by a large amount of heat from the mantle plume.

Key words Mineral composition; Platinum-group elements (PGE); Sulfide segregation; Pobei Complex; Tectonic setting

摘 要 坡北杂岩体位于塔里木板块东北缘北山裂谷带,主要由橄榄岩相、单辉辉石岩相、二辉岩相、辉长岩相、苏长岩相和辉长苏长岩相组成。坡一岩体中硫化物矿体赋存于超镁铁质岩中,而坡东岩体中硫化物矿体赋存于辉长苏长岩相中。坡一和坡东岩体不同岩相中单斜辉石的 MgO 和 CaO 含量、斜长石的 An 值和 SiO_2 含量连续变化且呈负相关,说明二者可能是同一原始岩浆分离结晶的产物。根据前人计算的原始岩浆成分,我们利用 MELTS 软件模拟了坡北杂岩体的分离结晶过程。结果表明矿物结晶顺序为:橄榄石→橄榄石 + 单斜辉石→橄榄石 + 单斜辉石 + 斜长石→单斜辉石 + 斜长石 + 斜方辉石,与岩相观察一致。坡北杂岩体原始岩浆经过 20% 分离结晶达到 S 饱和而发生早期硫化物熔离,形成坡一岩体中矿体。因此,在利用具有最高 Fo 值(90.9mol%)的橄榄石成分进行的模拟中,坡一岩体早期结晶的纯橄榄岩中橄榄石成分与分离结晶趋势线一致,而斜长橄榄岩中橄榄石成分低于趋势线,可能形成于早期硫化物熔离之后。随后岩浆中 S 再一次不饱和,但坡一岩体橄榄单辉辉石岩和辉长岩中橄榄石 Fo 和 Ni 含量在分离结晶趋势线之下,同时坡东岩体不含矿岩石中铂族元素总量主要在 $8.9 \times 10^{-9} \sim 29.0 \times 10^{-9}$ 之间,且相对于 Ni 和 Cu 明显亏损,说明在岩浆分离结晶晚期再次发生硫化物熔离,而且可能是地壳混染引起的,并形成了坡东岩体中的硫化物矿体。坡东岩体橄榄二辉岩和橄榄辉长苏长岩中橄榄石 Fo 值(74.5mol% ~81.0mol%)较低,但变化范围较大,且 Fo 和 Ni 呈负相关关系,这可能是由于橄榄石和硫化物熔体在不平衡状态下发生成分交换造成的。坡北杂岩体超镁铁质岩石中单斜辉石 TiO_2 含量为 0.21% ~0.83%,阳离子中呈四次配位的 $Al(Al_Z)$ 为 0.8mol% ~7.8mol%,与裂谷环境堆晶岩中单斜辉石成分相似。因此,坡北杂岩体可能形成于和塔里木二叠纪地幔柱活动相关的裂谷环境。然而,超镁铁质岩石全岩 Nd 同位素指示其来源于亏损地幔,并不是地幔柱物质熔融的直接产物。纯橄榄岩和异剥橄榄岩 La/Sm, Sm/Yb 和 La/Yb 比值指示其源区为尖晶石二辉橄榄岩地幔。因此,坡北杂岩体源区应为浅部以尖晶石二辉橄榄岩为主的亏损岩石圈地幔,地幔柱在源区部分熔融过程中提供了大量的热。

关键词 矿物成分;铂族元素(PGE);硫化物熔离;坡北杂岩体;大地构造环境

中图法分类号 P575.1; P588.124; P588.125; P611

镁铁-超镁铁质岩体主要由堆晶岩组成,全岩成分并不能代表原始岩浆的成分(Veksler, 2009),利用全岩微量元素成分研究其地幔源区性质和构造环境往往会存在多解性(Niu *et al.*, 2002)。矿物成分研究可以有效解决镁铁-超镁铁质岩体成因问题。橄榄石一般最早从玄武质熔体中结晶出来,在硫不饱和的情况下亲铁元素 Ni 主要进入橄榄石中($D_{Ni}^{橄榄石/硅酸盐熔体}$ = 2.86 ~ 13.6; Takahashi, 1978),而当岩浆中发生硫化物熔离,Ni 会强烈进入硫化物中($D_{Ni}^{硫化物熔体/硅酸盐熔体}$ = 575 ~ 836; Peach *et al.*, 1990),导致随后结晶的橄榄石亏损 Ni,因此橄榄石成分可以用来反演熔体的硫化物饱和过程(Li *et al.*, 2004)。单斜辉石记录了岩浆重要的物理化学信息,不但可以用来计算岩浆分离结晶过程中的温度和压力(Brey and Köhler, 1990; Nimis and Ulmer, 1998),还可以用来指示岩浆硅饱和度和硫溶解度(Naldrett and von Gruenewaldt, 1989; 薛胜超等, 2015)。

中天山地块、觉罗塔格构造带和塔里木板块东北缘的北山裂谷带发育有大量二叠纪镁铁-超镁铁质岩体,其中多个岩体赋存有岩浆型铜镍硫化物矿床,如黄山东、坡一、天宇和图拉尔根(Gao and Zhou, 2013; Zhou *et al.*, 2004; Qin *et al.*, 2011; Su *et al.*, 2011, 2012; Xia *et al.*, 2013; 姜常义等, 2006, 2012; Liu *et al.*, 2016, 2017a; 焦建刚等, 2017)。北山裂谷带中含矿的坡北杂岩体主要由坡一、坡三、坡十、坡东等岩体组成,其中坡一岩体超镁铁质岩石和坡东岩体镁铁质岩石中赋存硫化物矿体。前人通过对含矿的坡一岩体全岩 Sr-Nd-Os 同位素分析认为坡北杂岩体的地幔源区可能是南天山洋向塔里木板块之下俯冲过程中被流体交代的大陆下岩石圈地幔(Xia *et al.*, 2013),或为亏损的软流圈地幔(Yang *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2016; Xue *et al.*, 2016a),或为形成于二叠纪地幔柱轴部既有洋岛型地幔源区特征又有亏损型大陆下岩石圈地幔的特征(姜常义等, 2006, 2012)。另一方面,不同学者通过模拟计算均认为坡一岩体母岩浆亏损铂族元素(PGE)(Yang *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2016; Xue *et al.*, 2016a),但分歧在于 PGE 亏损是由于地幔低程度部分熔融导致硫化物在源区发生熔离造成的(Yang *et al.*, 2014),还是由于原始岩浆上升侵位到达深部岩浆房后地壳硫的加入导致硫化物熔离造成的(Xue *et al.*, 2016b),亦或是侵位之前太古宙地壳中硫促进了硫化物饱和,而在侵位时无硫化物大理岩的混染抑制了硫化物饱和(Liu *et al.*, 2017b)。因此,坡北杂岩体的地幔源区性质、岩浆演化过程和硫化物熔离的时间和机制仍然存在争议。虽然坡北杂岩体中新发现的坡东含矿岩体规模为小型,但容矿岩石不同于坡一岩体,为找矿勘探指明了新的方向。而且坡一和坡东两个含矿岩体的矿物学成分和铂族元素的综合研究可能对坡北杂岩体岩浆演化过程和硫化物熔离机制提出新的认识。

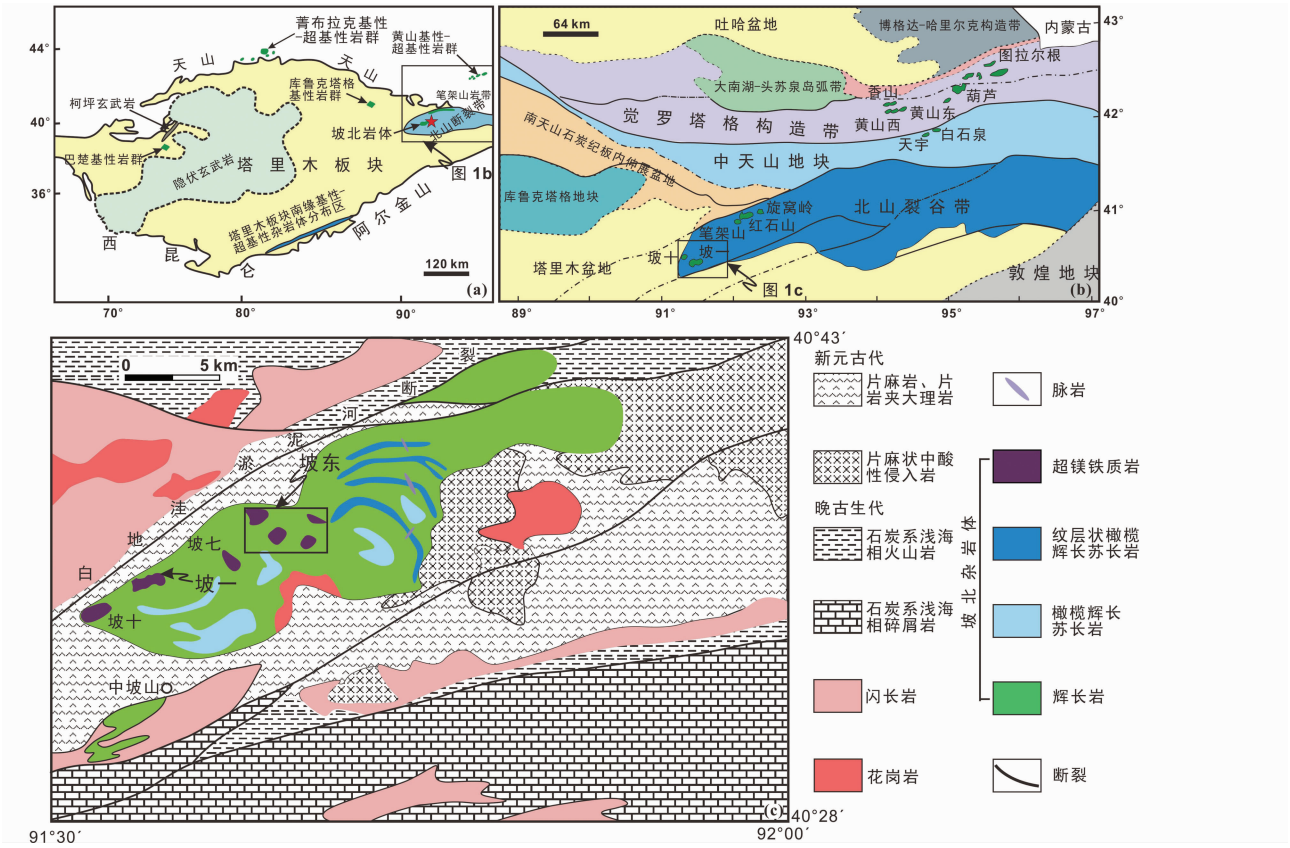


图 1　塔里木板块东北缘大地构造图(a)，觉罗塔格、中天山和北山镁铁-超镁铁质岩体分布图(b)和坡北杂岩体地质简图(c)(据校培喜，2004①；新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队，2015②)

Fig. 1　The tectonic map of the northeastern margin of the Tarim Craton (a), the occurrence of Permian mafic-ultramafic intrusions in the Jueluotage, Middle-Tianshan and Beishan belts (b) and simplified geological map of the Pobei complex (c)

因此，本次研究系统分析了坡一和坡东岩体不同岩相带中橄榄石、单斜辉石、斜方辉石和斜长石的成分以及坡东岩体不同岩相 PGE 含量，以此来反演其原始岩浆的分离结晶过程，讨论硫化物熔离的时间及控制因素，并研究其形成的大地构造环境。

1　地质背景

塔里木板块东北缘北山构造带为一晚古生代裂谷带(图 1a)，北与库鲁克塔格地块相连，南与敦煌地块相隔，在裂谷带内部又以白地洼-淤泥河断裂带和骆驼峰-矛头山断裂带为界分为北、中、南三个带(校培喜，2004；图 1b)。北山裂谷带结晶基底为古元古界北山群(肖渊甫等，2004)，沉积盖层下部为长城系古硐井岩群、杨吉布拉克岩群以及蓟县系爱尔基干群(肖渊甫等，2004)，上部为震旦系汗格尔乔克组(姜常义等，2006)。北山地区二叠纪处于强烈的火山活动期，形成了多个镁铁-超镁铁质杂岩体。

北山二叠纪镁铁-超镁铁质岩体主要分布在两个带中：东部笔架山岩带，包括旋窝岭、笔架山和红石山等岩体，西部坡北岩带，包括坡一、坡三、坡十、坡东和罗东等岩体(图 1b)。坡北镁铁-超镁铁质杂岩体位于白地洼-淤泥河断裂东南侧，长 20km，宽 10km，出露面积约 200km^2，呈相互连通的北东向延展岩盆状(图 1c)。岩体直接围岩主要为长城系古硐井岩群的黑云母片岩、石英岩、黑云母二长变粒岩等，其次为下石炭统粗粒大理岩(姜常义等，2012)。前人对坡北杂岩体进行了专题地质填图，根据岩浆性质和含矿性特征将其划分为 2 个岩浆亚序列和 5 个岩浆单元。其中 2 个岩浆亚序列对应两类岩浆矿床的赋矿岩相(Liu *et al.*，2017a；焦建刚等，2017)，早期岩浆亚序列为氧化物型矿床，矿体主要赋存在辉长苏长岩中或含磁铁辉长岩与大理岩的交界处，晚期岩浆亚序列为硫化物型矿床，矿体主要赋存在橄榄岩类中。五个岩浆单元分别为：第一单元主要为辉长岩；第二单元主

① 校培喜. 2004. 笔架山幅 1 ∶ 25 万区域地质调查(修测). 西安：西安地质矿产研究所基础地质调查研究室

② 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队. 2015. 新疆坡北铜镍矿成矿规律与富矿定位预测

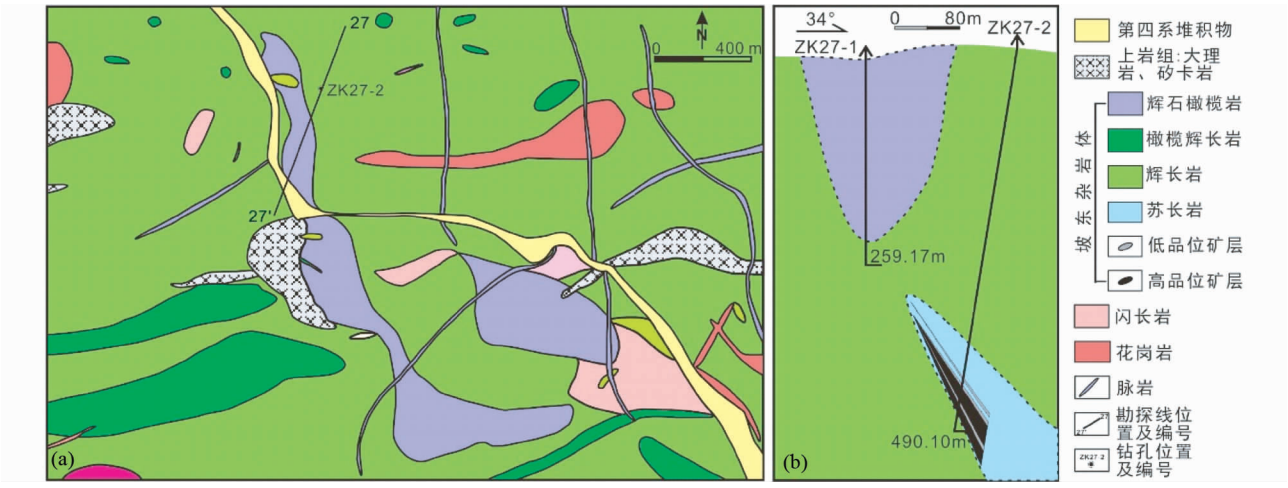


图 2 坡东岩体地质简图(a)和坡东岩体 27 号勘探线剖面图(b)(据新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队, 2015)

Fig. 2 Simplified geological map (a) and a cross-section along the No. 27 prospecting line (b) of the Podong intrusion

要为辉长苏长岩、橄榄辉长苏长岩,边部含透镜状辉石岩;第三单元主要为橄榄辉长岩,含少量橄榄辉长苏长岩;前三个单元构成了第一岩浆亚序列;第四单元主要由超镁铁质岩石组成,岩石类型有纯橄榄岩、含长二辉橄榄岩、二辉橄榄岩、暗色橄榄辉长岩等,构成了第二岩浆亚序列,坡一和坡十岩体形成于该阶段;第五单元主要为细粒辉长岩,局部呈岩枝状产出(焦建刚等, 2017)。

坡一岩体位于坡北杂岩体南西段,是近些年发现的主要含矿岩体,赋存有超大型铜镍硫化物矿床,呈不规则岩盆状,长约 2.5km,宽约 1.0km,沿近东西向展布,岩体基本上被第四系覆盖,仅在边部有零星的基岩出露。坡一岩体主要由纯橄榄岩、二辉橄榄岩和橄榄二辉岩组成,说明该岩体为橄榄石和辉石的堆晶岩(Xia *et al.*, 2013)。坡一岩体辉长岩锆石 U-Pb 年龄为 276 ~ 278Ma(李华芹等, 2006; Xue *et al.*, 2016a),而橄长岩的锆石 U-Pb 年龄为 269.9 ± 1.9Ma,略晚于辉长岩(Xue *et al.*, 2016a)。

新近在坡北杂岩体东部勘探过程中发现坡东岩体也赋存有硫化物矿体。该岩体位于坡北岩体中段,主要组成岩相为辉石橄榄岩、橄榄辉长苏长岩、辉长岩、苏长岩(图 2a)。坡东岩体中辉长岩的锆石 U-Pb 年龄为 273.5 ± 2.9Ma(焦建刚等, 2018),与坡一岩体中辉长岩的年龄一致。坡十岩体为直径约 1.8km 的不规则近圆状岩体,出露面积约 2.5km^2,主要由单辉橄榄岩和纯橄榄岩组成,该岩体在橄榄岩相带底部已发现 43 个矿(化)体。坡十岩体中角闪辉长岩的形成时代为 274 ± 4Ma(姜常义等, 2006),而辉长岩略早于角闪辉长岩,其锆石 U-Pb 年龄为 284 ± 2.2Ma(Qin *et al.*, 2011),与坡东岩体中辉长岩年龄一致。坡三超镁铁质岩体沿北东-南西向延长约 1.5km,最大宽度为 0.5km,出露面积约 0.75km^2。该岩体中辉长岩、辉长苏长岩和橄榄辉长岩构成了岩体的 1 ~ 3 阶段,而辉石岩和二辉橄榄岩构成岩体的 4 ~ 5 阶段(Ma *et al.*, 2016)。辉长岩的锆石 U-Pb 年龄为 275.8 ± 2.7Ma(Ma *et al.*, 2016),与坡一、坡东岩体中辉长岩和坡十岩体中角闪辉长岩的形成时代一致。

2 矿床地质特征

坡东岩体中超镁铁质岩石(纯橄榄岩和二辉橄榄岩)长约 2km,宽几十米至 200m,面积约 0.16km^2,与该岩体中镁铁质岩石(橄榄辉长岩、辉长岩和辉长苏长岩)呈侵入接触关系(焦建刚等, 2018)。坡东岩体中富硫化物矿体主要赋存在辉长苏长岩相中,不同于坡一岩体(图 2b)。硫化物矿体倾向北东,厚度一般为十几米,矿石构造以浸染状、海绵陨铁状和块状为主,在苏长岩中的块状硫化物最多连续长达 1m(新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队, 2015),硫化物主要为磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿和少量黄铁矿(焦建刚等, 2018)。

前人通过大比例尺专题填图发现,坡一岩体超镁铁质岩石中纯橄榄岩、橄榄二辉岩、二辉橄榄岩和含长二辉橄榄岩之间呈渐变过渡关系,而镁铁质岩石和超镁铁质岩石之间表现为侵入接触关系(焦建刚等, 2017)。坡一岩体中硫化物矿体与超镁铁质岩石中纯橄榄岩和辉石橄榄岩相关系密切,主要产于这两种岩相底部或靠近其底部以悬浮状产出,厚度变化较大 10 ~ 80m(Xia *et al.*, 2013),矿体形态与岩体底部形态基本相似,呈似层状或透镜状产出。矿石具有自形-半自形粒状结构,构造以星散浸染状-稀疏浸染状为主(新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队, 2015)。目前探明的 Ni 资源量为 54.81 万吨,铜 21.25 万吨、钴 5.75 万吨,镍矿石品位一般 0.2% ~ 0.6%,局部可达 0.97%(王亚磊等, 2013)。硫化物主要为磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿,常出现在硅酸盐堆晶矿物粒间(Xia *et al.*, 2013)。

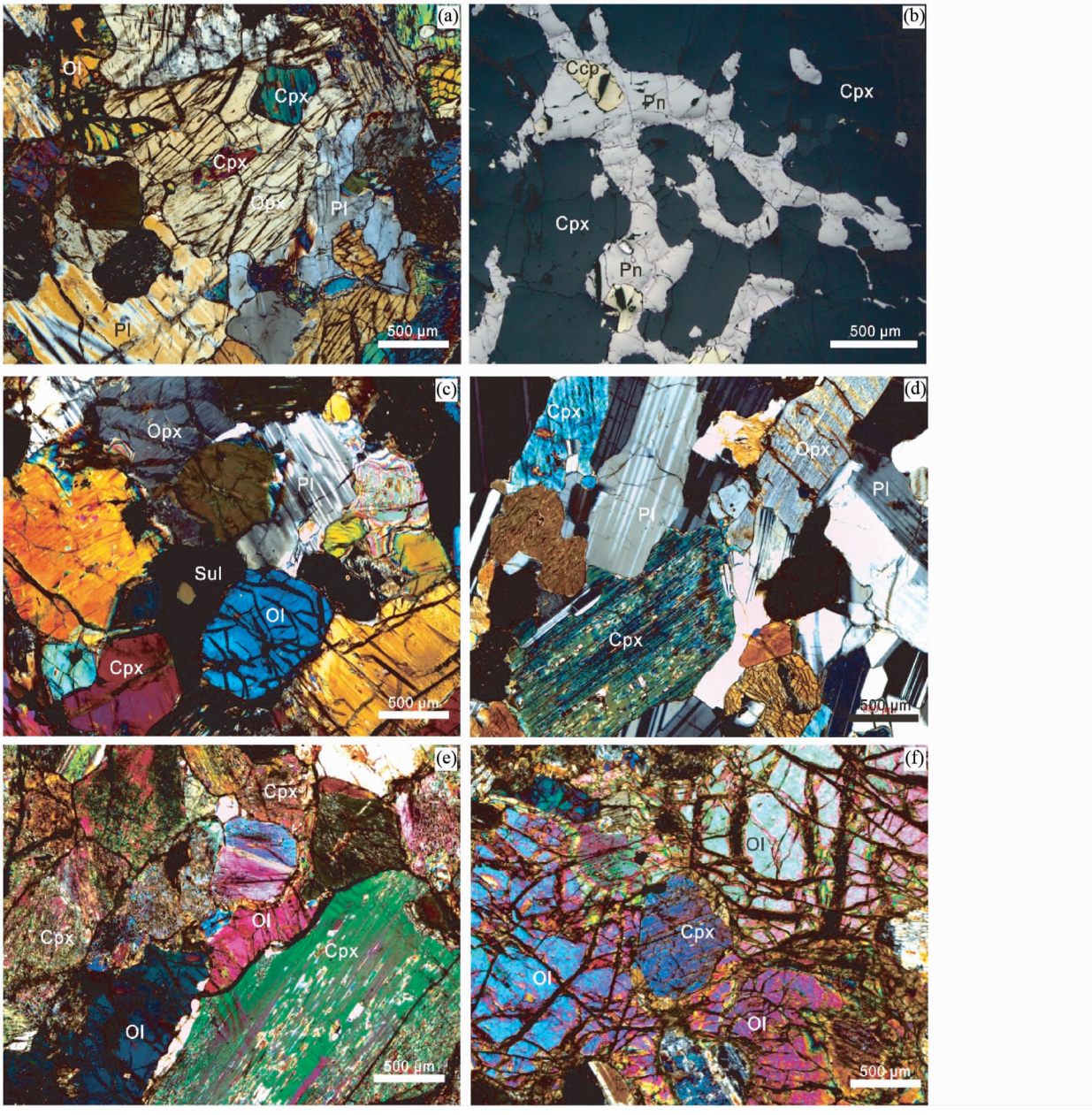


图 3　坡北杂岩体岩相学特征

(a)坡东岩体橄榄辉长苏长岩中斜方辉石(Opx)与斜长石(Pl)自形程度接近,形成辉长结构,单斜辉石(Cpx)包含在斜方辉石中,正交偏光,样品 PDZK27-2-459;(b)坡东岩体橄榄辉长苏长岩中镍黄铁矿(Pn)和黄铜矿(Ccp)分布在单斜辉石和橄榄石(Ol)粒间,反射光,样品 PDZK27-2-459;(c)坡东岩体橄榄二辉岩中橄榄石和斜长石在单斜辉石和斜方辉石粒间,正交偏光,样品 PDZK27-2-9;(d)坡一岩体辉长苏长岩中斜长石与斜方辉石和单斜辉石自形程度相近,形成辉长结构,正交偏光,样品 PB-1;(e)坡一岩体橄榄单辉辉石岩中橄榄石在单斜辉石粒间,正交偏光,样品 P23-5;(f)坡一岩体单辉橄榄岩中单斜辉石在橄榄石粒间,正交偏光,样品 Ib-21

Fig. 3　Photomicrographs of rocks from the Poyi and Podong intrusions

(a) an ophitic texture with euhedral orthopyroxene (Opx) and plagioclase (Pl), and clinopyroxene (Cpx) inclusion in orthopyroxene. Cross polar, under transmitted light, sample PDZK27-2-459; (b) Pentlandite (Pn) and chalcopyrite (Ccp) in the interstices of clinopyroxene and olivine (Ol), under reflected light, sample PDZK27-2-459; (c) olivine and plagioclase in the interstices of clinopyroxene and orthopyroxene. Cross polar, under transmitted light, sample PDZK27-2-9; (d) an ophitic texture with euhedral orthopyroxene, clinopyroxene and plagioclase. Cross polar, under transmitted light, sample PB-1; (e) olivine in the interstices of clinopyroxene. Cross polar, under transmitted light, sample P23-5; (f) clinopyroxene in the interstices of olivine. Cross polar, under transmitted light, sample Ib-21

3 岩相学特征

3.1 坡东岩体

辉长苏长岩具有辉长结构,主要由 25% ~30% 单斜辉石、~20% 斜方辉石和 45% ~50% 斜长石组成。单斜辉石和斜方辉石均以自形-半自形短柱状或宽板状产出,粒度一般为 0.15 ×0.2mm ~0.3 ×2mm,常可见到单斜辉石和斜长石互相包含,斜方辉石中包含有单斜辉石和斜长石,少见单斜辉石或斜长石中包含斜方辉石。斜长石呈自形-半自形长柱状或宽板状产出,粒度一般为 0.3 ×0.4mm ~0.6 ×2.5mm,颗粒较新鲜,少量蚀变矿物主要为绢云母。橄榄辉长苏长岩结构与辉长苏长岩相似,橄榄石含量一般 10% ~15%,常以自形-半自形粒状或者不规则状产出,粒度 0.3 ×0.5mm ~1.5 ×2.0mm,在其边部可以见到斜方辉石的反应边,橄榄石常包含在斜长石和辉石中,斜方辉石中包含有单斜辉石,少见单斜辉石中包含斜方辉石(图 3a)。在橄榄辉长苏长岩中常出现 5% ~10% 的硫化物,以镍黄铁矿和黄铜矿为主,粒度 0.2 ×0.5mm ~0.5 ×3.0mm,往往以不规则状发育在硅酸盐矿物粒间,并包含有辉石和橄榄石颗粒(图 3b)。

橄榄二辉岩具有中堆晶结构和包橄结构,主要由 15% ~20% 橄榄石、25% ~30% 单斜辉石、30% ~35% 斜方辉石、10% ~15% 斜长石和 1% ~2% 硫化物组成(图 3c)。橄榄石常以自形-半自形粒状或不规则状产出,粒度 0.4 ×0.5mm ~1.5 ×2.5mm,常包含在斜长石和辉石中。单斜辉石和斜方辉石均以自形-半自形短柱状或宽板状产出,粒度一般为 1 ×1.5mm ~2.5 ×3.5mm,二者常包含在斜长石中。斜长石在镁铁质矿物粒间以不规则填隙状产出,粒度一般为 0.4 ×0.5mm ~1.5 ×2.5mm。硫化物在硅酸盐矿物粒间以星点状产出。

3.2 坡一岩体

坡一岩体中辉长岩具有辉长结构(图 3d),主要由 40% 单斜辉石、55% 斜长石组成和 5% 斜方辉石组成。单斜辉石常呈短柱状,粒度 0.3 ×0.5mm ~1.0 ×2.0mm,斜长石自形程度与单斜辉石相近,粒度 0.2 ×0.3mm ~0.5 ×1.5mm。橄榄单辉辉石岩具有中堆晶结构,主要由 75% ~80% 单斜辉石、20% ~25% 橄榄石和少量斜长石(3%)组成。单斜辉石以自形-半自形短柱状或粒状产出,粒度 0.5 ×0.5mm ~3.0 ×3.5mm。橄榄石在单斜辉石粒间以粒状或不规则状产出(图 3e),粒度 0.5 ×1.0mm ~2.0 ×3.0mm,常包含在单斜辉石中形成包橄结构。单斜辉石和橄榄石粒间发育有少量他形斜长石,应是该类岩石中较晚结晶的矿物。

单辉橄榄岩具有中堆晶结构(图 3f),主要由 ~80% 橄榄石、~12% 单斜辉石、~6% 斜长石和 ~2% 硫化物组成。橄榄石常以自形-半自形粒状或不规则状产出,粒度 0.5 ×1.0mm ~4.0 ×4.0mm,普遍发育包橄结构。单斜辉石为自形-半自形短柱状,粒度一般为 0.3 ×0.4mm ~1.5 ×2.0mm。斜长石在镁铁质矿物粒间以不规则填隙状产出,粒度一般为 0.5 ×0.8mm ~1.0 ×1.2mm,与单斜辉石之间的关系不明显。在橄榄石粒间的硫化物以不规则星点状产出,粒度一般为 0.04 ×0.08mm ~0.12 ×0.2mm。

4 分析方法

4.1 矿物成分分析

橄榄石、单斜辉石、斜方辉石和斜长石主量元素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的 JEOL JXA-8100 型电子探针上完成。实验条件为:加速电压 15kV,测试电流 20nA,束斑直径为 1μm,主量元素的计数时间为 20s 和 10s,微量元素的计数时间为 40s。橄榄石分析的标样为:Si、Mg、Fe 和 Ni 为橄榄石;Ti 为金红石;Al 和 Ca 为石榴子石;Na 为长石;Mn 为 MnO。辉石分析的标样为:Si、Fe、Mg 和 Ca 为透辉石,Na 和 Al 为硬玉;Ti、Cr 和 Mn 分别为 TiO_2、Cr_2O_3 和 MnO;K 为长石;Ni 为橄榄石。斜长石分析的标样:Si、Al 和 Na 为钠长石;Ca 为斜长石,K 为钾长石,Fe 为石榴子石,Ti 为 TiO_2。主量元素的分析误差为 2%,微量元素的分析误差为 5%,所有元素的检测限为 0.01%。数据利用 ZAF 方法进行校正,以排除测试过程中的噪音和干扰。

4.2 全岩亲铁元素和 Cu 分析

全岩 Ni 和 Cu 含量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采用 Agilent 7500a 型电感耦合等离子质谱(ICP-MS)完成。样品粉末利用 HF + HNO_3 溶液在 190℃条件下在溶样弹中溶解 48 小时。分析测试过程中选择 BHVO-2(玄武岩)、AGV-2(安山岩)和 BCR-2(玄武岩)作为标样。分析精度优于 10%。

全岩 PGE 分析测试在国家地质实验测试中心利用硫镍火试金-碲共沉淀方法完成(漆亮和黄小文, 2013)。称样 10 ~20g,加入硫磺、羟基镍、硼酸钠、碳酸钠、硼砂、面粉均匀混合后置于坩埚中,再加 Os 同位素稀释剂。在 1150℃条件下加热熔融 1.5h 后将熔体注入铁模,冷却后取出镍扣。将镍扣粉碎后用浓盐酸溶解,加入碲共沉淀剂沉淀后,将不溶物滤出,加王水于 100℃加热溶解 1h,转入比色管中定容,然后利用 ICP-MS (TJAPQ-EXCELL)进行元素含量分析。分析测试过程中 Os、Ir、Ru 和 Pd 空白值小于 0.03×10^{-9},Pt 和 Rh 空白值小于 0.06×10^{-9}。

5 分析结果

5.1 矿物成分

5.1.1 橄榄石

坡一岩体纯橄榄岩中橄榄石的 MgO 含量为 47.6% ~

表 1 坡一和坡东岩体中橄榄石成分(wt%)

Table 1 Composition of olivine of the Poyi and Podong intrusions (wt%)

岩性	样品号	测点号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	FeO	NiO	MnO	MgO	CaO	Total	Fo (mol%)
坡一岩体													
辉长岩	PB5	1	37.23	0.01	0.03	0.08	32.14	0.02	0.43	31.80	0.04	101.78	64.0
		2	36.94	0.03	0.03	0.02	32.77	0.02	0.38	30.98	0.04	101.22	63.0
		3	37.54	—	—	—	31.23	—	0.37	31.11	0.01	100.26	64.2
		4	37.33	—	—	0.01	32.14	—	0.28	31.37	0.01	101.14	63.7
		5	37.48	0.01	—	0.09	30.35	—	0.38	32.93	0.03	101.26	66.1
橄榄辉长苏长岩	PB3	1	54.20	0.35	1.57	0.41	10.93	0.01	0.19	29.30	1.55	98.52	82.8
		2	38.94	—	0.04	0.04	18.02	0.11	0.24	42.01	0.04	99.43	80.8
		3	38.72	0.02	—	—	18.14	0.23	0.22	42.55	0.03	99.92	80.8
		4	38.64	0.01	0.03	—	18.53	0.11	0.27	42.47	0.03	100.09	80.5
		5	39.07	—	—	0.10	17.72	0.16	0.24	42.09	0.04	99.41	81.0
	PB7	1	38.80	0.19	0.16	0.05	18.03	0.11	0.30	42.22	0.25	100.11	80.8
		2	38.54	—	—	—	17.25	0.06	0.16	42.68	0.02	98.71	81.7
		3	38.42	—	—	—	17.78	0.11	0.46	42.56	0.03	99.36	81.2
		4	39.01	—	0.01	0.09	18.58	0.14	0.36	42.80	0.16	101.16	80.6
		5	38.26	0.02	0.00	0.04	17.69	0.13	0.20	42.29	0.03	98.66	81.1
橄榄辉长岩	Ib17	1	40.77	—	0.02	—	10.99	0.05	0.22	46.50	0.02	98.57	88.4
		2	41.18	0.01	0.04	0.03	9.52	0.11	0.18	47.83	0.03	98.92	90.0
		3	39.82	0.05	0.05	—	15.81	0.05	0.17	42.10	0.04	98.09	82.7
		4	41.30	—	0.01	0.01	9.57	0.05	0.22	48.58	0.09	99.82	90.1
		5	40.88	0.02	0.05	—	10.26	—	0.12	47.26	0.05	98.64	89.2
斜长橄榄岩	PB6	1	39.37	0.01	0.02	—	14.90	0.06	0.18	44.76	0.02	99.30	84.4
		2	39.82	0.01	—	0.01	14.63	0.06	0.21	44.85	0.05	99.64	84.7
		3	39.98	—	0.01	—	14.66	0.16	0.18	44.92	0.04	99.95	84.7
		4	40.23	—	—	—	14.65	0.10	0.07	44.74	0.03	99.82	84.6
	Ib25	1	39.30	—	0.02	0.09	15.50	0.14	0.20	44.53	0.04	99.83	83.8
		2	39.72	0.04	0.01	0.06	14.88	0.03	0.18	44.52	0.05	99.49	84.3
		3	39.17	—	—	0.02	15.62	0.10	0.32	45.10	0.05	100.38	83.9
		4	39.37	—	0.02	0.03	15.96	0.07	0.35	44.95	0.05	100.81	83.5
		5	39.18	—	0.02	—	16.28	0.10	0.16	45.26	0.04	101.04	83.3
		6	39.03	0.02	0.02	0.06	15.38	0.14	0.24	44.53	0.06	99.47	83.9
		7	39.78	0.01	—	0.03	14.87	0.09	0.21	44.72	0.05	99.77	84.4
		8	39.35	0.02	0.02	0.06	15.12	0.05	0.32	45.23	0.06	100.21	84.3
		9	40.12	—	—	—	15.23	0.11	0.27	45.20	0.04	100.97	84.2
		10	39.53	—	—	—	15.38	0.13	0.19	44.36	0.03	99.61	83.9
		11	39.36	—	—	—	15.63	0.14	0.26	44.05	0.04	99.49	83.5
单辉橄榄岩	Ib21	1	39.02	0.01	—	0.04	16.20	0.18	0.15	42.82	0.03	98.43	82.6
		2	38.80	0.01	0.02	0.04	16.64	0.15	0.12	43.03	0.05	98.84	82.3
		3	39.18	0.01	—	0.02	16.74	0.15	0.29	42.91	0.07	99.37	82.2
		4	38.02	0.01	0.02	—	16.40	0.26	0.16	42.80	0.06	97.74	82.4
		5	38.90	0.03	—	0.04	17.14	0.07	0.18	42.92	0.05	99.33	81.8
		6	39.03	0.03	0.01	—	17.22	0.18	0.29	43.49	0.04	100.28	82.0
		7	39.03	—	—	0.05	16.08	0.12	0.17	43.15	0.06	98.66	82.8
		8	39.03	—	0.02	0.07	17.22	0.07	0.25	43.26	0.04	99.96	81.9
		9	39.11	—	0.01	—	16.76	0.20	0.25	42.46	0.04	98.82	82.0
		10	38.84	—	—	—	16.76	0.09	0.36	42.64	0.03	98.72	82.1
		11	38.57	—	—	—	17.31	0.15	0.15	42.56	0.06	98.80	81.6
		12	39.23	0.02	0.03	0.21	17.02	0.11	0.22	42.89	0.04	99.77	81.9
		13	38.14	—	0.12	0.03	16.38	0.18	0.22	42.53	0.05	97.64	82.4

续表 1

Continued Table 1

岩性	样品号	测点号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	FeO	NiO	MnO	MgO	CaO	Total	Fo (mol%)
		14	38.87	—	—	0.06	17.22	0.10	0.15	42.86	0.06	99.32	81.8
		15	39.09	0.01	0.03	—	16.37	0.19	0.28	43.06	0.04	99.07	82.6
		16	38.67	—	—	—	16.16	0.25	0.29	42.71	0.05	98.14	82.6
		17	39.68	0.02	0.01	0.08	15.99	0.19	0.25	43.19	0.06	99.46	82.9
		18	38.99	—	0.01	0.08	17.06	0.12	0.22	43.04	0.06	99.56	82.0
		19	38.53	0.04	0.01	0.04	17.17	0.14	0.40	43.50	0.04	99.87	82.0
		20	39.05	—	0.01	0.02	17.60	0.21	0.10	43.29	0.04	100.31	81.6
		21	38.57	—	0.07	0.04	17.34	0.18	0.21	42.88	0.41	99.70	81.7
		22	39.47	0.03	—	—	17.25	0.21	0.31	43.17	0.05	100.47	81.8
		23	39.07	0.01	—	—	16.44	0.12	0.25	42.99	0.05	98.92	82.5
纯橄岩	P23-11	1	39.24	—	0.23	0.77	11.69	0.34	0.18	47.60	0.03	100.08	88.0
		2	39.99	0.01	0.02	0.06	9.38	0.29	0.13	49.08	0.07	99.03	90.4
		3	39.90	—	—	—	9.88	0.38	0.06	49.11	0.05	99.38	90.0
		4	39.95	—	0.01	0.13	9.53	0.24	0.18	48.41	0.02	98.46	90.1
		5	39.20	0.03	0.01	0.05	8.96	0.31	0.22	49.14	0.02	97.95	90.8
		6	39.95	—	—	—	9.56	0.40	0.17	48.85	0.04	98.97	90.2
		7	40.14	—	0.01	0.13	9.68	0.39	0.15	49.60	0.05	100.17	90.2
		8	40.28	0.03	—	0.02	9.45	0.41	0.14	48.82	0.06	99.21	90.3
		9	39.67	0.03	0.08	0.04	9.80	0.28	0.20	48.83	0.14	99.07	90.0
		10	39.96	—	—	—	10.11	0.41	0.06	49.20	0.05	99.78	89.8
		11	40.71	—	0.02	—	10.08	0.43	0.14	49.35	0.05	100.78	89.8
		12	39.86	—	0.04	0.07	9.32	0.39	0.14	48.74	0.07	98.62	90.4
		13	40.06	—	0.04	0.02	9.21	0.46	0.08	49.15	0.07	99.08	90.6
		14	40.30	—	0.02	—	9.33	0.36	0.20	48.82	0.06	99.10	90.4
纯橄岩	P23-13	1	40.89	—	0.01	0.06	9.08	0.48	0.18	48.84	0.07	99.58	90.6
		2	41.09	—	0.02	—	9.33	0.32	0.12	49.19	0.04	100.11	90.5
		3	40.49	0.01	—	0.05	10.00	0.34	0.09	49.21	0.04	100.23	89.9
		4	40.28	0.02	0.01	0.05	10.04	0.48	0.05	49.56	0.06	100.55	89.9
		5	39.69	—	—	0.18	9.79	0.31	0.14	49.25	0.04	99.41	90.1
		6	40.21	—	0.01	0.03	9.53	0.40	0.13	49.22	0.06	99.59	90.3
		7	41.04	—	0.02	0.01	9.54	0.31	0.10	49.12	0.04	100.18	90.3
		8	40.40	0.03	—	—	9.57	0.31	0.02	49.00	0.07	99.40	90.2
		9	40.53	—	0.03	—	8.69	0.40	0.08	48.29	0.06	98.08	90.9
		10	40.29	—	—	0.10	9.73	0.46	0.11	48.29	0.04	99.02	89.9
		11	40.82	0.01	—	—	9.80	0.41	0.22	49.72	0.06	101.03	90.1
		12	40.66	0.02	—	0.07	9.58	0.43	0.17	49.20	0.05	100.19	90.2
		13	40.70	0.04	—	—	9.88	0.27	0.16	49.04	0.05	100.14	89.9
		14	40.59	—	0.01	0.07	9.22	0.37	0.13	49.06	0.05	99.49	90.5
		15	40.43	—	—	—	8.94	0.43	0.07	48.90	0.05	98.81	90.8
含长橄榄单辉岩	P23-5	1	38.14	0.02	—	—	24.97	0.00	0.28	34.72	0.03	98.15	71.5
		3	37.66	0.02	—	0.05	27.84	0.04	0.33	34.87	0.04	100.86	69.3
		4	37.56	—	0.01	0.14	27.01	—	0.25	35.04	0.04	100.04	70.0
		5	37.77	—	—	0.05	28.83	—	0.28	34.87	0.03	101.83	68.5
		6	37.82	0.01	—	0.04	28.62	—	0.21	34.77	0.03	101.50	68.6
		7	37.96	—	0.01	0.10	28.85	0.02	0.20	34.49	0.04	101.67	68.3
		8	37.34	0.03	0.01	0.11	27.34	0.05	0.35	35.01	0.05	100.28	69.7
		9	37.93	0.03	—	0.06	28.11	—	0.31	34.55	0.04	101.02	68.9
		10	37.78	0.01	—	0.12	28.41	0.01	0.34	35.07	0.02	101.76	69.0
		11	37.34	—	—	0.14	28.40	0.00	0.13	34.43	0.04	100.48	68.6

续表 1

Continued Table 1

岩性	样品号	测点号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	FeO	NiO	MnO	MgO	CaO	Total	Fo (mol%)
		12	37.64	0.01	—	0.08	28.10	0.08	0.20	34.14	0.06	100.31	68.6
		13	37.65	—	—	0.04	28.62	—	0.31	34.35	0.05	101.02	68.4
		14	37.82	0.02	0.13	0.08	28.08	—	0.34	34.24	0.09	100.79	68.7
		15	37.37	—	—	0.08	26.91	—	0.34	34.08	0.05	98.83	69.5
		16	37.50	0.04	—	—	28.60	—	0.30	34.59	0.04	101.05	68.5
含长二辉橄榄岩	P34-2	1	39.62	0.01	0.02	0.10	17.93	0.15	0.23	43.61	0.03	101.70	81.4
		2	39.83	—	—	0.09	17.00	0.26	0.10	43.83	0.02	101.14	82.3
		3	39.66	—	0.03	0.03	17.86	0.23	0.20	43.25	0.04	101.30	81.3
		4	40.21	0.03	—	0.03	17.13	0.16	0.25	43.70	0.04	101.53	82.1
		5	40.29	0.04	0.04	0.16	17.00	0.19	0.31	43.34	0.03	101.40	82.1
		6	39.95	0.02	—	—	17.01	0.16	0.19	43.93	0.02	101.27	82.3
		7	39.62	0.01	0.01	0.07	17.12	0.24	0.26	43.61	0.05	100.99	82.1
		8	39.63	0.05	0.02	0.99	16.55	0.21	0.18	43.58	0.04	101.25	82.6
		9	40.28	—	—	0.07	16.99	0.23	0.19	43.98	0.04	101.78	82.3
		10	39.60	0.03	—	0.01	17.03	0.17	0.25	43.95	0.03	101.06	82.3
含长二辉橄榄岩	P34-1	1	39.65	0.03	0.03	0.03	18.88	0.25	0.27	42.66	0.05	101.85	80.3
		2	39.37	0.01	0.02	—	19.06	0.22	0.20	42.60	0.06	101.54	80.1
		3	39.90	—	—	—	18.32	0.21	0.25	42.69	0.03	101.40	80.7
		4	39.78	—	—	0.01	18.10	0.24	0.32	42.73	0.03	101.222	80.9
		5	40.05	—	0.01	0.10	17.81	0.22	0.09	43.54	0.04	101.86	81.5
		6	39.33	0.01	—	—	17.73	0.16	0.27	43.83	0.04	101.37	81.6
		7	39.17	0.01	0.02	—	18.15	0.24	0.18	42.78	0.03	100.57	80.9
坡东岩体													
辉长岩	PDZK27-2-3	1	38.92	—	0.01	0.05	21.79	0.34	0.32	38.90	0.05	100.36	76.3
橄榄辉长苏长岩	PDZK27-2-17	1	38.48	—	0.01	—	22.93	0.35	0.36	38.87	0.10	101.09	75.3
		2	38.98	0.01	—	—	22.95	0.18	0.29	38.80	0.06	101.26	75.3
		3	38.41	—	—	—	23.54	0.30	0.33	38.89	0.04	101.51	74.8
		4	38.36	0.01	—	—	22.54	0.20	0.40	38.37	0.04	99.91	75.4
		5	38.74	0.03	—	0.05	22.27	0.16	0.28	39.35	0.04	100.92	76.1
		6	38.69	0.02	—	—	22.59	0.28	0.13	39.39	0.01	101.10	75.8
	PDZK27-2-459	1	39.40	—	—	0.03	20.22	0.27	0.21	41.30	0.03	101.47	78.6
		2	39.49	0.02	—	—	17.95	0.13	0.33	42.57	0.04	100.51	81.0
		3	38.76	—	—	0.03	21.43	0.20	0.31	40.63	0.01	101.37	77.3
		4	39.51	—	0.04	0.01	19.66	0.21	0.18	41.51	0.03	101.15	79.2
		5	38.42	0.01	0.02	0.07	20.06	0.18	0.34	41.26	0.04	100.38	78.7
		6	39.21	—	—	—	20.06	0.16	0.29	41.47	0.04	101.23	78.8
		7	39.41	—	—	0.02	19.87	0.16	0.31	41.82	0.05	101.63	79.1
橄榄二辉岩	PDZK27-2-6	1	38.75	—	0.02	0.06	22.31	0.22	0.30	40.14	0.05	101.84	76.4
		2	38.72	0.01	0.02	—	22.23	0.23	0.16	40.07	0.03	101.48	76.4
	PDZK27-2-5	1	38.76	—	—	0.06	20.90	0.28	0.38	41.13	0.04	101.55	78.0
		2	39.89	—	0.01	—	18.31	0.26	0.40	42.87	0.03	101.77	80.8
		3	39.32	0.04	—	0.13	19.68	0.12	0.29	41.89	0.05	101.51	79.3
		4	39.53	0.03	—	—	20.37	0.20	0.33	40.35	0.03	100.84	78.1
	PDZK27-2-7	1	39.13	0.02	0.02	—	22.07	0.13	0.28	39.73	0.05	101.42	76.4
		2	39.13	0.02	—	0.13	21.11	0.14	0.20	40.69	0.04	101.45	77.6
		3	39.36	0.01	—	0.04	20.53	0.23	0.25	40.38	0.05	100.84	78.0
		4	39.08	0.01	—	0.02	20.59	0.19	0.29	41.21	0.05	101.44	78.3
		5	39.23	—	0.02	—	21.27	0.18	0.24	39.71	0.02	100.66	77.1
		6	38.69	—	0.02	0.06	24.06	0.15	0.29	39.12	0.03	102.41	74.5
	PDZK27-2-9	1	39.14	0.05	—	0.13	21.26	0.32	0.26	40.29	0.03	101.48	77.3

注：“—”表示低于检测限，后表同

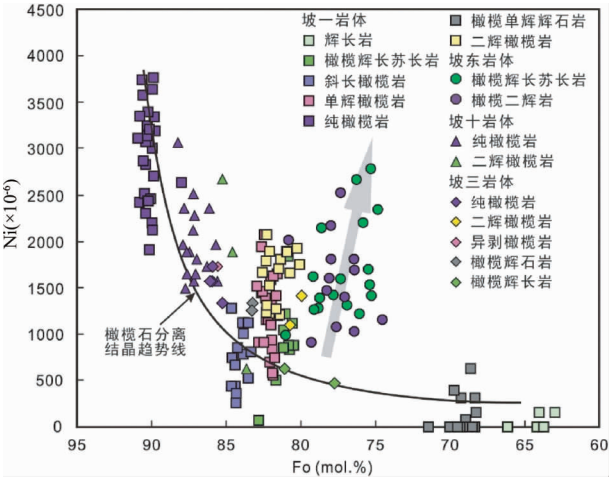


图 4 坡一和坡东岩体不同岩相中橄榄石 Fo 值和 Ni 含量图解

坡十岩体数据来自苏本勋等(2011);坡三岩体数据来自 Ma *et al.* (2016)

Fig. 4 Plot of Fo versus Ni for olivine grains from the Poyi and Podong intrusions

Data of the Poshi intrusion from Su *et al.* (2011), Posan intrusion from Ma *et al.* (2016)

49.6%,FeO 含量为 8.7% ~11.7%,相应具有坡北杂岩体中最高的 Fo 值 88.0mol% ~90.9mol% 和 Ni 含量 1910×10^{-6} ~3764×10^{-6}(表 1),Fo 值变化范围并不大,而 Ni 含量相差 1854×10^{-6},二者之间的相关性并不明确(图 4)。斜长橄榄岩中橄榄石的 MgO 含量为 44.05% ~45.26%,FeO 含量为 14.63% ~16.28%,Fo 值 83.3mol% ~84.7mol%,低于纯橄榄岩中相应值,Ni 含量 259×10^{-6} ~1281×10^{-6}(表 1)。二辉橄榄岩和单辉橄榄岩中橄榄石成分相似,MgO 含量为 42.46% ~43.98%,FeO 含量为 15.99% ~19.06%,Fo 值 80.1mol% ~82.9mol%。橄榄单辉辉石岩中橄榄石 MgO 含量为 34.08% ~35.07%,FeO 含量为 24.97% ~28.85%,具有非常低的 Fo 值 68.3mol% ~71.5mol% 和 Ni 含量 0 ~629×10^{-6}(表 1、图 4)。坡一岩体中镁铁质岩石不同岩性之间橄榄石成分差别较大,其中橄榄辉长苏长岩中橄榄石成分与二辉橄榄岩和单辉橄榄岩相似,MgO 含量分别为 29.30% ~42.80%,FeO 含量为 10.93% ~18.58%,Fo 值 80.5mol% ~82.8mol%,Ni 含量为 71 $\times10^{-6}$ ~1839×10^{-6}(表 1、图 4)。辉长岩代表岩浆演化晚期的产物,因为其橄榄石具有低 MgO 含量 30.98% ~32.93%,高 FeO 含量 30.35% ~32.77%,及最低的 Fo 值 63.0mol% ~66.1mol% 和 Ni 含量 0 ~157×10^{-6}(表 1、图 4)。

坡东岩体橄榄辉长苏长岩中橄榄石 MgO 含量为 38.37% ~42.57%,FeO 含量为 17.95% ~23.54%,Fo 值为 74.8mol% ~81.0mol%,Ni 含量为 990×10^{-6} ~2782×10^{-6}(表 1、图 4)。橄榄二辉岩中橄榄石成分与橄榄辉长苏长岩相中橄榄石成分相似,MgO 含量为 39.12% ~42.87%,FeO 含量为 18.31% ~24.06%,Fo 值 74.5mol% ~80.8mol%,Ni 含量 912×10^{-6} ~2522×10^{-6}(表 1、图 4)。

5.1.2 单斜辉石

坡一和坡东岩体不同岩相带的单斜辉石成分相似,MgO 含量为 13.88% ~22.03%,CaO 含量为 11.97% ~24.13%,FeO 含量为 3.22% ~10.96%,Al_2O_3 含量为 0.44% ~3.64%,TiO_2 含量为 0.10% ~1.27%(表 2)。经计算得到坡一和坡东岩体中单斜辉石的 Wo(硅灰石)含量为 24mol% ~49mol%,En(顽火辉石)含量为 41mol% ~61mol%,Fs(斜铁辉石)含量为 4mol% ~18mol%,为普通辉石(表 2、图 5)。

5.1.3 斜方辉石

坡一和坡东岩体中辉长岩和辉长苏长岩的斜方辉石 MgO 含量为 21.26% ~28.06%,低于其他岩性中斜方辉石的 MgO 含量 23.90% ~31.26%,而 FeO 含量为 13.73% ~23.03%,高于其他岩性中斜方辉石的 FeO 含量 8.08% ~19.20%,而 CaO 含量基本一致为 0.18% ~7.67%。经过计算得到坡一和坡东镁铁质岩石中斜方辉石端元分子为:Wo 为 1mol% ~5mol%,En 为 61mol% ~82mol%,Fs 为 16mol% ~37mol%,为紫苏辉石(表 3、图 5),超镁铁质岩石中斜方辉石端元分子为:Wo 0 ~16mol%,En 为 72mol% ~86mol%,Fs 为 13mol% ~26mol%,为古铜辉石(表 3、图 5)。

5.1.4 斜长石

坡一岩体超镁铁质岩石和橄榄辉长苏长岩中斜长石成分较接近,SiO_2 含量为 43.92% ~50.41%,CaO 和 Al_2O_3 含

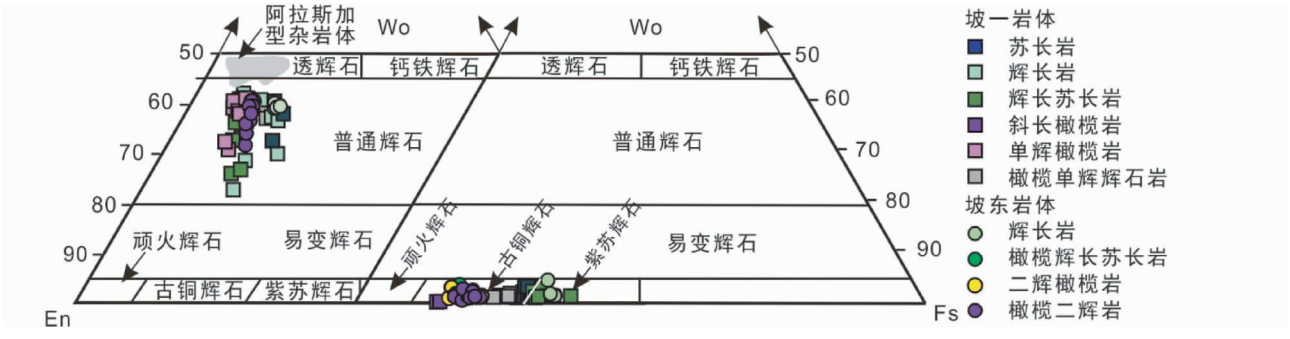


图 5 坡一和坡东岩体中单斜辉石和斜方辉石分类图解(据 Morimoto, 1988)

Fig. 5 Diagram of classification for clinopyroxene and orthopyroxene from the Poyi and Podong intrusions (after Morimoto, 1988)

表 2 坡一和坡东岩体中单斜辉石成分(wt%)

Table 2 Composition of clinopyroxene of the Poyi and Podong intrusions (wt%)

岩性	样品号	测点号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MgO	CaO	Na_2O	NiO	Total	Wo	En	Fs
												(mol%)		
坡一岩体														
辉长岩	P23-4	1	52.29	0.53	2.33	5.31	14.84	22.73	0.27	0.69	99.01	48	43	9
	P23-21	1	54.06	0.47	2.50	9.57	20.89	13.11	0.38	—	100.97	27	59	14
		2	51.81	0.64	2.80	4.32	15.45	23.00	0.38	0.62	99.03	49	46	5
		3	53.17	0.41	2.47	8.84	18.59	16.14	0.28	0.46	100.37	33	53	13
		4	52.54	0.42	2.45	4.69	15.84	22.53	0.22	0.25	98.94	47	46	8
		5	52.66	0.48	2.54	5.35	16.18	21.40	0.24	0.55	99.39	45	47	9
		6	52.31	0.48	2.45	6.05	17.60	18.59	0.30	0.54	98.31	39	52	9
		7	52.34	0.49	2.86	4.76	15.49	22.76	0.24	0.42	99.35	48	45	7
		8	52.17	0.57	2.81	4.66	15.86	22.47	0.31	0.36	99.20	47	46	6
辉长苏长岩	PB1	1	53.90	0.48	2.15	9.04	15.08	17.26	0.41	0.01	98.33	38	46	16
		2	52.97	0.42	2.01	6.82	13.88	22.15	0.36	0.07	98.68	47	41	11
		3	51.79	0.69	2.50	9.87	14.03	21.07	0.36	—	100.31	44	41	14
辉长岩	PB5	1	51.04	1.07	2.82	8.10	14.08	21.28	0.43	0.26	99.09	46	42	12
		2	50.52	1.12	2.92	9.37	14.21	19.82	0.44	0.15	98.55	43	43	14
		3	50.35	1.27	3.48	9.42	14.41	20.03	0.46	0.22	99.63	44	44	13
		4	51.86	0.87	2.25	10.96	16.02	16.61	0.28	0.13	98.97	35	47	18
橄榄辉长苏长岩	PB3	1	54.72	0.76	2.53	3.50	16.05	20.87	0.42	0.52	99.35	45	49	6
		2	54.01	0.63	2.91	3.22	15.65	22.53	0.34	0.58	99.86	48	47	5
		3	52.98	0.56	2.36	3.67	15.76	22.60	0.29	0.55	98.77	48	46	6
	PB7	1	53.11	0.54	2.64	5.03	17.13	20.00	0.36	0.25	99.06	42	50	8
		2	52.83	0.44	2.53	5.78	18.52	18.50	0.23	0.45	99.27	38	53	9
		3	52.53	0.59	2.52	5.35	16.79	20.59	0.27	0.31	98.94	43	49	9
		4	52.93	0.36	1.82	3.94	15.90	23.30	0.22	0.24	98.72	48	46	6
		5	53.42	0.44	2.36	9.73	20.27	14.89	0.19	0.30	101.60	30	57	12
		6	52.67	0.54	2.70	4.55	15.93	22.42	0.29	0.45	99.54	47	46	7
		7	52.53	0.51	3.27	3.92	15.69	22.58	0.43	0.50	99.43	48	46	6
		8	53.54	0.49	2.71	4.18	16.97	19.73	0.28	0.34	98.25	42	51	7
		9	54.29	0.38	2.25	10.04	22.03	11.97	0.10	0.34	101.40	24	61	15
		10	53.91	0.18	1.55	3.37	16.86	23.17	0.22	0.18	99.43	47	48	5
		11	54.46	0.10	0.44	3.66	17.08	24.13	0.13	0.03	100.03	48	47	5
		12	53.28	0.40	2.32	8.47	19.53	15.31	0.21	0.18	99.69	31	55	13
单辉橄榄岩	Ib21	1	51.68	0.70	2.66	4.61	16.55	21.39	0.38	0.74	98.71	46	49	5
		2	52.37	0.41	2.20	6.88	18.85	17.10	0.24	0.75	98.79	36	55	9
		3	52.36	0.41	2.29	6.79	18.64	17.92	0.33	0.55	99.27	38	55	7
		4	51.97	0.45	2.29	4.53	16.36	22.28	0.37	0.51	98.76	47	48	4
		5	52.22	0.41	2.28	4.66	16.55	21.31	0.34	0.78	98.54	45	49	6
		6	52.86	0.54	2.43	4.36	15.82	22.32	0.33	0.49	99.16	47	46	7
		7	52.57	0.34	2.45	4.89	16.48	20.84	0.44	0.83	98.85	44	49	7
		8	52.00	0.52	2.81	4.41	15.14	22.05	0.37	2.18	99.48	48	46	6
含长二辉橄榄岩	P34-2	1	52.27	0.52	3.31	4.67	17.07	20.75	0.38	0.02	98.98	44	50	7
		2	52.31	0.48	3.07	3.93	16.64	20.44	0.41	0.05	97.32	44	50	7
	P34-1	1	53.03	0.38	1.88	5.68	18.16	19.35	0.23	0.02	98.72	40	52	9
含长橄榄单辉岩	P23-5	1	52.31	0.67	2.04	7.49	15.00	21.25	0.31	0.25	99.31	44	44	12
		2	51.66	0.83	2.45	6.47	14.64	22.03	0.27	0.16	98.51	46	43	11
		3	53.49	0.35	1.14	6.84	15.51	22.44	0.04	0.28	100.08	45	44	11
		4	51.99	0.83	2.30	9.00	15.41	20.87	0.25	0.11	100.76	43	45	12
		5	51.76	0.80	2.52	7.06	14.70	22.15	0.33	0.12	99.43	47	43	10
		6	53.30	0.13	0.94	6.65	15.32	22.77	0.14	0.02	99.27	46	43	10
		7	53.59	0.50	1.58	7.06	15.23	22.17	0.28	0.16	100.57	45	43	11
		8	53.33	0.26	1.13	6.34	15.26	22.74	0.17	0.14	99.38	46	43	10
		9	53.69	0.16	0.95	6.17	15.62	22.79	0.09	0.14	99.61	46	44	10

续表 2

Continued Table 2

岩性	样品号	测点号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MgO	CaO	Na_2O	NiO	Total	Wo	En	Fs
												(mol%)		
		10	51.88	0.71	2.23	6.71	14.29	22.45	0.19	0.07	98.53	47	42	11
		11	53.30	0.21	1.39	6.70	14.97	22.49	0.17	0.06	99.28	46	43	11
		12	51.97	0.63	2.12	6.91	14.57	21.96	0.32	0.17	98.66	46	43	11
坡东岩体														
辉长岩	PDZK27-2-3	1	52.26	0.61	1.70	8.21	14.04	22.16	0.39	—	99.38	47	41	12
		2	52.12	0.41	1.50	7.70	14.20	22.30	0.32	—	98.54	47	42	12
		3	52.51	0.39	1.47	8.88	14.38	22.01	0.32	—	99.97	46	42	12
		4	52.08	0.53	1.99	8.39	13.99	21.99	0.35	—	99.31	46	41	13
橄榄辉长苏长岩	PDZK27-2-8	1	53.05	0.59	2.62	4.86	15.32	22.25	0.44	—	99.13	47	45	8
	PDZK27-2-459	1	51.83	0.84	3.12	4.15	15.80	21.81	0.53	0.08	98.16	47	47	7
		2	52.41	0.57	2.63	5.17	16.15	21.62	0.37	0.02	98.94	45	47	8
橄榄二辉岩	PDZK27-2-9	1	52.99	0.54	2.56	5.54	15.46	22.77	0.43	0.08	100.35	47	45	8
		2	52.27	0.63	2.50	7.70	17.74	17.66	0.34	0.07	98.91	37	52	11
		3	52.65	0.45	2.75	5.12	15.54	22.64	0.44	0.09	99.67	47	45	7
		4	52.82	0.48	2.55	4.71	15.56	22.51	0.39	—	99.01	47	45	8
	PDZK27-2-5	1	52.78	0.71	2.76	7.10	17.37	19.24	0.34	—	100.30	40	50	10
		2	51.94	0.82	3.03	5.60	16.10	20.19	0.50	0.06	98.23	43	48	9
		3	52.71	0.63	2.67	4.90	15.79	21.97	0.45	0.08	99.20	46	46	8
	PDZK27-2-7	1	53.27	0.43	2.23	5.46	16.75	20.01	0.39	0.08	98.60	42	49	9
		2	52.64	0.66	2.63	4.75	15.54	22.66	0.45	0.04	99.39	47	45	7
		3	52.37	0.73	2.92	4.97	15.67	22.12	0.42	0.04	99.23	46	46	8
		4	52.80	0.72	2.80	4.92	15.91	22.08	0.50	0.07	99.78	46	46	7
		5	49.02	0.74	3.64	6.44	14.99	19.83	0.41	0.10	95.17	45	47	9

表 3 坡一和坡东岩体中斜方辉石成分(wt%)

Table 3 Composition of orthopyroxene of the Poyi and Podong intrusions (wt%)

岩性	样品号	测点号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Total	Wo	En	Fs
											(mol%)		
坡一岩体													
辉长岩	P23-21	1	53.92	0.21	2.15	13.73	0.23	28.06	0.62	98.91	1	78	21
苏长岩	Ib10	1	54.35	0.19	1.13	17.13	0.39	25.11	0.77	99.05	2	71	27
		2	54.41	0.09	0.97	17.40	0.44	23.90	1.24	98.46	3	69	28
		3	55.20	0.19	1.36	17.00	0.32	25.59	0.80	100.46	2	72	27
		4	54.72	0.19	1.33	17.37	0.34	24.97	0.70	99.60	1	71	28
		5	54.90	0.18	1.31	17.11	0.43	25.26	0.89	100.07	2	71	27
		6	55.07	0.22	1.13	16.71	0.20	25.52	0.78	99.62	2	72	26
		7	54.09	0.17	1.25	16.33	0.29	25.49	0.75	98.36	2	72	26
		8	55.03	0.25	1.06	16.64	0.35	25.31	0.86	99.50	2	72	26
		9	53.56	0.17	1.26	19.20	0.40	24.31	2.00	100.89	4	68	28
		10	53.69	0.26	1.24	19.17	0.39	24.30	0.73	99.77	1	68	30
		11	53.94	0.12	1.15	18.81	0.24	24.35	1.91	100.51	4	68	28
辉长苏长岩	PB1	1	54.56	0.15	1.14	18.50	0.38	23.39	1.32	99.45	3	67	30
		2	53.97	0.17	1.04	20.43	0.44	22.27	0.73	99.06	2	65	33
		3	54.23	0.24	1.25	18.95	0.32	23.13	0.66	98.78	1	68	31
		4	53.06	0.19	1.14	19.41	0.22	22.82	1.85	98.69	4	65	31
		5	53.36	0.15	0.94	22.55	0.33	23.35	0.81	101.48	2	66	33
		6	52.63	0.17	1.22	23.03	0.29	21.26	0.80	99.39	2	61	37
		7	53.88	0.22	0.79	22.11	0.21	23.55	0.85	101.60	2	65	33
		8	54.05	0.23	0.92	22.07	0.17	23.31	0.78	101.53	2	64	34
辉长岩	PB5	1	53.48	0.21	1.26	20.26	0.31	23.90	0.76	100.17	2	67	31

续表 3

Continued Table 3

岩性	样品号	测点号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Total	Wo	En	Fs
											(mol%)		
斜长橄榄岩	Ib25	1	56.46	0.05	2.35	9.12	0.10	31.13	0.18	99.37	0	86	14
		2	56.44	0.04	2.33	9.55	0.22	31.26	0.23	100.07	0	85	15
橄榄辉长苏长岩	PB3	1	54.82	0.30	1.63	12.10	0.18	29.78	1.09	99.89	2	81	16
单辉橄榄岩	Ib21	1	55.42	0.30	1.77	8.08	0.18	25.31	7.67	98.72	16	72	13
		2	53.48	0.32	1.55	10.99	0.26	25.54	6.14	98.27	12	72	16
橄榄单辉岩	P23-5	1	54.35	0.28	1.11	15.48	0.24	26.30	0.90	98.67	2	74	24
		2	54.94	0.26	1.32	14.96	0.38	26.71	0.74	99.31	1	75	24
		3	54.58	0.32	1.25	16.96	0.24	26.09	1.15	100.60	2	72	26
		4	54.29	0.24	1.32	17.52	0.44	26.02	0.86	100.69	2	72	26
坡东岩体													
辉长岩	PDZK27-2-3	1	52.84	0.25	0.81	21.88	0.35	22.69	0.74	99.56	2	64	34
		2	52.90	0.25	0.84	21.33	0.43	22.48	0.76	98.99	2	64	34
		3	53.61	0.24	0.69	21.72	0.51	22.60	0.92	100.29	2	64	34
		4	53.25	0.15	0.91	19.69	0.41	22.39	2.63	99.43	5	63	31
		5	53.75	0.22	0.76	21.96	0.27	22.95	0.87	100.80	2	64	34
		6	52.49	0.26	0.78	21.77	0.46	22.60	1.06	99.42	2	65	33
		7	55.23	0.23	1.27	13.84	0.23	28.02	0.93	99.75	2	77	21
橄榄辉长苏长岩	PDZK27-2-8	1	56.09	0.16	1.11	11.97	0.41	30.51	0.69	100.94	1	81	17
		2	54.76	0.17	2.00	11.62	0.26	29.54	0.66	99.01	1	81	18
		3	53.78	0.22	1.36	12.06	0.21	29.42	0.84	97.88	2	82	16
	PDZK27-2-17	1	55.42	0.18	1.09	13.65	0.35	29.04	0.77	100.49	1	79	20
		2	55.48	0.36	1.82	10.64	0.16	29.45	2.20	100.11	4	80	16
		3	55.74	0.32	1.70	11.22	0.27	30.65	0.86	100.75	2	82	16
	PDZK27-2-459	1	54.94	0.27	1.71	12.85	0.29	29.43	0.77	100.25	2	80	18
		2	54.99	0.22	1.99	12.84	0.18	28.47	0.83	99.52	2	78	20
		3	54.96	0.27	1.60	12.71	0.30	29.47	0.77	100.08	2	80	18
		4	55.31	0.24	1.92	12.95	0.16	29.13	0.69	100.34	1	79	20
		5	54.73	0.26	1.58	13.29	0.34	28.24	0.70	99.14	1	78	21
		6	54.79	0.36	1.54	13.62	0.33	28.65	1.14	100.43	2	78	19
		7	55.22	0.23	1.83	13.48	0.22	29.41	0.66	101.05	1	79	19
含长二辉橄榄岩	PDZK34-2	1	55.84	0.22	1.79	10.65	0.23	30.19	1.17	100.08	2	82	16
		2	56.79	0.06	1.24	10.58	0.23	31.18	0.64	100.70	1	83	16
		3	55.41	0.19	2.15	10.26	0.07	30.19	1.92	100.18	4	81	15
	PDZK34-1	1	55.64	0.26	1.65	11.32	0.15	30.37	0.88	100.26	2	81	17
		2	55.94	0.26	1.37	11.93	0.18	30.51	0.81	100.99	2	81	17
		3	55.64	0.26	1.82	11.82	0.10	30.35	1.00	100.99	2	81	17
		4	56.30	0.24	1.36	11.01	0.13	30.32	1.10	100.44	2	81	17
橄榄二辉岩	PDZK27-2-5	1	55.29	0.34	1.62	12.76	0.31	28.68	1.57	100.57	3	78	19
	PDZK27-2-6	1	54.46	0.31	1.78	12.97	0.26	29.19	1.13	100.11	2	80	18
		2	54.77	0.26	2.04	11.55	0.27	30.00	0.77	99.67	2	82	17
		3	54.66	0.22	1.61	13.56	0.23	28.20	0.80	99.27	2	78	21
	PDZK27-2-7	1	56.20	0.08	0.79	12.70	0.26	30.28	0.39	100.70	1	81	18
		2	54.72	0.26	1.51	11.73	0.23	29.15	1.65	99.26	3	79	17
	PDZK27-2-9	1	54.73	0.25	1.76	12.26	0.18	28.85	0.81	98.84	2	79	19
		2	54.78	0.28	1.63	12.05	0.21	29.01	1.68	99.64	3	79	17
		3	55.00	0.20	1.32	13.09	0.36	28.63	1.37	99.97	3	78	19
		4	55.55	0.22	1.46	14.00	0.29	28.73	0.71	100.96	1	77	21
		5	54.24	0.24	1.66	13.85	0.36	28.68	0.66	99.68	1	79	20
		6	55.76	0.16	1.39	13.64	0.14	29.11	0.76	100.96	1	78	20
		7	55.17	0.17	1.55	13.92	0.30	28.87	0.83	100.81	2	78	20
		8	53.78	0.33	2.25	11.65	0.24	27.31	4.33	99.89	9	76	15

表 4 坡一和坡东岩体中斜长石成分(wt%)

Table 4 Composition of plagioclase of the Poyi and Podong intrusions (wt%)

岩性	样品号	测点号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	Total	An (mol%)
坡一岩体												
辉长岩	P23-21	1	48.52	0.04	33.76	0.23	—	14.40	2.52	0.01	99.48	76
		2	49.50	0.01	33.14	0.19	—	13.48	3.18	0.01	99.51	70
		3	49.14	0.05	33.79	0.17	—	14.03	2.79	—	99.97	74
		4	49.86	0.04	33.44	0.02	0.02	13.75	3.12	0.02	100.27	71
		5	48.61	0.04	32.84	—	0.02	15.80	2.54	0.01	99.85	77
		6	48.63	0.04	32.25	0.23	0.02	15.67	2.52	0.03	99.39	77
		7	48.25	0.04	32.46	0.18	0.02	15.90	2.44	0.05	99.34	78
		8	48.12	0.03	32.34	0.29	0.03	15.61	2.54	0.03	98.98	77
	P23-4	1	50.18	—	32.66	0.03	0.01	13.18	3.13	0.01	99.21	70
		2	49.68	0.03	33.06	0.19	0.03	13.69	3.12	0.02	99.81	71
		3	50.37	0.03	33.06	0.28	—	13.24	3.38	0.02	100.37	68
		4	48.58	0.05	33.17	0.16	—	13.76	2.95	0.01	98.69	72
		5	50.25	0.01	31.49	0.19	0.01	14.19	3.30	0.02	99.45	70
	PB5	1	50.04	0.06	32.22	0.18	0.01	12.75	3.51	0.05	98.82	67
		2	50.50	0.04	32.02	0.15	—	12.59	3.67	0.04	99.01	65
		3	54.84	0.02	29.40	0.12	0.02	9.99	5.61	0.07	100.07	49
		4	53.23	0.06	29.95	0.12	—	10.79	5.06	0.10	99.31	54
		5	50.59	0.05	32.19	0.17	0.03	13.10	3.32	0.06	99.50	68
		6	55.36	0.11	29.33	0.17	—	9.57	6.15	0.06	100.75	46
		7	55.73	0.11	29.34	0.16	0.01	9.41	6.08	0.12	100.97	46
		8	52.00	0.07	30.45	0.17	—	13.26	3.80	0.05	99.78	66
橄榄辉长苏长岩	PB3	1	46.70	0.03	34.18	0.15	0.01	17.25	1.63	0.01	99.96	85
		2	43.92	0.01	35.60	1.60	0.89	18.52	0.33	—	100.88	97
		3	47.36	0.02	33.43	0.18	0.01	16.74	1.89	0.02	99.65	83
		4	48.71	0.04	33.03	0.22	—	15.84	2.31	0.05	100.20	79
		5	46.07	—	34.80	0.16	—	17.92	1.26	—	100.21	89
		6	48.08	0.02	33.15	0.13	—	16.29	2.18	0.04	99.89	80
		7	47.62	0.03	32.92	0.18	0.01	16.50	1.88	0.04	99.17	83
	PB7	1	49.08	0.04	32.47	0.27	0.08	15.53	2.50	0.02	100.00	77
		2	48.51	—	32.80	0.14	—	15.54	2.59	0.01	99.59	77
		3	49.66	0.05	32.60	0.07	0.01	15.29	2.77	0.01	100.46	75
		4	48.92	0.03	31.88	0.11	0.01	15.36	2.93	0.01	99.25	74
		5	49.68	0.05	32.44	0.13	—	14.93	2.93	0.01	100.17	74
		6	48.41	0.03	32.55	0.16	—	15.85	2.62	—	99.62	77
		7	48.92	0.08	32.79	0.18	0.01	15.49	2.55	—	100.03	77
		8	49.09	0.09	32.26	0.13	0.03	15.53	2.43	0.03	99.58	78
		9	48.18	0.01	32.68	0.05	0.01	15.97	2.37	0.01	99.29	79
		10	49.24	0.04	32.58	0.02	0.02	15.56	2.85	—	100.30	75
苏长岩	Ib10	1	54.40	—	30.02	0.17	0.01	10.22	5.87	0.06	100.75	49
		2	54.66	0.01	30.00	0.09	0.03	10.47	5.83	0.08	101.17	50
		3	55.00	—	29.70	0.07	—	10.24	5.42	0.15	100.58	51
		4	54.83	0.05	29.72	0.20	0.03	10.18	5.48	0.11	100.60	50
		5	55.44	—	29.83	0.07	—	10.24	5.68	0.08	101.34	50
		6	55.23	0.04	30.03	0.11	0.03	10.29	5.69	0.11	101.53	50
		7	53.81	—	29.08	0.07	—	11.79	4.77	0.15	99.67	57
辉长苏长岩	PB1	1	53.48	0.06	29.07	0.16	0.02	10.52	5.17	0.20	98.67	52
		2	54.72	0.05	30.05	0.15	0.05	10.70	5.16	0.20	101.06	53
斜长橄榄岩	Ib25	1	49.58	0.05	32.74	0.01	0.01	13.34	3.41	—	99.13	68
		2	49.30	0.05	32.58	0.12	0.01	13.25	3.12	0.01	98.43	70
		3	49.69	0.01	32.72	0.14	—	13.15	3.41	0.03	99.15	68

续表 4

Continued Table 4

岩性	样品号	测点号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	Total	An (mol%)
		4	50.06	0.23	32.61	0.17	0.01	13.19	3.40	0.03	99.69	68
		5	49.87	0.06	33.35	0.14	0.03	13.57	3.17	0.01	100.19	70
		6	48.86	0.04	32.72	0.14	0.09	13.63	3.05	0.07	98.58	71
	PB6	1	47.08	0.02	35.12	0.14	0.01	15.42	1.24	—	99.03	87
		2	49.03	0.04	33.36	0.07	—	14.07	2.60	—	99.18	75
		3	49.16	0.05	33.33	0.04	—	14.02	2.97	0.01	99.57	72
		4	48.51	0.05	33.52	0.00	—	14.15	2.57	0.01	98.80	75
		5	49.32	0.07	33.28	0.04	—	13.75	2.89	0.01	99.36	72
橄榄辉长岩	Ib17	1	53.11	0.01	30.82	0.12	0.01	11.54	4.85	—	100.47	57
		2	55.05	0.03	29.96	0.08	0.04	10.53	5.74	0.04	101.45	50
		3	53.77	0.05	30.28	0.07	0.01	10.69	5.16	0.05	100.08	53
		4	54.59	0.07	29.40	0.14	—	10.06	5.59	0.05	99.90	50
		5	53.77	0.04	29.91	0.14	0.03	10.94	5.51	0.04	100.39	52
		6	55.30	0.08	29.66	0.19	—	9.94	6.06	0.04	101.27	47
		7	54.60	0.05	29.43	0.01	0.04	10.21	5.54	0.07	99.94	50
		8	52.36	0.02	31.52	0.02	0.01	12.06	4.50	0.05	100.55	59
单辉橄榄岩	Ib21	1	48.45	0.04	33.57	0.14	0.02	14.09	2.60	0.02	98.93	75
		2	48.51	0.03	33.32	0.08	—	13.94	2.67	0.01	98.56	74
		3	49.17	0.05	33.08	0.11	0.03	13.67	2.87	—	98.99	72
		4	48.92	0.06	33.50	0.04	0.02	13.83	2.77	0.02	99.16	73
		5	50.41	0.06	32.68	0.04	—	13.34	3.18	0.02	99.73	70
		6	48.92	0.06	33.50	0.04	0.02	13.83	2.77	0.02	99.16	73
		7	50.41	0.06	32.68	0.04	—	13.34	3.18	0.02	99.73	70
含长橄榄单辉岩	P23-5	1	47.60	0.02	33.94	0.29	—	14.52	2.31	0.01	98.67	78
		2	48.68	0.01	33.57	0.12	—	14.21	2.80	0.01	99.39	74
		3	44.83	0.04	35.19	0.16	—	18.67	0.78	0.01	99.67	93
		4	48.17	0.01	32.11	0.15	0.03	15.70	2.53	0.01	98.69	77
坡东岩体												
辉长岩	PDZK27-2-4	1	52.33	0.01	30.34	0.02	0.01	12.91	4.17	0.03	99.81	63
		2	49.28	0.05	32.41	0.06	—	15.26	2.84	0.01	99.91	75
		3	50.03	—	32.44	0.05	0.01	14.90	2.94	0.02	100.41	74
		4	49.95	0.03	31.84	0.11	—	14.76	3.20	0.01	99.90	72
辉长岩	PDZK27-2-3	1	53.85	0.03	29.80	0.17	0.01	12.35	4.56	0.19	100.96	59
		2	47.60	0.03	32.73	0.27	—	15.96	2.38	0.09	99.05	78
		3	54.20	0.05	29.45	0.23	0.02	11.79	4.62	0.23	100.60	58
		4	53.40	0.07	29.17	0.18	0.01	11.87	4.66	0.24	99.60	58
		5	53.24	0.02	29.66	0.25	—	11.89	4.54	0.20	99.80	58
		6	52.83	0.02	29.50	0.13	0.01	11.89	4.66	0.22	99.25	58
		7	52.93	0.03	29.00	0.21	—	11.96	4.04	0.24	98.41	61
辉长苏长岩	PDZK27-2-10	1	53.38	0.05	29.74	0.17	0.02	12.26	4.64	0.07	100.33	59
		2	52.79	0.08	30.36	0.53	0.04	12.61	3.96	0.24	100.61	63
		3	52.53	0.06	30.38	0.24	0.02	12.86	4.08	0.13	100.29	63
		4	52.17	0.02	30.54	0.13	0.01	12.81	4.43	0.04	100.16	61
橄榄辉长苏长岩	PDZK27-2-8	1	49.15	0.04	32.15	0.06	0.01	15.26	2.68	0.02	99.36	76
		2	48.32	—	33.14	0.18	0.01	16.11	2.37	0.01	100.15	79
		3	47.74	0.01	33.06	0.02	0.01	15.55	2.27	0.03	98.66	79
	PDZK27-2-17	1	50.84	0.01	31.91	0.10	—	14.40	3.60	0.05	100.91	69
		2	47.87	0.03	32.66	0.15	0.01	16.01	2.30	0.00	99.03	79
		3	51.56	0.06	30.48	0.03	—	13.46	3.69	0.04	99.32	67
	PDZK27-2-459	1	51.38	0.01	31.37	0.04	0.01	14.24	3.59	0.01	100.63	69
		2	50.72	—	31.81	0.10	0.04	14.31	3.47	0.01	100.45	69
		3	49.49	0.01	32.21	—	—	15.03	2.92	0.02	99.67	74
含长二辉橄榄岩	PDZK34-2	1	50.41	0.05	31.80	—	—	14.22	3.64	0.01	100.13	68

续表 4

Continued Table 4

岩性	样品号	测点号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	Total	An (mol%)
		2	49.90	0.04	32.54	0.05	—	15.37	2.93	0.01	100.84	74
	PDZK34-1	1	49.00	0.04	33.12	0.23	—	15.85	2.57	—	100.81	77
橄榄二辉岩	PDZK27-2-5	1	50.24	—	31.69	0.12	0.01	14.46	3.37	0.03	99.91	70
		2	51.41	0.06	30.85	0.11	0.02	13.09	4.10	0.04	99.69	64
		3	50.98	0.02	31.17	0.07	0.01	13.73	3.59	0.02	99.59	68
		4	50.49	0.04	31.19	0.20	—	14.44	3.19	0.03	99.57	71
	PDZK27-2-6	1	49.25	0.02	32.10	0.04	0.02	15.18	2.87	0.02	99.50	74
		2	52.21	—	30.63	0.17	0.01	13.14	4.01	0.01	100.18	64
		3	51.71	0.07	30.11	0.02	—	13.18	4.23	0.05	99.37	63
		4	48.58	0.02	33.16	0.07	—	16.13	2.41	0.03	100.39	79
	PDZK27-2-7	1	48.84	0.04	31.92	0.18	0.01	15.20	2.93	0.01	99.13	74
		2	50.71	0.04	31.60	0.16	—	14.33	3.38	0.02	100.24	70
	PDZK27-2-9	1	47.75	—	33.34	0.16	0.01	16.35	2.28	0.01	99.90	80
		2	48.03	0.05	33.53	0.16	—	16.16	2.35	—	100.27	79
		3	49.79	—	32.36	0.11	—	15.01	3.11	0.02	100.41	73

表 5 坡东岩体亲铜元素含量

Table 5 Chalcophile element concentration of rocks from the Podong intrusion

岩性	样品号	Ni ($\times10^{-6}$)	Os ($\times10^{-9}$)	Ir ($\times10^{-9}$)	Ru ($\times10^{-9}$)	Rh ($\times10^{-9}$)	Pt ($\times10^{-9}$)	Pd ($\times10^{-9}$)	Cu ($\times10^{-6}$)
橄榄二辉岩	PDZK27-2-5	4640	1.85	1.32	2.94	0.86	3.7	8.99	1900
	PDZK27-2-6	3590	0.86	0.65	1.2	0.56	3.58	6.64	1500
	PDZK27-2-9	2640	0.31	0.36	0.57	0.39	4.52	5.2	1000
橄榄辉长苏长岩	PDZK27-2-8	4670	1.75	1.84	3.88	1.39	2.38	9.65	1500
辉长岩	PDZK27-2-4	4930	1.66	1.7	3.11	1.64	4.24	6.19	1300
	PDZK27-2-11	5320	1.8	1.91	3.32	1.3	2.28	10.4	2100
	PDZK27-2-12	3010	0.93	0.75	1.56	0.56	2.6	4.70	1000
	PDZK27-2-13	3800	1.11	0.89	1.47	0.77	16.8	7.99	1500
	PDZK27-2-14	2560	0.59	0.55	1.03	0.4	7.74	5.87	1100
苏长岩	PDZK11-2-2	13800	2.85	3.81	4.68	4.76	0.57	3.34	900
	PDZK11-2-3	10300	2.03	2.66	3.58	3.49	0.86	2.58	1200
	PDZK11-2-4	3310	0.56	1.18	1.36	1.26	1.4	3.11	600

量分别为 13.15% ~18.67% 和 31.88% ~35.6%, An 值为 68mol% ~97mol%(表 4)。坡东岩体不同岩石类型中斜长石的成分较为集中, SiO_2 含量为 47.60% ~54.20%, CaO 和 Al_2O_3 含量分别为 11.79% ~16.35% 和 29.00% ~33.53%, An 值主要集中在 58mol% ~80mol%(表 4)。而坡一岩体橄榄辉长岩和辉长苏长岩中斜长石具有最高 SiO_2 含量为 52.36% ~55.30%,及最低的 CaO、Al_2O_3 含量和 An 值,分别为 9.94% ~12.06%、29.07% ~31.52% 和 47mol% ~59mol%(表 4)。

5.2 全岩亲铜元素

坡东岩体中橄榄二辉岩、橄榄辉长苏长岩、辉长岩和苏长岩在原始地幔标准化的 PGE 配分模式图上均具有 PGE 相对于 Ni 和 Cu 的亏损(图 6)。其中橄榄二辉岩中 Os 含量为 0.31×10^{-9} ~ 1.85×10^{-9}, Ir 含量为 0.36×10^{-9} ~ 1.32×10^{-9}, Cu 和 Pd 的含量分别为 1000×10^{-6} ~ 1900×10^{-6} 和 5.20×10^{-9} ~ 8.99×10^{-9}(表 5), Cu/Pd 比值介于 192,308 ~ 225,904。Ir 和 Ni, Cu 和 PPGE 显示出良好的正相关关系(图 7)。橄榄辉长苏长岩和苏长岩的 PGE 含量相似, Os 含量为 0.56×10^{-9} ~ 2.85×10^{-9}, Ir 含量为 1.18×10^{-9} ~ 3.81×10^{-9}, Cu 和 Pd 的含量分别为 600×10^{-6} ~ 1500×10^{-6} 和 2.58×10^{-9} ~ 9.65×10^{-9}(表 5), Cu/Pd 比值介于 155,440 ~ 269,461,苏长岩样品在配分模式图上表现出明显的 Pt 负异常(图 6)。Ir 与 Ni, Ru 显示出较好的正相关关系,而与 Cu、Pt 和 Pd 的相关性不明显(图 7)。辉长岩中 Os 含量为 0.59×10^{-9} ~ 1.66×10^{-9}, Ir 含量为 0.55×10^{-9} ~ 1.91×10^{-9},

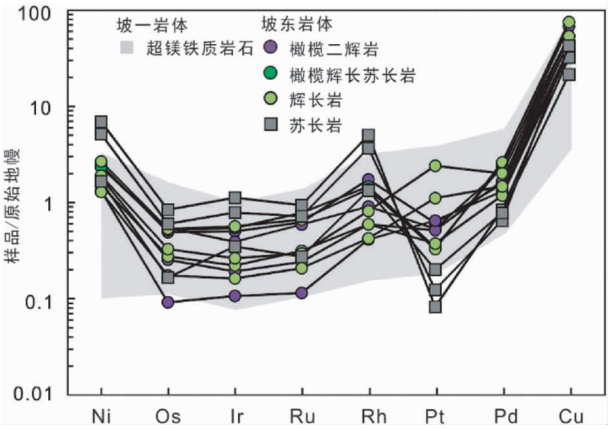


图 6　坡一和坡东岩体中不同岩相铂族元素原始地幔标准化配分模式图

坡一岩体超镁铁质岩石数据来自 Xue *et al.* (2016a)；原始地幔标准化值据 Barnes and Maier (1999)

Fig. 6　Primitive mantle-normalized chalcophile element patterns for the rocks of the Poyi and Podong intrusions

Data of ultramafic rocks of the Poyi intrusion from Xue *et al.* (2016a). Normalized values from Barnes and Maier (1999) and reference therein

Cu 和 Pd 的含量分别为 $1000 \times 10^{-6} \sim 2100 \times 10^{-6}$ 和 $4.70 \times 10^{-9} \sim 10.40 \times 10^{-9}$（表 5），Cu/Pd 比值介于 187,394 ~ 212,766，Ir 与 Ni，Ru 和 Pd 表现出良好的正相关关系，而与 Pt 的相关性不明显（图 7）。

6　讨论

6.1　分离结晶过程

坡一和坡东岩体不同岩相中单斜辉石的 MgO 和 CaO 含量、斜长石的 An 值和 SiO_2 含量连续变化，而且呈负相关关系（图 8），说明坡一和坡东岩体具有相似的原始岩浆成分。前人对坡一和坡东岩体不同岩相全岩的微量元素分析显示其具有相似的稀土元素配分模式图和微量元素蛛网图（Xia *et al.*, 2013; Xue *et al.*, 2016a; 焦建刚等, 2018），进一步说明坡一和坡东岩体可能是同一个原始岩浆演化的产物。Xue *et al.* (2016a) 和 Liu *et al.* (2017b) 分别获得坡一的原始岩浆成分，两人计算得到的岩浆成分大体相似，区别在于后者加入 0.06% 的 Cr_2O_3，从而更客观的反映了坡一岩体中铬铁矿的结晶过程。但从整体来看铬铁矿含量不足 1%，所以我们关注主要矿物成分变化，采用 Xue *et al.* (2016a) 得到的坡一岩体原始岩浆成分并设定压力为 2kbar，氧逸度为 FMQ + 1，然后利用 MELTS 软件（Ghiorso and sack, 1995; Asimow and Ghiorso, 1998）对坡北杂岩体原始岩浆的分离结晶过程进行了模拟（图 9）。模拟结果显示，在岩浆冷凝过程中橄榄石首先结晶，当分离结晶程度分别为 18% 和 29% 左右时单斜辉石和斜长石分别开始结晶，斜方辉石为硅酸盐矿物中最晚结晶（图 9）。另一方面，岩相学观察显示单斜辉石和斜长石包含橄榄石而它们又被斜方辉石所包含（图 3），说明模拟结果与岩相学观察一致。

6.2　硫化物熔离及控制因素

6.2.1　早期硫化物熔离

由于 Ni 在熔体中硫化物不饱和时主要受控于橄榄石分离结晶，而硫化物饱和时则强烈进入硫化物中（Barnes and Maier, 1999），因此橄榄石的 Ni 含量可以用来判断岩浆是否发生过硫化物熔离。如果橄榄石中 Ni 的含量低于橄榄石分离结晶趋势线，那么岩浆中 Ni 的亏损则是由硫化物熔离造成的（Li *et al.*, 2001）。本次研究中坡一岩体纯橄榄岩中橄榄石具有最高 Fo 值（90.9mol%；表 1、图 4），与前人在坡一超镁铁质岩石中得到的最高 Fo 值（91mol%；Xue *et al.*, 2016a）一致，因此我们利用其模拟计算得到的坡一岩体原始岩浆中 FeO 和 MgO 含量（分别为 9.31% 和 14.91%；图 4；Xue *et al.*, 2016a），并结合本次研究中具有最高 Fo 值的橄榄石成分，对坡北杂岩体原始岩浆的橄榄石分离结晶过程进行了模拟。结果表明，坡一、坡十和坡三岩体纯橄榄岩中橄榄石成分连续变化，而且与分离结晶的趋势线基本一致（图 4），而坡一岩体斜长橄榄岩中橄榄石 Fo 和 Ni 含量低于趋势线（图 4），说明当斜长石开始结晶时，岩浆已经发生了硫化物熔离。

对原始岩浆分离结晶过程中熔体 S 含量变化的模拟也说明在分离结晶早期发生了硫化物熔离（图 9）。坡一岩体纯橄榄岩和异剥橄榄岩为岩体中粒间熔体最少的堆晶岩相，微量元素比值可以近似代表原始岩浆的相应比值，其 La/Sm、Sm/Yb 和 La/Yb 比值（Xia *et al.*, 2013; Xue *et al.*, 2016a）与尖晶石二辉橄榄岩地幔 19% 部分熔融形成的熔体成分相似（Shaw, 1970）。假设地幔中 S 平均含量为 200×10^{-6}（Palme and O'Neill, 2014），那么坡北杂岩体地幔源区在 19% 部分熔融条件下形成的熔体中 S 含量应为 1050×10^{-6}（图 9 中 A 点）。另一方面，坡北杂岩体分离结晶过程中，硫化物饱和时熔体的 S 含量（Sulfur Content at Sulfide Saturation, SCSS）可以通过以下公式进行计算：$lnX_S = -1.76 - 0.474\ (10^4/T) - 0.021P + 5.559X_{FeO} + 2.565X_{TiO_2} + 2.709X_{CaO} - 3.192X_{SiO_2} - 3.049X_{H_2O}$（1），其中压力 P 单位为 kbar，T 为开氏温度，X 为各氧化物的摩尔百分比（Li and Ripley, 2009）。利用 MELTS 软件计算得到其原始岩浆的温度为 1433℃，代入公式（1）得到其原始岩浆 SCSS 为 2363×10^{-6}（图 9 中 B 点），明显高于 1050×10^{-6}。因此，原始岩浆在分离结晶早期不会达到硫饱和，而随着分离结晶作用的进行，岩浆温度逐渐降低，橄榄石的分离结晶使岩浆中 FeO 含量降低，都造成岩浆 SCSS 不断降低（Li and Ripley, 2009; Liu *et al.*, 2017b）。而 S 在橄榄石和单斜辉石中为不相容元素，残余岩浆中 S 含量会不断升高（图 9），当坡北杂岩体原始岩浆经过 ~20% 的分离结晶时，两条曲线相交指示岩浆中

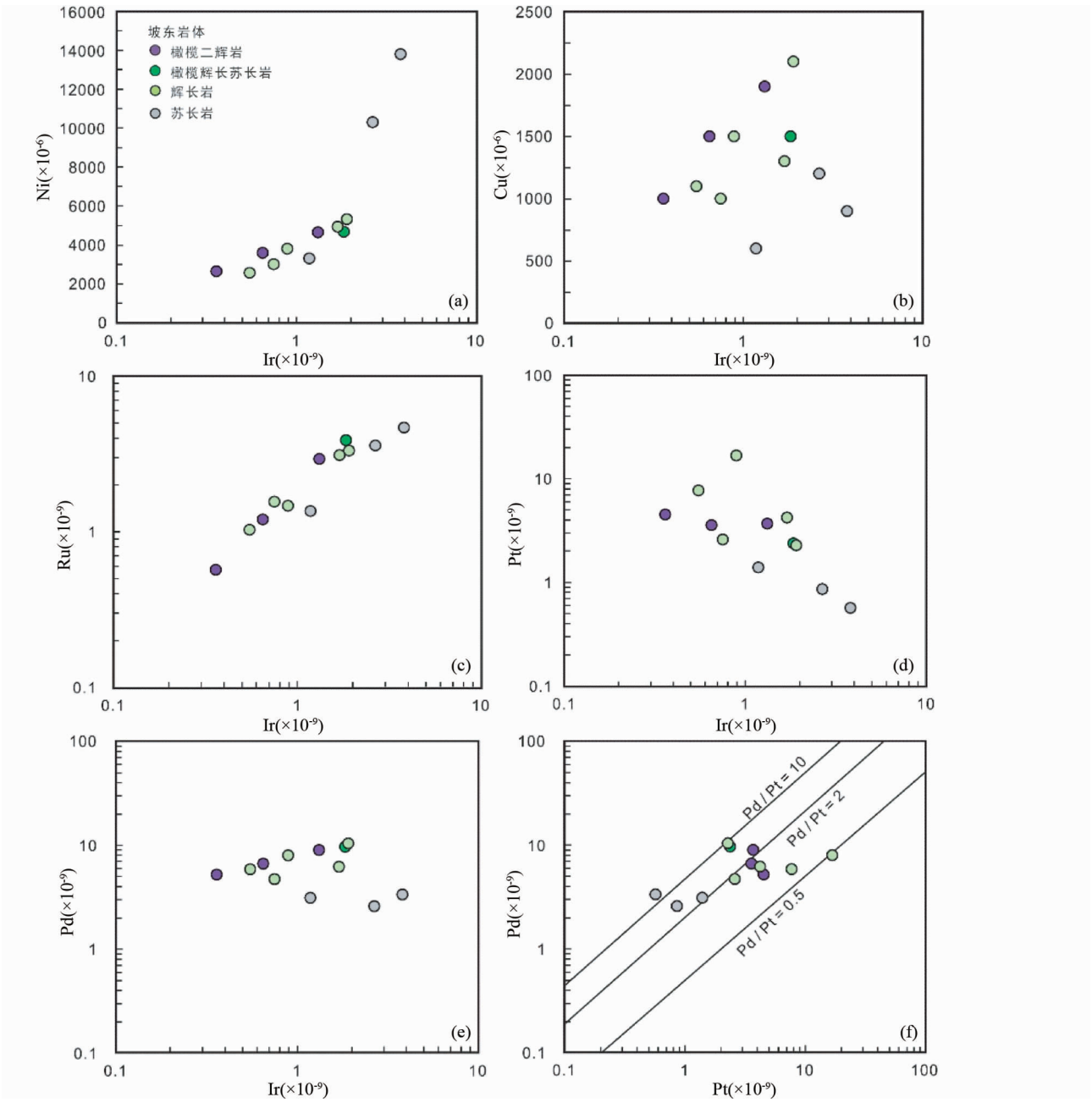


图 7 坡一和坡东岩体中不同岩相 Ir 相对 Ni (a)、Cu (b)、Ru (c)、Pt (d)、Pd (e)及 Pt 相对 Pd (f) 图解

Fig. 7 Plots of Ir vs. Ni (a), Cu (b), Ru (c), Pt (d), Pd (e) and Pt vs. Pd (f) for the rocks from the Poyi and Podong intrusions

S 达到饱和而发生熔离。由于硫化物密度较大,形成后向下运移与堆晶矿物橄榄石共生,形成坡一岩体中与超镁铁质岩石相关的硫化物矿体。

6.2.2 晚期硫化物熔离

坡一岩体中二辉橄榄岩、单辉橄榄岩和橄榄辉长苏长岩中橄榄石的成分在橄榄石分离结晶趋势线之上(图 4),说明早期硫化物熔离之后的残余岩浆中 S 再一次不饱和。但坡东岩体中与苏长岩和辉长苏长岩相关的硫化物矿体的发现说明岩浆在晚期可能又经历了一次硫化物熔离。坡东岩体苏长岩在 PGE 原始地幔标准化配分模式图上具有明显的 Pt 相对 Rh 和 Pd 的负异常,可能是热液蚀变引起的,因为 PGE 中 Pt 最容易受热液蚀变影响(Barnes *et al.*, 1985),所以不能用来讨论硫化物熔离。而橄榄二辉石岩、辉长岩和辉长苏长岩没有明显的 Pt 相对 Rh 和 Pd 的负异常(图 6),说明其 PGE 含量没有受到后期热液蚀变的影响。同时,Ir 与 Ni,Ru,Pt 和 Pd 具有良好的正相关关系(图 7a, c-e),说明 PGE 也未受到单硫化物固溶体(MSS)分离结晶的影响。因此,其 PGE 含量虽与超镁铁质岩石相似,但相对 Ni 和 Cu 明显呈负异常

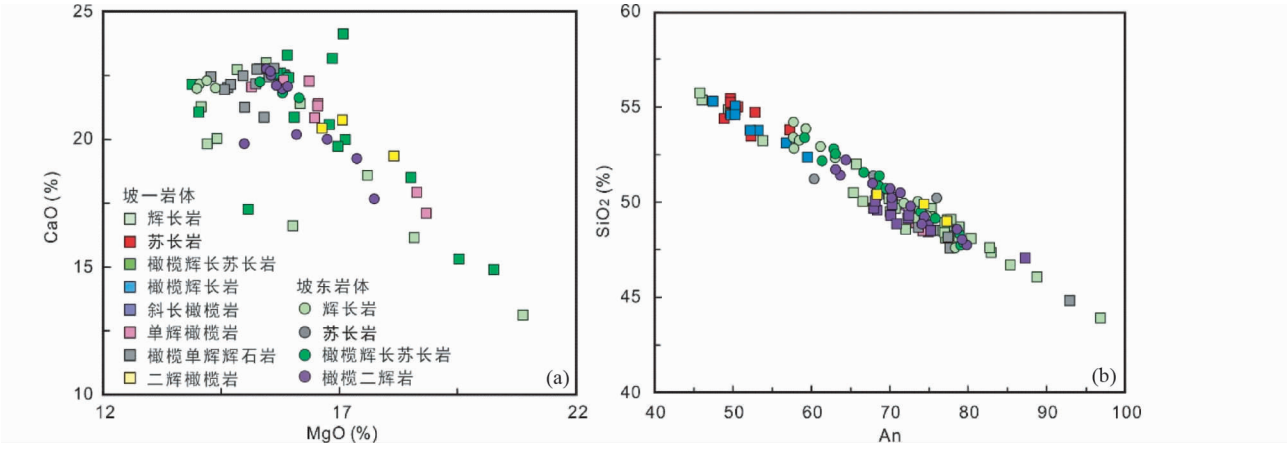


图 8 坡一和坡东岩体中不同岩相中单斜辉石 MgO-CaO 图解(a)和斜长石 An-SiO_2 含量(b)图解

Fig. 8 The plot of MgO vs. CaO of clinopyroxene (a) and An value vs. SiO_2 of plagioclase (b) from the Poyi and Podong intrusions

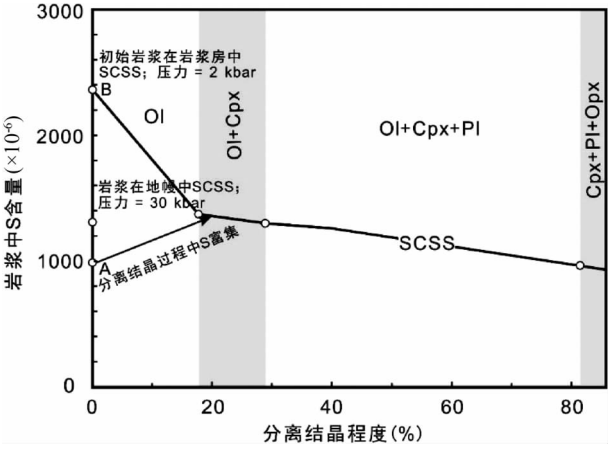


图 9 坡北杂岩体原始岩浆分离结晶过程和 S 含量变化图解

Fig. 9 The modeling of fractional crystallization process and SCSS variation of primary magma of the Pobei complex

(图 6),而且 Cu/Pd 比值(155,440 ~ 225,904)远高于地幔值(7000; Barnes and Maier, 1999)。同时,坡一岩体中橄榄单辉辉石岩和辉长岩中橄榄石的 Fo 和 Ni 含量均在分离结晶趋势线之下(图 4),均暗示晚期硫化物熔离可能发生在橄榄辉长苏长岩形成之前。

岩浆的分离结晶虽然会造成 S 溶解度降低而导致硫化物熔离,但坡北杂岩体晚期硫化物熔离的主导因素是地壳混染,因为:(1)橄榄辉长苏长岩和苏长岩中斜方辉石的大量出现说明此时岩浆中 SiO_2 含量很高,如中亚造山带东段红旗岭铜镍硫化物矿床 7 号岩体富含斜方辉石,被认为是地壳混染造成的(Wei *et al.*, 2013);(2)地壳混染会降低幔源岩浆中 Nb 的含量,造成 Nb 负异常和 $(Nb/La)_{PM}$ 比值降低(Rudnick and Gao, 2003)。坡一、坡东和坡十岩体中橄榄辉长苏长岩和辉长岩全岩微量元素蛛网图上具有明显的 Nb 负异常,而且三个岩体中辉长岩的 $(Nb/La)_{PM}$ 比值为 0.04 ~ 0.42,平均值为 0.22,而超镁铁质岩石的 $(Nb/La)_{PM}$ 比值较高,为 0.07 ~ 0.61,平均值为 0.30(颉炜等, 2011; Xue *et al.*, 2016b; 焦建刚等, 2017);(3)坡一、坡十和坡东岩体中辉长岩全岩 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值(-1.8 ~ +6.7)也明显低于橄榄岩和辉石岩(+4.7 ~ +8.6)(颉炜等, 2011; 姜常义等, 2012; 焦建刚等, 2018)。

坡东岩体橄榄二辉岩和橄榄辉长苏长岩中橄榄石 Fo 值低于坡一岩体中超镁铁质岩石,且变化范围明显较大(75.3mol% ~ 81.0mol%),而 Ni 含量却高于后者,并且橄榄辉长苏长岩中橄榄石的 Fo 和 Ni 含量表现出负相关关系(图 4)。最新的勘探资料表明,坡东岩体中发现的铜镍硫化物矿(化)体主要赋存在辉长苏长岩相中(图 3b),因此我们认为坡东岩体橄榄二辉岩和橄榄辉长苏长岩中橄榄石较高的 Ni 含量、变化较大的 Fo 值及其与 Ni 含量的负相关关系是由于橄榄石和熔离出的硫化物熔体在不平衡状态下发生成分交换造成的(Li and Naldrett, 1999)。当橄榄石颗粒间有硫化物熔体存在时,二者之间会发生 Fe 和 Ni 的交换:$NiO_{橄榄石} + FeS_{硫化物} = NiS_{硫化物} + FeO_{橄榄石}$,造成橄榄石 Fo 较大的变化范围,随着橄榄石 Ni 含量的升高而 Fo 值降低,表现出负相关关系,如加拿大 Voisey' Bay 矿床的浸染状硫化物矿石中橄榄石由于和硫化物发生 Fe-Ni 交换导致 Fo 值和 Ni 含量负相关(Li and Naldrett, 1999)。与坡东岩体橄榄二辉岩和橄榄辉长苏长岩中橄榄石发生反应的可能就是坡北杂岩体演化晚期由于地壳混染而导致熔离出的硫化物。

综合坡一和坡东岩体不同岩相带中橄榄石的成分、模拟计算的 S 含量和分离结晶过程,我们认为坡北杂岩体的原始岩浆到达浅部岩浆房以后,其化学成分早期的变化主要受控于橄榄石和单斜辉石的分离结晶作用,并达到 S 饱和导致硫化物熔离,形成坡一岩体中与超镁铁质岩石密切相关的硫化物矿体。这一阶段岩体地壳混染并不强烈,可能仅在深部混

染了少量的地壳硫促进了硫化物饱和(Liu *et al.*, 2017b)。而在晚期阶段,苏长岩和辉长苏长岩相的母岩浆经历了强烈的地壳混染,一方面造成岩浆富 SiO_2,结晶过程中形成了大量的斜方辉石,另一方面也造成了硫化物熔离,熔离出的硫化物堆积在橄榄辉长苏长岩相底部,并与其中的橄榄石发生 Fe-Ni 交换,形成坡东岩体中橄榄石较高的 Ni 含量、变化较大的 Fo 值及二者负相关关系。

6.3 大地构造环境

塔里木板块东北缘北山裂谷带、中天山地块和觉罗塔格构造带中大量二叠纪镁铁-超镁铁质含矿岩体的构造环境目前仍然存在争论,有的学者认为这些岩体为与俯冲相关的 Alaska 型岩体(Xiao *et al.*, 2004; Han *et al.*, 2010)、或为二叠纪塔里木大火成岩省(TLIP)岩浆活动的产物(Zhou *et al.*, 2004; Mao *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2016)、或为造山带后碰撞岩石圈拆沉-软流圈上涌的产物(Xue *et al.*, 2016a, b),或为地幔柱与造山带叠加的产物(Qin *et al.*, 2011; Su *et al.*, 2012)。

熔体分离结晶过程中,金属离子进入单斜辉石晶格的方式因构造环境的不同而不同,造成其元素含量之间产生明显差别和分异,因此单斜辉石成分可用于识别不同的构造环境(Loucks, 1990)。在拉张环境中(如大陆裂谷、弧后盆地、大洋中脊和热点),拉斑玄武质岩浆由于富 Ti 导致 Al 主要通过 $^{vi}Mg^{iv}Si_2 \longleftrightarrow {}^{vi}Ti^{iv}Al_2$ 替代的方式进入单斜辉石晶格,形成 $CaTiAl_2O_6$ 分子。而在岛弧环境中,岩浆富 H_2O 且氧逸度高,Al 则主要通过 $^{vi}Mg^{iv}Si \longleftrightarrow {}^{vi}Fe^{3+iv}Al$ 替代的方式进入单斜辉石晶格,形成 $CaFe^{3+}Al_2SiO_6$ 分子,所以岛弧环境的堆晶岩中单斜辉石一般具有比拉张环境单斜辉石更高的呈四次配位的 Al 离子百分比和占据单斜辉石八面体位置 Ti 的比值(Al_Z/Ti)(Loucks, 1990)。本次研究选择坡一和坡东岩体中地壳混染程度较低的超镁铁质岩石的单斜辉石进行讨论,计算结果表明坡一和坡东岩体超镁铁质岩石中单斜辉石的 TiO_2 含量和 Al_Z 的百分比接近,其中 Al_Z 的百分比为 0.8 ~ 7.8mol.%,TiO_2 含量为 0.21 ~ 0.83%,不同于弧环境中堆晶单斜辉石成分,而与裂谷环境堆晶岩中单斜辉石成分相似(图 10),与前人对坡三和坡十的认识一致(苏本勋等, 2011; Ma *et al.*, 2016)。因此,我们认为坡北杂岩体可能形成于和塔里木二叠纪(~280Ma)地幔柱活动相关的裂谷环境。

然而,坡北杂岩体中受地壳混染影响较小的超镁铁质岩石全岩 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值最高可达 +8(Yang *et al.*, 2014),接近同时期的亏损地幔值,说明其来源于亏损地幔,并不是地幔柱物质熔融的直接产物。另一方面,坡北杂岩体不同类型岩石的全岩稀土元素均表现为平坦型,没有轻稀土相对重稀土的富集,微量元素蛛网图中高场强元素(Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti)只有 Nb 因地壳混染而显示较弱的负异常(Xia *et al.*, 2013; Xue *et al.*, 2016a; Ma *et al.*, 2016; 姜常义等, 2012)。因此,其地幔源区可能并不是受古生代南天山洋长期北向俯冲(Su *et al.*, 2011)交代的岩石圈地幔。坡北杂岩体中橄榄岩相 La/Sm,Sm/Yb 和 La/Yb 比值(Table A3; Xue *et al.*, 2016a)指示其来源于尖晶石二辉橄榄岩组成的源区(Gurenko and Chaussidon, 1995)。因此,我们认为坡北杂岩体来源于较浅的以尖晶石二辉橄榄岩为主的亏损岩石圈地幔,地幔柱在源区部分熔融过程中提供了大量的热(Qin *et al.*, 2011)。

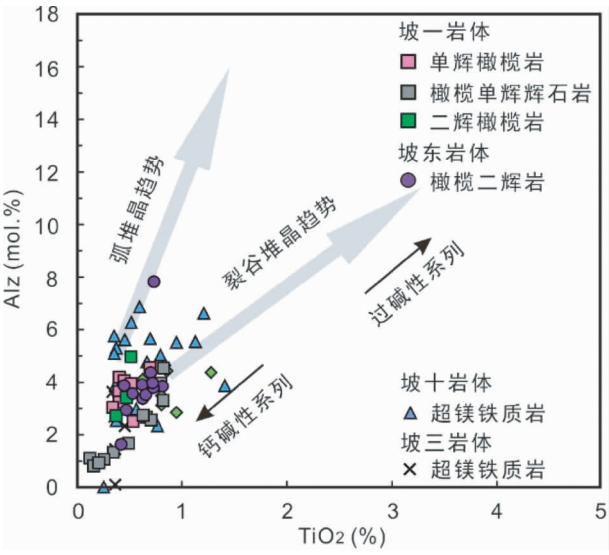


图 10 坡北杂岩体不同岩相中单斜辉石 TiO_2 含量和 Al_Z 图解

坡一和坡东岩体数据来自本次研究;坡十超镁铁质岩石数据来自苏本勋等(2011);坡三超镁铁质岩石数据来自 Ma *et al.* (2016)

Fig. 10 The plot of TiO_2 content versus Al_Z of clinopyroxene from the Pobei complex

Data of Poyi and Podong intrusions from this study; ultramafic rocks of Poshi intrusion from Su *et al.* (2011) and ultramafic rocks of Posan intrusion from Ma *et al.* (2016)

7 结论

塔里木板块东北缘北山构造带中坡北杂岩体形成于裂谷环境,源区为尖晶石二辉橄榄岩为主的亏损岩石圈地幔,地幔柱在源区部分熔融过程中提供了大量的热。坡北杂岩体中含硫化物矿体的坡一和坡东岩体可能是同一原始岩浆分离结晶的产物。原始岩浆在分离结晶过程中主要硅酸盐矿物结晶顺序为:橄榄石→橄榄石 + 单斜辉石→橄榄石 + 单斜辉石 + 斜长石→单斜辉石 + 斜长石 + 斜方辉石。橄榄石和单斜辉石 20% 的分离结晶导致岩浆在演化的早期发生硫化物熔离,形成与坡一岩体超镁铁质岩石相关的矿体。而由于地壳物质的混染,在岩浆演化的晚期阶段再次发生硫化物熔离,形成与坡东岩体镁铁质岩石相关的矿体,并导致坡一岩体和坡东岩体中镁铁质岩石普遍亏损 PGE。

致谢 本次研究野外工作得到了新疆地质矿产开发局地质六队总工邓刚教授级高工，王恒、王鹏高工的帮助；两名匿名审稿人和编辑部老师提出的宝贵修改意见使本文更加完善；在此一并表示感谢。

References

Asimow PD and Ghiorso MS. 1998. Algorithmic modifications extending MELTS to calculate subsolidus phase relations. American Mineralogist, 83(9－10): 1127－1132

Barnes SJ, Naldrett AJ and Gorton MP. 1985. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas. Chemical Geology, 53(3－4): 303－323

Barnes SJ and Maier WD. 1999. The fractionation of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulfide liquids. In: Keays RR, Lesher CM, Lightfoot PC and Farrow CEG (eds.). Dynamic Processes in Magmatic Ore Deposits and their Application to Mineral Exploration. Toronto: Geological Association of Canada, 13: 69－106

Brey GP and Köhler T. 1990. Geothermobarometry in four-phase lherzolites Ⅱ. New Thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers. Journal of Petrology, 31(6): 1353－1378

Gao JF and Zhou MF. 2013. Generation and evolution of siliceous high magnesium basaltic magmas in the formation of the Permian Huangshandong intrusion (Xinjiang, NW China). Lithos, 162－163: 128－139

Ghiorso MS and Sack RO. 1995. Chemical mass transfer in magmatic processes Ⅳ. A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpolation and extrapolation of liquid-solid equilibria in magmatic systems at elevated temperatures and pressures. Contributions to Mineralogy and Petrology, 119(2－3): 197－212

Gurenko AA and Chaussidon M. 1995. Enriched and depleted primitive melts included in olivine from Icelandic tholeiites: Origin by continuous melting of a single mantle column. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59(14): 2905－2917

Han CM, Xiao WJ, Zhao GC, Ao SJ, Zhang JE, Qu WJ and Du AD. 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. Lithos, 120(3－4): 547－562

Jiang CY, Cheng SL, Ye SF, Xia MZ, Jiang HB and Dai YC. 2006. Lithogeochemistry and petrogenesis of Zhongposhanbei mafic rock body, at Beishan region, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 22(1): 115－126 (in Chinese with English abstract)

Jiang CY, Guo NX, Xia MZ, Ling JL, Guo FF, Deng XQ, Jiang HB and Fan YZ. 2012. Petrogenesis of the Poyi mafic-ultramafic layered intrusion, NE Tarim Plate. Acta Petrologica Sinica, 28(7): 2209－2223 (in Chinese with English abstract)

Jiao JG, Rui HC, Xia MZ, Qian ZZ, Jin SF, Xu G, Chen BL and Duan SS. 2017. Practice of medium-large scale geological map-ping for special issues in basic-ultrabasic intrusions: A case study of the Pobei intrusion in northeast Tarim Plate. Geological Bulletin of China, 36(11): 1999－2011 (in Chinese with English abstract)

Jiao JG, Leng X, Duan SS, Xia MZ, Rui HC and Tan L. 2018. Petrogenesis and metallogenic characteristics of the Early Permian Podong Cu-Ni sulfide deposit, northeastern margin of the Tarim plate. Acta Petrologica Sinica, 34(8): 2211－2222 (in Chinese with English abstract)

Li C and Naldrett AJ. 1999. Geology and petrology of the Voisey's Bay intrusion: Reaction of olivine with sulfide and silicate liquids. Lithos, 47(1－2): 1－31

Li CS, Maier WD and de Waal SA. 2001. Magmatic Ni-Cu versus PGE deposits: Contrasting genetic controls and exploration implications. South African Journal of Geology, 104(4): 309－318

Li CS, Xu ZH, de Waal SA, Ripley EM and Maier WD. 2004. Compositional variations of olivine from the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, western China: Implications for ore genesis. Mineralium Deposita, 39(2): 159－172

Li CS and Ripley EM. 2009. Sulfur contents at sulfide-liquid or anhydrite saturation in silicate melts: Empirical equations and example applications. Economic Geology, 104(3): 405－412

Li HQ, Chen FW, Mei YP, Wu H, Cheng SL, Yang JQ and Dai YC. 2006. Isotopic ages of No. 1 intrusive body in Pobei mafic-ultramafic belt of Xinjiang and their geological significance. Mineral Deposits, 25(4): 463－469 (in Chinese with English abstract)

Liu YG, Lü XB, Wu CM, Hu XG, Duan ZP, Deng G, Wang H, Zhu XK, Zeng HD, Wang P, Wang W and Lu Q. 2016. The migration of Tarim plume magma toward the northeast in Early Permian and its significance for the exploration of PGE-Cu-Ni magmatic sulfide deposits in Xinjiang, NW China: As suggested by Sr-Nd-Hf isotopes, sedimentology and geophysical data. Ore Geology Reviews, 72(Pt 1): 538－545

Liu YG, Li WY, Lü XB, Huo YH and Zhang B. 2017a. The Pobei Cu-Ni and Fe ore deposits in NW China are comagmatic evolution products: Evidence from ore microscopy, zircon U-Pb chronology and geochemistry. Geologica Acta: An International Earth Science Journal, 15(1): 37－50

Liu YG, Li WY, Lü XB, Liu YR, Ruan BX and Liu X. 2017b. Sulfide saturation mechanism of the Poyi magmatic Cu-Ni sulfide deposit in Beishan, Xinjiang, Northwest China. Ore Geology Reviews, 91: 419－431

Loucks RR. 1990. Discrimination of ophiolitic from nonophiolitic ultramafic-mafic allochthons in orogenic belts by the Al/Ti ratio in clinopyroxene. Geology, 18(4): 346－349

Ma J, Lü XB, Liu YR, Cao XF, Liu YG, Ruan BX and Adam MMA. 2016. The impact of early sulfur saturation and calc-crustal contamination on ore-forming process in the Posan mafic-ultramafic complex: Derived from the shallow depleted mantle, Beishan region, NW China. Journal of Asian Earth Sciences, 118: 81－94

Mao JW, Pirajno F, Zhang ZH, Chai FM, Wu H, Chen SP, Cheng LS, Yang JM and Zhang CQ. 2008. 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. Journal of Asian Earth Sciences, 32(2－4): 184－203

Morimoto N. 1988. Nomenclature of pyroxenes. Mineralogy and Petrology, 39(1): 55－76

Naldrett AJ and von Gruenewaldt G. 1989. Association of platinum-group elements with chromitite in layered intrusions and ophiolite complexes. Economic Geology, 84(1): 180－187

Nimis P and Ulmer P. 1998. Clinopyroxene geobarometry of magmatic rocks Part 1: An expanded structural geobarometer for anhydrous and hydrous, basic and ultrabasic systems. Contributions to Mineralogy and Petrology, 133(1－2): 122－135

Niu YL, Gilmore T, Mackie S, Greig A and Bach W. 2002. Mineral chemistry, whole-rock compositions, and petrogenesis of Leg 176 gabbros: Data and discussion. In: Natland JH, Dick HJB, Miller DJ and Von Herzen RP (eds.). Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 176: 1－60

Palme H and O'Neill HSC. 2014. Cosmochemical estimates of mantle composition. In: Carlson RW (ed.). The Mantle and Core. 2nd Edition. Oxford: Elsevier-Pergamon, 3: 1－39

Peach CL, Mathez EA and Keays RR. 1990. Sulfide melt-silicate melt distribution coefficients for noble metals and other chalcophile elements as deduced from MORB: Implications for partial melting. Geochimica et Cosmochimica Acta, 54(12): 3379－3389

Qi L and Huang XW. 2013. A review on platinum-group elements and Re-Os isotopic analyses of geological samples. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 32(2): 171－189 (in Chinese with English abstract)

Qin KZ, Su BX, Sakyi PA, Tang DM, Li XH, Sun H, Xiao QH and Liu PP. 2011. SIMS Zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of

Ni-Cu-bearing mafic-ultramafic intrusions in Eastern Tianshan and Beishan in correlation with flood basalts in Tarim Basin (NW China): Constraints on a ca. 280Ma mantle plume. American Journal of Science, 311(3): 237 – 260

Rudnick RL and Gao S. 2003. Composition of the continental crust. In: Holland HD and Turekian KK (eds.). Treatise on Geochemistry. Oxford: Elsevier-Pergamon, 3: 1 – 64

Shaw DM. 1970. Trace element fractionation during anatexis. Geochimica et Cosmochimica Acta, 34(2): 237 – 243

Su BX, Qin, KZ, Sakyi PA, Li XH, Yang YH, Sun H, Tang DM, Liu PP, Xiao QH and Malaviarachchi SPK. 2011. U-Pb ages and Hf-O isotopes of zircons from Late Paleozoic mafic-ultramafic units in the southern Central Asian Orogenic Belt: Tectonic implications and evidence for an Early-Permian mantle plume. Gondwana Research, 20(2 – 3): 516 – 531

Su BX, Qin KZ, Tang DM, Deng G, Xiao QH, Sun H, Lu HF and Dai YC. 2011. Petrological features and implications for mineralization of the Poshi mafic-ultramafic intrusion in Beishan area, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 27(12): 3627 – 3639 (in Chinese with English abstract)

Su BX, Qin, KZ, Sun H, Tang DM, Sakyi PA, Chu ZY, Liu PP and Xiao QH. 2012. Subduction-induced mantle heterogeneity beneath Eastern Tianshan and Beishan: Insights from Nd-Sr-Hf-O isotopic mapping of Late Paleozoic mafic-ultramafic complexes. Lithos, 134 – 135: 41 – 51

Takahashi E. 1978. Partitioning of Ni^{2+}, Co^{2+}, Fe^{2+}, Mn^{2+} and Mg^{2+} between olivine and silicate melts: Compositional dependence of partition coefficient. Geochimica et Cosmochimica Acta, 42(12): 1829 – 1844

Veksler IV. 2009. Extreme iron enrichment and liquid immiscibility in mafic intrusions: Experimental evidence revisited. Lithos, 111(1 – 2): 72 – 82

Wang YL, Zhang ZW, Zhang MJ, Zhang JW and Gao YB. 2013. Geodynamic setting of the Pobei mafic-ultramafic intrusion in Xinjiang. Acta Petrologica et Mineralogica, 32(5): 693 – 707 (in Chinese with English abstract)

Wei B, Wang CY, Li C and Sun YL. 2013. Origin of PGE-depleted Ni-Cu sulfide mineralization in the Triassic Hongqiling No. 7 orthopyroxenite intrusion, Central Asian Orogenic Belt, northeastern China. Economic Geology, 108(8): 1813 – 1831

Xia MZ, Jiang CY, Li C and Xia ZD. 2013. Characteristics of a newly discovered Ni-Cu sulfide deposit hosted in the Poyi ultramafic intrusion, Tarim Craton, NW China. Economic Geology, 108(8): 1865 – 1878

Xiao WJ, Zhang LC, Qin KZ, Sun S and Li JL. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of central Asia. American Journal of Science, 304(4): 370 – 395

Xiao YF, Wang DY, Deng JH, Sun Y and Wu DC. 2004. Volcanism during activity period of Beishan craton rift in Xinjiang, China. Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition), 31(4): 331 – 337 (in Chinese with English abstract)

Xie W, Song XY, Nie XY and Cheng SL. 2011. Features of the mantle source and tectonic setting of the Poshi Ni-Cu sulfide-bearing intrusion, Xinjiang, China. Earth Science Frontiers, 18(3): 189 – 200 (in Chinese with English abstract)

Xue SC, Qin KZ, Tang DM, Mao YJ and Yao ZS. 2015. Compositional characteristics of pyroxenes from Permian mafic-ultramafic complexes in Eastern Xinjiang, and their implications for petrogenesis and Ni-Cu mineralization. Acta Petrologica Sinica, 31(8): 2175 – 2192 (in Chinese with English abstract)

Xue SC, Qin KZ, Li CS, Tang DM, Mao YJ, Qi L and Ripley EM. 2016a. Geochronological, petrological, and geochemical constraints on Ni-Cu sulfide mineralization in the Poyi ultramafic-troctolitic intrusion in the northeast rim of the Tarim Craton, western China. Economic Geology, 111(6): 1465 – 1484

Xue SC, Li CS, Qin KZ and Tang DM. 2016b. A non-plume model for the Permian protracted (266 ~ 286Ma) basaltic magmatism in the Beishan-Tianshan region, Xinjiang, western China. Lithos, 256 – 257: 243 – 249

Yang SH, Zhou MF, Lightfoot PC, Xu JF, Wang CY, Jiang CY and Qu WJ. 2014. Re-Os isotope and platinum-group element geochemistry of the Pobei Ni-Cu sulfide-bearing mafic-ultramafic complex in the northeastern part of the Tarim Craton. Mineralium Deposita, 49(3): 381 – 397

Zhou MF, Lesher CM, Yang ZX, Li JW and Sun M. 2004. Geochemistry and petrogenesis of 270Ma Ni-Cu-(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district, Eastern Xinjiang, Northwest China: Implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt. Chemical Geology, 209(3 – 4): 233 – 257

附中文参考文献

姜常义, 程松林, 叶书锋, 夏明哲, 姜寒冰, 代玉财. 2006. 新疆北山地区中坡山北镁铁质岩体岩石地球化学与岩石成因. 岩石学报, 22(1): 115 – 126

姜常义, 郭娜欣, 夏明哲, 凌锦兰, 郭芳放, 邓小芹, 姜寒冰, 范亚洲. 2012. 塔里木板块东北部坡一镁铁质-超镁铁质层状侵入体岩石成因. 岩石学报, 28(7): 2209 – 2223

焦建刚, 芮会超, 夏明哲, 钱壮志, 靳树芳, 徐刚, 陈炳龙, 段少帅. 2017. 基性-超基性侵入岩中-大比例尺专题地质填图实践——以塔里木板块东北部坡北岩体为例. 地质通报, 36(11): 1999 – 2011

焦建刚, 冷馨, 段少帅, 夏明哲, 芮会超, 谭磊. 2018. 塔里木东北缘坡东基性-超基性岩体岩石成因. 岩石学报, 34(8): 2211 – 2222

李华芹, 陈富文, 梅玉萍, 吴华, 程松林, 杨甲全, 代玉财. 2006. 新疆坡北基性-超基性岩带Ⅰ号岩体 Sm-Nd 和 SHRIMP U-Pb 同位素年龄及其地质意义. 矿床地质, 25(4): 463 – 469

漆亮, 黄小文. 2013. 地质样品铂族元素及 Re-Os 同位素分析进展. 矿物岩石地球化学通报, 32(2): 171 – 189

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. 岩石学报, 27(12): 3627 – 3639

王亚磊, 张照伟, 张铭杰, 张江伟, 高永宝. 2013. 新疆坡北镁铁-超镁铁质岩体地球动力学背景探讨. 岩石矿物学杂志, 32(5): 693 – 707

肖渊甫, 王道永, 邓江红, 孙燕, 吴德超. 2004. 新疆北山晚古生代克拉通裂谷火山作用特征. 成都理工大学学报(自然科学版), 31(4): 331 – 337

颉炜, 宋谢炎, 聂晓勇, 程松林. 2011. 新疆坡十铜镍硫化物含矿岩体岩浆源区特征及构造背景探讨. 地学前缘, 18(3): 189 – 200

薛胜超, 秦克章, 唐冬梅, 毛亚晶, 姚卓森. 2015. 东疆二叠纪镁铁-超镁铁岩体中辉石的成分特征及其对成岩和 Ni-Cu 成矿的指示. 岩石学报, 31(8): 2175 – 2192