

塔里木大火成岩省瓦吉里塔格霞石岩铂族元素 地球化学特征

刘秉翔¹, 张招崇¹, 张东阳², 程志国¹

(1. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 作为塔里木大火成岩省形成最晚的火成岩, 新疆巴楚瓦吉里塔格霞石岩的岩浆源区性质的确定对于揭示塔里木大火成岩省的深部地质过程具有重要的约束作用。对瓦吉里塔格霞石岩的铂族元素地球化学特征进行了研究, 铂族元素(PGE)分析结果显示, 原始地幔标准化的PGE呈正斜率型分布, 且Pd/Ir值高于原始地幔比值, 说明霞石岩的铂族元素发生了分异。霞石岩全岩的PGE与MgO呈正相关, Pd/Ir、Cu/Pd与MgO则呈负相关, 说明PGE的分异主要受到橄榄石的结晶分异作用控制, 也是其Cu/Pd值极高及岩浆S饱和的因素之一, 同时Cu/Pd值说明霞石岩岩浆为硫饱和岩浆, 但是没有因素导致岩浆S过饱和进而发生硫化物的熔离。与其他大火成岩省岩石相比, 瓦吉里塔格霞石岩极度亏损PGE, SCSS(硫承载力)计算结果表明母岩浆在形成之初就发生S过饱和, 主要是地幔低程度部分熔融造成的, 据此认为地幔源区的部分熔融程度在塔里木大火成岩省Cu-Ni硫化物铂族元素矿床形成过程中起着至关重要的作用。

关键词: 铂族元素; 霞石岩; 瓦吉里塔格; 塔里木大火成岩省; 新疆

中图分类号: P588.15; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)05-0799-12

Geochemical characteristics of platinum group elements in Wajilitag nephelinite from Tarim Large Igneous Province, Northwest China

LIU Bing-xiang¹, ZHANG Zhao-chong¹, ZHANG Dong-yang² and CHENG Zhi-guo¹

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper reports the geochemical characteristics of platinum-group elements (PGEs) in nephelinite lavas from Wajilitag complexes of Bachu County in Xinjiang. The magma source and the magma evolution of nephelinite are discussed. The values of such platinum-group elements as Os, Ir, Ru, Rh, Pt and Pd in nephelinite were determined by ICP-MS. They display a positive slope in the mantle-normalized pattern. The fact that Pd/Ir values are higher than those of the primitive mantle suggests the fractionation of PGE in nephelinite. And positive correlations for PGE versus MgO, negative correlations for Pd/Ir and Cu/Pd versus MgO suggest that the PGE differentiation was probably controlled by crystallization differentiation of olivine. It is also one of the factors that cause the high Cu/Pd ratio and magma S saturation. The Cu/Pd ratio indicates that the magma is sulfur saturated magma, but there is no factor that leads to the S-oversaturation of magma and sulfide liquation. Sulfur capacity calculation

收稿日期: 2017-12-01; 接受日期: 2018-07-12

基金项目: 国家重点研发项目(2016YFC0600502); 国家自然科学基金项目(41472060, 41390442)

作者简介: 刘秉翔(1993-), 男, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: lbx745755808@163.com; 通讯作者: 张招崇(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事火成岩岩石学以及相关金属矿产的教学和研究, E-mail: zczhang@cugb.edu.cn。

shows that, compared with other rocks of large igneous province, Wajilitag nephelinite is extremely depleted in PGE due to the S-oversaturation of parent magma, with the main reason being the low degree partial melting of the mantle. It is considered that the partial melting degree of mantle source played an important role in the formation of Cu-Ni sulfide PGE deposits in the Tarim Large Igneous Province.

Key words: PGE; nephelinite; Wajilitag; Tarim Large Igneous Province; Xinjiang

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41472060, 41390442); National Key Research and Development Program (2016YFC0600502)

大火成岩省以短时间内发生大规模幔源岩浆活动为主要特征,并形成具有重大经济意义的 Cu-Ni-PGE(铂族元素)矿床和 V-Ti 磁铁矿床,例如澳大利亚 Kambalda 超大型 Cu-Ni-PGE 矿床、南非 Bushveld 超大型 Cu-Ni-PGE 和 V-Ti 磁铁矿床、俄罗斯 Noril'sk-Talnakh 超大型 Cu-Ni-PGE 矿床以及攀西地区的一些超大型钒钛磁铁矿床等,这些矿床均与地幔柱密切相关(Pirajno, 2004)。

塔里木大火成岩省是亚洲新近识别出的二叠纪大火成岩省,与其他典型大火成岩省(如峨眉山大火成岩省和西伯利亚大火成岩省)不同的是,除了发现了一些小型的 V-Ti 磁铁矿床之外,迄今为止还没有关于 Cu-Ni 硫化物铂族元素矿床的报道。西伯利亚大火成岩省和峨眉山大火成岩省均有铜镍硫化物铂族元素矿床的发现,如俄罗斯 Noril'sk-Talnakh 超大型 Cu-Ni-PGE 矿床,中国西南杨柳坪和金宝山 PGE 矿床和四川力马河铜镍硫化物矿床(Song *et al.*, 2003; Pirajno, 2004; 陶琰等, 2004)。由此引出这样一个问题,是塔里木大火成岩省没有 Cu-Ni 硫化物铂族元素矿床还是没有被发现?这是一直困扰广大地质学家的问题。

PGE 主要集中分布在原始岩浆的硫化物中(Naldrett, 1979; Barnes *et al.*, 1985; Barnes and Maier, 1999),地幔中的硫化物只占 0.05%,而且并不是所有的硫化物都能随着部分熔融进入熔体(Lorand and Alard, 2001),因此形成较大型的 Cu-Ni 硫化物铂族元素矿床必须满足以下几个条件:①地幔富含 PGE,在部分熔融的过程中,赋存于地幔的 PGE 大量进入熔体,并且存在大规模的岩浆活动(岩浆喷发或者侵入);②原始岩浆从产生到上升到岩浆房的过程中 S 是不饱和的,因为如果岩浆是 S 饱和的,就会在上升的过程中过早地发生硫化物的熔离,而 PGE 具有极强的亲硫性,会在熔离过程中发生分散;③在岩浆房中 S 不饱和岩浆将转变为 S 饱和岩浆,促进 PGE 富集(Keays, 1995, 1997; Maier,

2005)。

铂族元素(PGE)具有高度的亲硫性和抗低温热蚀变的能力(Crocket and Macrae, 1986; Snow and Schmidt, 1998; Snow *et al.*, 2000),在不同的地幔源区具有不同的特征,并且会随着岩浆的演化发生分异,因此可以作为研究岩浆起源和演化过程的重要示踪元素(Barnes *et al.*, 1985)。由于 PGE 在硫化物中具有非常高的分配系数,使其对岩浆演化过程中的硫饱和程度非常敏感。近些年来, PGE 对探讨镁铁质-超镁铁质岩石的成因与演化、岩浆的部分熔融及壳幔相互作用等过程发挥了重要作用(Bea *et al.*, 1997; Maier 2005; Iii and Neal, 2005; 张招崇等, 2006; Ibrah *et al.*, 2007; 励音骥等, 2010; 连东洋等, 2015; 杨仪锦等, 2016; Barnes *et al.*, 2016; Vaillant *et al.*, 2016)。

本文试图通过对塔里木大火成岩省瓦吉里塔格地区的霞石岩 PGE 的地球化学特征研究,对霞石岩的原始岩浆特征、岩浆演化及岩浆硫化物矿床成矿潜力等进行进一步的了解,以期对塔里木大火成岩省的形成与地球动力学特征以及铜镍硫化物矿床的成矿潜力提供新的资料。

1 区域地质背景及岩相学特征

塔里木盆地位于中国西北部新疆境内,为一大型叠合复合盆地,呈菱形展布,北西为天山,东南为阿尔金山,南部为西昆仑山(图 1)。塔里木盆地具有一个复杂的前寒武纪基底和厚的显生宙盖层(Tian *et al.*, 2010; Zhang and Zou, 2013; Xu *et al.*, 2014),盆地内部体现为“三隆五拗”的构造格架(孙林华等, 2007),即库车拗陷、塔北隆起、北部拗陷、中央隆起、西南拗陷、塘古孜巴斯拗陷、塔南隆起和东南拗陷(图 1)。区域上共经历了 4 次主要的岩浆热事件:新元古代到寒武纪(774 ~ 673 Ma)、奥陶纪(484 ~ 460 Ma)、二叠纪(282 ~ 264 Ma)和中新生代

(~100 Ma)(姜常义等, 2004; Zhou *et al.*, 2009; Tian *et al.*, 2010; Yu *et al.*, 2011; Ge *et al.*, 2012; Zhang and Zou, 2013), 其中岩浆活动最为明显的是二叠纪, 影响最为广泛, 形成包括花岗岩和镁铁-超镁铁质侵入岩以及基性岩墙群, 这些都是塔里木大火成岩省的组成部分(Yang *et al.*, 2007; Tian *et al.*, 2010)。Xu 等(2014)根据同位素测年结果将二

叠纪塔里木大火成岩省的岩浆活动产物分为3期: ① 金伯利岩, 代表塔里木大火成岩省最早期的岩浆活动(~300 Ma); ② 溢流玄武岩和少量流纹岩, 表现出双峰式特征(~290 Ma); ③ 花岗岩和镁铁-超镁铁质侵入岩以及基性岩墙群(~280 Ma)。二叠纪玄武岩带分布于塔里木盆地中央, 向西开阔, 向东收缩, 大致呈喇叭状, 面积超过 $3 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。

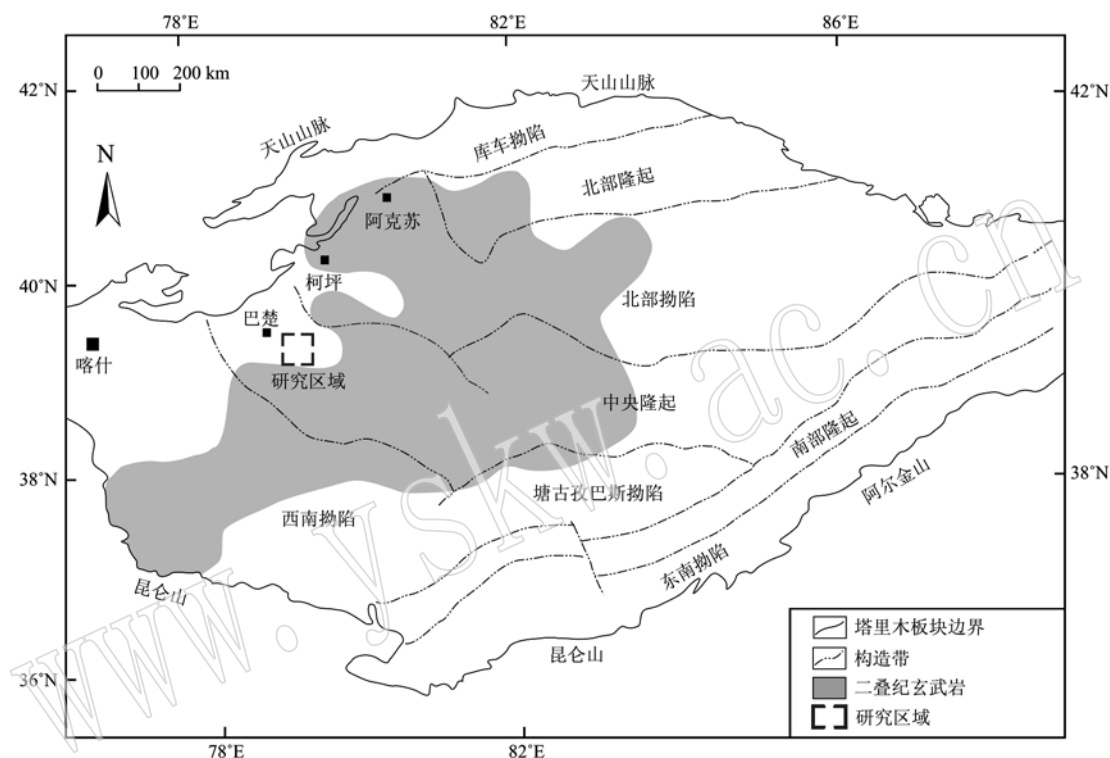


图1 塔里木大火成岩省地质简图(据 Zou 等, 2015)

Fig. 1 Sketch geological map of the Tarim Basin showing the distribution of the Permian continental flood basalts (after Zou *et al.*, 2015).

瓦吉里塔格位于塔里木板块西北缘巴楚隆起之上, 属于塔里木大火成岩省的一部分(图1), 位于巴楚县城东南45 km处。区内出露的地层为古生代泥盆系, 岩性主要为砂岩(克孜勒塔格组和依木岗他乌组), 还零星出露第三系, 第四系沉积物分布在山麓和低洼处, 形成了沙漠沙丘景观。岩体主要由镁铁-超镁铁质以及碱性岩体组成, 晚期还侵入了大量的辉绿岩脉、煌斑岩脉、碳酸岩脉等。根据前人的研究以及详细的野外地质观察, 瓦吉里塔格杂岩体中岩石的侵位顺序依次是金伯利质岩石(Cheng *et al.*, 2014), 基性-超基性侵入体, 碳酸岩和霓霞正长岩, 辉绿岩脉、煌斑岩脉和碱性岩脉以及霞石岩(Zhang and Zou, 2013; Cheng *et al.*, 2015)(图2)。

霞石岩主要分布在研究区的东南部, 呈熔岩状覆盖在泥盆纪地层(克孜勒塔格组和依木岗他乌组)和基性-超基性侵入体之上(图2), 代表瓦吉里塔格地区最晚期的岩浆活动, 出露面积为 1 km^2 , 厚度约为3~4 m。霞石岩手标本呈黑色, 块状构造, 斑状结构(图3a), 斑晶主要由单斜辉石(35%~50%)、霞石(25%~35%)和橄榄石(10%~15%)组成, 还有少量的磷灰石和钠长石。单斜辉石斑晶呈板状和柱状出现, 自形程度较好, 粒径从 $0.4 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \sim 1 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 不等, 部分单斜辉石具有环带结构或者角闪石和磁铁矿的反应边; 霞石斑晶自形程度较好, 呈规则四边形板状产出, 粒径在 $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ 之间; 橄榄石斑晶呈自形粒状产出。基质主要由辉石、

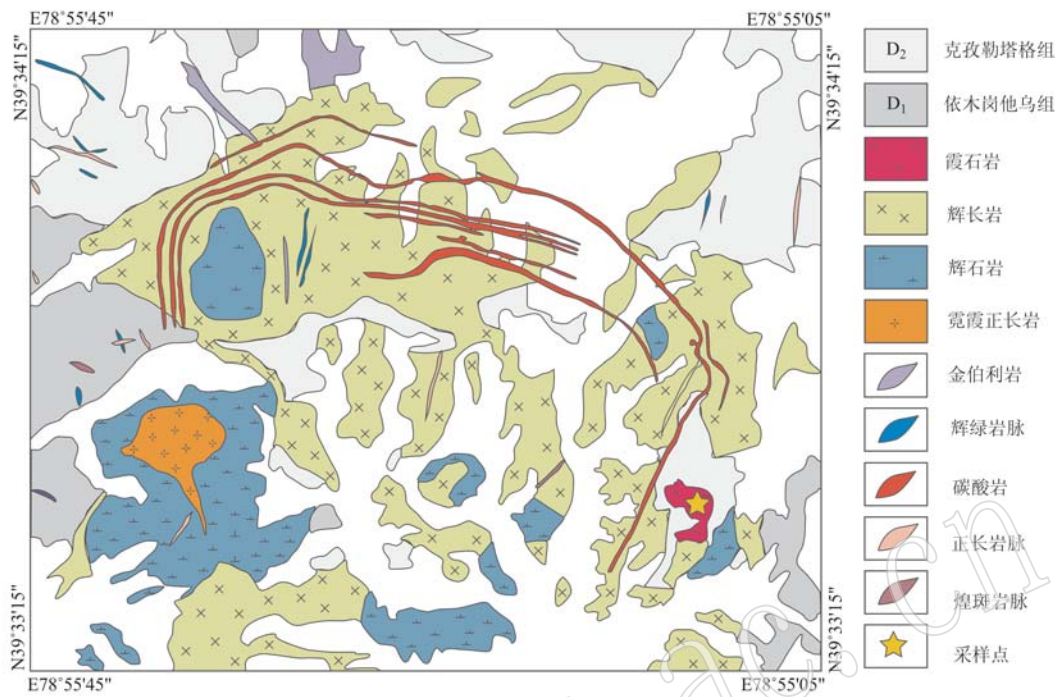


图 2 瓦吉里塔格地区地质图以及采样位置 [据 Cheng 等(2017)修改]
Fig. 2 Simplified geological map of the Wajilitage area showing the location of the nephelineite lavas (after Cheng *et al.*, 2017).

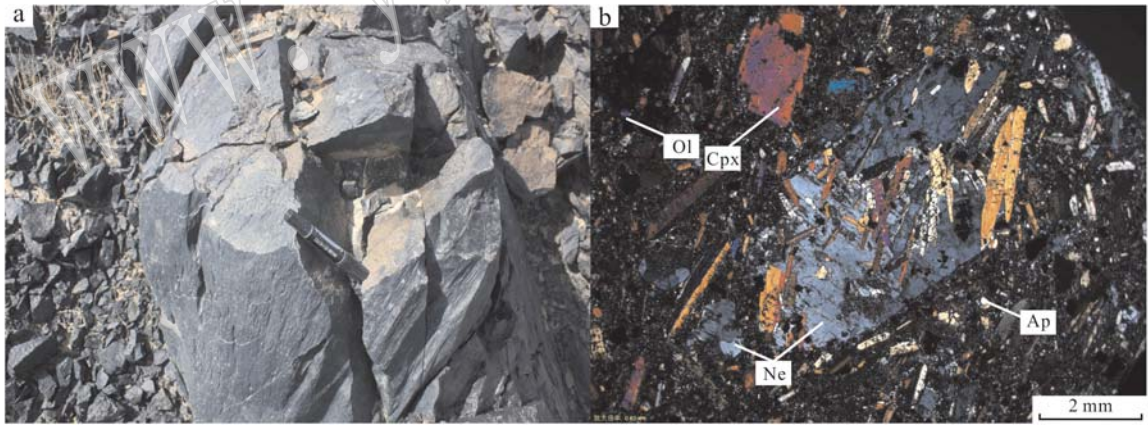


图 3 霞石岩手标本照片和镜下照片
Fig. 3 Field specimen and photomicrographs of the nephelineite
Ap—磷灰石; Cpx—单斜辉石; Ol—橄榄石; Ne—霞石
Ap—apatite; Cpx—clinopyroxene; Ol—olivine; Ne—nepheline

金属氧化物、霞石、角闪石、黑云母和长石等组成,其中辉石呈微晶,粒径在 0.2 mm 左右,还有少量的霞石颗粒分布在基质中,钛铁氧化物呈它形在基质中零星分布(0.02 ~0.5 mm),黑云母和角闪石的粒径非常小(~0.02 mm),金红石呈碎斑状分布在基质中,粒径约为 0.1 mm,还有少量的碱性长石呈它形

镶嵌在矿物的缝隙中(图 3b)。

2 分析方法

PGE 分析在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室进行。此次分析采用了改进

的PGE前处理方法,溶样采用自行设计的120 mL不锈钢Teflon封闭溶样装置。步骤如下:先在玛瑙研钵中将样品磨至80目,称取8 g左右的样品粉末放在120 mL Teflon溶样装置中,之后加入少量水将样品润湿使其混合均匀,再加入20 mL HF后放在加热板上蒸干。然后分别加入4 mL HF和15 mL HNO₃以及适量的¹⁹³Ir、¹⁰¹Ru、¹⁰⁵Pd和¹⁹⁴Pt同位素稀释剂,密封之后放入恒温箱中于185℃放置24 h。取出之后将样品蒸干并且转化为HCl介质,利用Te共沉淀法富集PGE,之后再用电离交换法去除Cu、Ni、Zr、Hf等杂质。Pt、Pd、Ir和Ru采用同位素稀释法测定,Rh元素用¹⁹⁴Pt为内标测定,测试仪器为Elan DRC-e ICP-MS,详细的分析方法见Qi等(2011)。测试过程中Ru空白值为0.008 ng,Ir和Rh空白值均为0.009 ng,Pt为0.021 ng,Pd为0.033 ng。该测试方法采用的国际标样为WGB-1和UMT-1,其分析结果与推荐值吻合。

3 测试结果

瓦吉里塔格霞石岩的PGE分析结果列于表1。由表1可以看出,瓦吉里塔格霞石岩中Os、Ir、Ru、Rh、Pt和Pd含量分别是 $0.077 \times 10^{-9} \sim 0.129 \times 10^{-9}$ 、 $0.043 \times 10^{-9} \sim 0.067 \times 10^{-9}$ 、 $0.076 \times 10^{-9} \sim 0.166 \times 10^{-9}$ 、 $0.020 \times 10^{-9} \sim 0.036 \times 10^{-9}$ 、 $0.279 \times 10^{-9} \sim 0.484 \times 10^{-9}$ 和 $0.139 \times 10^{-9} \sim 0.454 \times 10^{-9}$ 。所有样品的PGE含量均明显低于原始地幔值,约为原始地幔的1%~10%,并呈现出一定程度的分异,Pd/Ir值在2.11~7.09之间,在铂族元素地幔标准化图中表现为正倾斜曲线,部分样品均有轻微的Ir亏损(图4)。与峨眉山苦橄岩和瓦吉里塔格隐爆角砾岩的PGE相比,它们的原始地幔标准化曲线十分相似,但是霞石岩的PGE各元素的含量却分别只有它们的1/6和1/30左右。相比峨眉山玄武岩,瓦吉里塔格霞石岩的IPGE(Ir亚族,包括Os、Ir和Ru)与PPGE(Pd亚族,包括Pt、Pd和Rh)只是发生了一定程度的分异,并没有峨眉山玄武岩那么明显。

4 讨论

4.1 分离结晶作用

在幔源岩浆发生部分熔融或结晶分异的过程中,由于Ir、Ru和Os(IPGE)表现为相容性,从而保

留在部分熔融的残留相或者结晶分异的固相中,而Pt、Pd(PPGE)则表现为不相容性,通常赋存于熔体相中(Naldrett *et al.*, 1979)。另外,铂族元素中Pd和Ir的地球化学性质差别较大,因此,它们作为PPGE和IPGE的代表元素,其比值可以用来判断PPGE和IPGE的分异程度。瓦吉里塔格霞石岩的Pd/Ir值为2.11~7.09,高于原始地幔的比值(Pd/Ir=1),这说明瓦吉里塔格霞石岩的Ir、Ru、Rh与Pt、Pd发生了分异。前人研究表明,利用Pd/Ir与Pt/Pt*之间的关系可以很好地区分部分熔融和结晶分异趋势(Bea *et al.*, 1997),从这两个比值的相关关系图解可以看出,地幔部分熔融具有正相关关系,岩浆分离结晶则具有负相关关系。瓦吉里塔格霞石岩Pd/Ir与Pt/Pt*表现为具有一定程度的负相关关系(图5),表明这些霞石岩样品为同一母岩浆经过分离结晶作用形成的。

MgO的含量变化与橄榄石的分离结晶有直接的关系(Bea *et al.*, 1997),从瓦吉里塔格霞石岩的PGE与MgO关系图可以看出,PGE元素与MgO呈正相关。而Pd/Ir和Cu/Pd与MgO则呈负相关(图6)。同时,Cheng等(2015)根据该区霞石岩的主量元素及岩相学特征认为该霞石岩岩浆经历了橄榄石的分离结晶作用。这说明橄榄石结晶分异作用对霞石岩的PGE分馏起控制作用(图6)。

4.2 源区特征

前人的研究表明,形成霞石岩岩浆必须至少满足以下3个条件:①低程度部分熔融;②高压环境;③地幔源区富含CO₂或者部分熔融之前发生了交代作用(Vapnik *et al.*, 2007; Ali *et al.*, 2013)。然而霞石岩是否代表原始岩浆还存在着争议。一些学者认为霞石岩以及相关的碱性玄武岩代表原始岩浆(Zeng *et al.*, 2010; Ali *et al.*, 2013),产生不同类型的岩石是由于部分熔融程度的不同导致的。也有一些学者认为霞石岩并不能代表原始岩浆,而是经过分离结晶作用的演化岩浆(Klaudios and Keller, 2006; Barker *et al.*, 2012; Cheng *et al.*, 2015)。Cheng等(2015)认为瓦吉里塔格霞石岩是碳酸盐化地幔橄榄岩+榴辉岩经过低程度部分熔融形成的。

在地幔分异的过程中,对于没有发生分异的地幔物质,它的Pd≈Ir,Pt/Pt*≈1。随着岩浆的演化,结晶分异作用形成的岩石与原始地幔相比,Pd/Ir值增加,Pt/Pt*值降低(Bea *et al.*, 1997),利用Pd/Ir-Pt/Pt*图解不仅可以判别分离结晶作用

表 1 瓦吉里塔格霞石岩 PGE 分析结果

Table 1 PGE analyses of the nephelinites from Wajilitag

样号	D46-13	D46-15	D46-20	D46-22	DW-18-3	DW-18-4	DW-18-13	原始地幔	瓦吉里塔格隐爆角砾岩	峨眉山苦橄岩	峨眉山玄武岩	塔里木玄武岩
$w(\text{MgO})/\%$	8.05	8.48	8.66	8.82	8.99	8.05	8.43					
$w(\text{TiO}_2)/\%$	4.32	4.36	4.33	4.14	4.45	4.29	4.33					
$w(\text{Os})/10^{-9}$	0.082	0.083	0.129	0.102	0.077	0.097	0.105	3.89	0.62	5.4	0.39	0.005 ~ 0.106
$w(\text{Ir})/10^{-9}$	0.044	0.058	0.067	0.064	0.066	0.043	0.049	3.848	0.3	1.55	0.069 8	0.002 ~ 0.067
$w(\text{Ru})/10^{-9}$	0.097	0.115	0.123	0.166	0.091	0.076	0.095	5.696	0.52	1.5	0.49	0.004 ~ 0.253
$w(\text{Rh})/10^{-9}$	0.020	0.023	0.029	0.036	0.027	0.020	0.020	1.072	0.14	0.45	0.25	0.003 ~ 0.078
$w(\text{Pt})/10^{-9}$	0.288	0.324	0.397	0.484	0.447	0.279	0.311	7.92	2.6	5.55	7.71	0.034 ~ 0.169
$w(\text{Pd})/10^{-9}$	0.233	0.260	0.324	0.454	0.139	0.217	0.259	4.48	2.42	4.15	5.48	0.008 ~ 0.124
$w(\text{Cu})/10^{-6}$	98.5	92.5	100.0	72.8	105.0	95.4	95.2	30	168			
$w(\text{Ni})/10^{-6}$	173	174	186	201	200	166	181	1 960	513			
$w(\text{Pd})/w(\text{Ir})$	5.30	4.48	4.84	7.09	2.11	5.05	5.29	1.16	8.1			
$w(\text{Pt})/w(\text{Pd})$	1.24	1.25	1.23	1.07	3.22	1.29	1.20	1.77	1.07			

原始地幔数据引自 Bennett 等(2000); 瓦吉里塔格隐爆角砾岩数据引自励音骥等(2010); 峨眉山苦橄岩数据引自 Brandon 等(1999); 峨眉山玄武岩数据引自张成江等(1998); 塔里木玄武岩数据引自励音骥等(2011)。

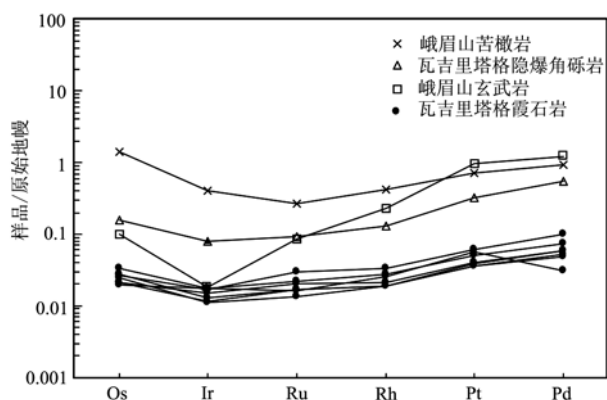


图 4 瓦吉里塔格霞石岩铂族元素原始地幔标准化图解
Fig. 4 Primitive mantle normalized PGE patterns of the nephelinites from Wajilitag
数据来源同表 1
data source as for Table 1

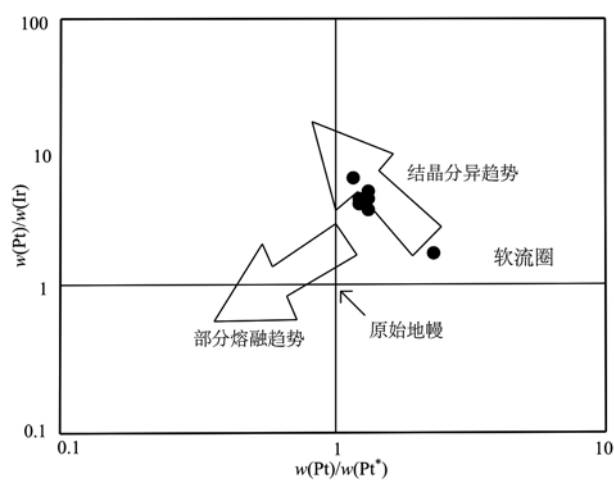


图 5 Pd/Ir - Pt/Pt* 图解 (据 Bea 等, 1997)
Fig. 5 Diagram of Pd/Ir - Pt/Pt* (after Bea *et al.*, 1997)

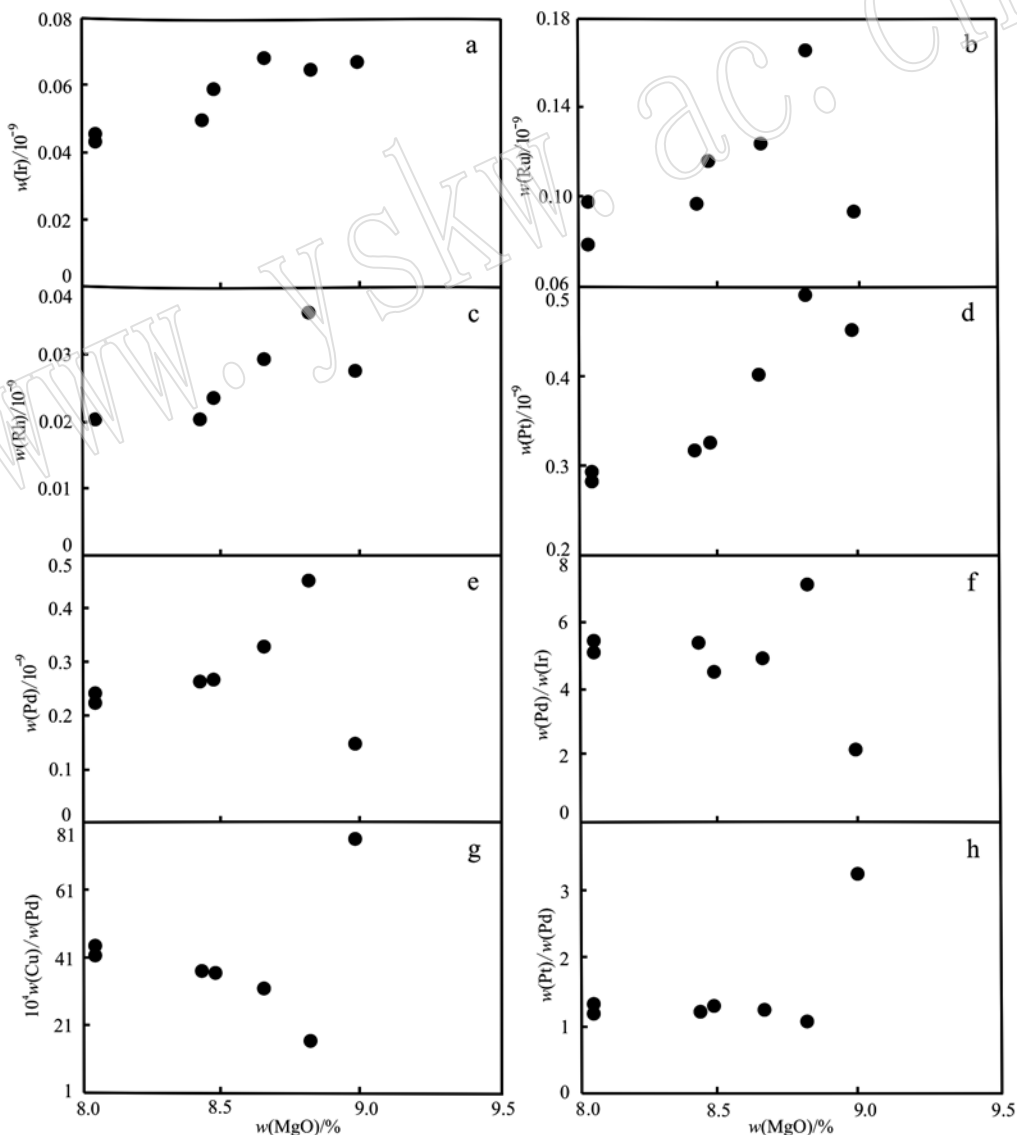


图 6 瓦吉里塔格霞石岩 PGE、Pd/Ir、Cu/Pd、Pt/Pd 与 MgO 相关关系图
Fig. 6 Plots of PGE, Pd/Ir, Cu/Pd, Pt/Pd against MgO for the nephelinites from Wajilitag

和部分熔融的趋势,还可以对亏损软流圈地幔和未发生分异的原始地幔进行区分。由图 5 可以看出,瓦吉里塔格霞石岩的地幔源区为亏损软流圈地幔。原始地幔部分熔融程度与 PGE 元素含量图解显示,瓦吉里塔格霞石岩较低的 PGE 含量可能是地幔经过 1%~10% 部分熔融的结果(图 7)。如图 7 所示,小于 10% 的部分熔融程度就可以造成瓦吉里塔格霞石岩所具有的 PGE 含量。

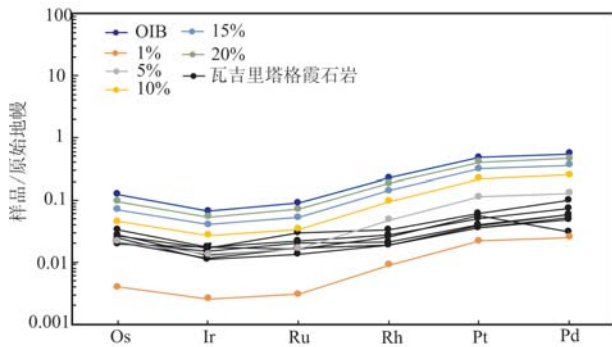


图 7 部分熔融程度与 PGE 元素含量图解

Fig. 7 Diagram of partial melting of primitive mantle and content of PGE element

利用 OIB 的成分可以模拟形成霞石岩的地幔组分。根据 Keays(1995)对地幔发生部分熔融的模拟实验,当部分熔融程度(F)在 5%、10%、15% 和 20% 时,残余地幔中的硫含量分别为 200×10^{-6} 、 150×10^{-6} 、 100×10^{-6} 、 50×10^{-6} ,在这里假定 F 为 1% 时,硫含量为 250×10^{-6} 。如果在部分熔融过程中硫全部以硫化物的形式存在于残余地幔中,则 $X_{sul} = X_s / 0.38$ (X_{sul} 为硫化物含量, X_s 为硫含量),岩浆中岩浆与硫化物质量比 $R = 10^4 F / X_{sul}$ 。计算公式如下:

$$X_m = X_m^i (D_i + R)$$

式中, X_m 为部分熔融后岩浆中元素的含量, X_m^i 为发生部分熔融地幔的元素 i 含量(本文用 OIB 型地幔代表发生部分熔融地幔), R 为岩浆与硫化物的质量比值, D 表示元素 i 在硫化物与岩浆之间的分配系数。计算结果见表 2。

研究表明,只有在高程度部分熔融(25%)的条件下,地幔中的硫化物才能完全溶解进入熔体(Maier *et al.*, 2003)。Naldrett(2010)认为只要部分熔融程度小于 11%,就会有硫化物残留于地幔中。Cheng 等(2015)认为瓦吉里塔格霞石岩是碳酸盐化橄榄岩经过 1%~1.5% 低程度部分熔融产生的,由于模拟结果大部分小于 5%,故本文估计部分熔融程度为

表 2 部分熔融岩浆中定量模拟的 PGE 含量 $w_B/10^{-9}$

Table 2 Modeled PGE content of partial melts

	Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd
OIB	0.39	0.2	0.43	0.19	3.11	1.95
D	4.3	3.6	4.2	3.5	3	3
1%	0.013 3	0.008 1	0.015 0	0.007 9	0.150 0	0.094 0
5%	0.070 6	0.041 8	0.079 3	0.040 6	0.748 0	0.469 0
10%	0.144 6	0.082 6	0.161 8	0.079 8	1.423 9	0.892 8
15%	0.222 3	0.122 6	0.247 6	0.117 7	2.037 6	1.277 6
20%	0.304 0	0.161 7	0.336 9	0.154 4	2.597 4	1.628 6

注: OIB 据 Maier 等(2003)和 Maier(2005); D (分配系数)据 Fleet 等(1996)。

<5%,推测瓦吉里塔格霞石岩形成于熔融程度较低的地幔源区。Keays(1995)认为地幔源区的部分熔融程度<5%时,母岩浆需要 $3\,000 \times 10^{-6} \sim 5\,000 \times 10^{-6}$ 的硫承载量(岩浆不发生硫化物的熔离所能承受的最大硫含量)才会使岩浆不会发生硫饱和,因此本文利用 Fortin 等(2015)所提出的经验公式计算出了瓦吉里塔格霞石岩母岩浆在其形成时所能承受的最大硫承载量(SCSS),经验公式如下: $\ln(S, 10^{-6})_{SCSS} = 34.784 - 5\,772.3/T - 246.54 p/T - 20.393 X_{H_2O} - 25.499 X_{SiO_2} - 18.344 X_{TiO_2} - 27.381 X_{Al_2O_3} - 17.275 X_{FeO} - 22.298 X_{MgO} - 20.378 X_{CaO} - 18.954 X_{Na_2O} - 32.194 X_{K_2O}$ 。式中, T 为热力学温度(K), p 为压力(0.1 GPa), X 为各氧化物的摩尔分数, $\ln(S, 10^{-6})_{SCSS}$ 为最大硫承载量的对数值。根据 Cheng 等(2015)对霞石岩形成时温压条件的估算,得出温度和压力分别为 $1\,542 \sim 1\,547^\circ C$ 和 $3.5 \sim 4.3$ GPa。从经验公式可以看出,最大硫承载量(SCSS)与温度呈正比,与压力呈反比,因此为了计算出霞石岩母岩浆最大的硫承载量,将温度设定为 $1\,800\,T$,压力设为 4 GPa,估算出瓦吉里塔格霞石岩母岩浆对应的 SCSS 值范围为 $2\,810 \times 10^{-6} \sim 3\,114 \times 10^{-6}$ 。从计算情况来看,瓦吉里塔格霞石岩的母岩浆勉强可以达到地幔源区 5% 部分熔融产生的硫承载量,但是计算的一部分样品还在这个值之下,这可能说明母岩浆在形成之时已经发生了硫过饱和,并且有一定量的硫化物残留于地幔源区,从而导致霞石岩 PGE 的极度亏损。

另外,由于铂族元素和硫化物之间具有很强的亲和性,在硫化物中的分配系数可以达到 $10^4 \sim 10^5$ 数量级,因此岩浆中 S 的饱和度对于铂族元素具有很强的控制作用。Cu 和 Pd 与硫化物均具有较强的亲和性,但是由于 Cu 同时具有亲石元素的特征,而 Pd 相比 Cu 具有更高的亲硫性,所以在硫发生饱和

时, Cu 倾向于进入熔体, 而 Pd 会进入硫化物中 (Philipp *et al.*, 2001)。因此可以利用两者的相对含量来判断岩浆是否达到硫饱和。当岩浆中的硫化物发生饱和并且发生熔离时, 铂族元素会随着硫化物熔离, 从而导致部分熔融形成的岩浆中的 PGE 含量大大降低 (Hamlyn *et al.*, 1985)。Cu/Pd 值可以作为硫化物饱和的指示剂 (Fleet *et al.*, 1996)。瓦吉里塔格霞石岩的 Cu/Pd 值为 160 000 ~ 1 683 000, 平均 610 000, 远远高于原始地幔 (7 000 ~ 10 000) (Taylor and McLennan, 1985; Barnes and Maier, 1999)。图 8 表明瓦吉里塔格霞石岩岩浆为 S 饱和岩浆。

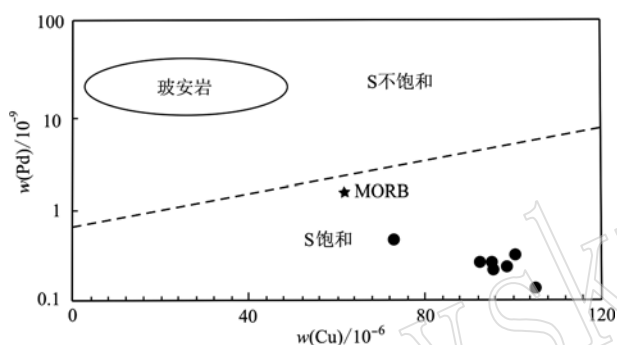


图 8 Pd - Cu 图解 (Vogel and Keays, 1997)

Fig. 8 Diagram of Pd versus Cu (Vogel and Keays, 1997)

导致岩浆发生硫饱和的因素有多种: ① 在岩浆演化过程中由于硅酸盐和氧化物的分异使得岩浆中的 S 含量逐渐升高。研究证明, 随着铬铁矿的结晶沉淀, 岩浆随着 FeO 含量的降低会发生 S 饱和; 与 Fe^{2+} 密切相关的硅酸盐矿物 (橄榄石、辉石) 发生分异会使岩浆中 S 的溶解度降低, 从而发生 S 饱和 (Shima and Naldrett, 1975; Li *et al.*, 2001)。② 地壳的混染导致 S 饱和。这包括外来硫化物 S 的加入直接导致岩浆的 S 饱和, 地壳混染导致岩浆氧逸度的增加使铬铁矿和磁铁矿发生分异, 降低了岩浆 FeO 含量, 使岩浆达到 S 饱和 (Buchanan and Nolan, 1979)。③ 不同成分 S 不饱和岩浆的混合发生 S 饱和 (Cawthorn, 2010)。但是霞石岩的地球化学及同位素特征都显示其受到地壳混染的影响并不明显, 没有发生岩浆的混合, 很大程度上是受到分离结晶的影响 (Cheng *et al.*, 2015), 岩石中也没有蚀变矿物, 如绿泥石、绿帘石等的出现, 也可以排除流体对铂族元素含量的影响。因此推断导致霞石岩岩浆的硫饱和并不是地壳混染, 而可能是与分离结晶作用

有关。

实验岩石学的研究表明, Cu 和 Pd 在橄榄石与母岩浆的分配系数具有非常大的差异 ($D_{\text{Cu}} = 0.11$, $D_{\text{Pd}} = 0.026$) (Brenan *et al.*, 2003; Bedard, 2005)。瓦吉里塔格霞石岩在 Cu/Pd - MgO 图解 (图 6) 中具明显的负相关。显然, Cu 和 Pd 在橄榄石中都属于不相容元素, 但是 Cu 的分配系数大约是 Pd 的 4 倍, 所以橄榄石的分离结晶作用会导致残留岩浆 Cu 比 Pd 要相对亏损, 因此随着岩浆中 MgO 含量的降低, Cu/Pd 值也随之降低。这说明橄榄石的结晶分异对霞石岩中的 Cu、Pd 分异起重要作用, 也是导致霞石岩岩浆达到硫饱和的重要因素。

4.3 Cu-Ni-PGE 矿床成矿潜力分析

如前言所述, 一般认为形成较大型的 Cu-Ni 硫化物铂族元素矿床必须满足 3 个条件。作为塔里木大火成岩省的组成部分, 对于形成 Cu-Ni 硫化物铂族元素矿床的条件, 瓦吉里塔格霞石岩满足第 1 个条件, 即存在大规模的岩浆活动。但是形成霞石岩的原始岩浆在产生之初就达到了 S 饱和, 导致了硫化物过早的熔离, 不满足第 2 个条件。因此, 塔里木大火成岩省之所以至今还没有发现具有开采价值的 Cu-Ni 硫化物铂族元素矿床, 可能是由于霞石岩岩浆源区发生低程度部分熔融产生了 S 饱和岩浆, 从而导致一定数量的硫化物残留于深部地幔。

但是在塔里木大火成岩省周边地区, 如天山和北山等地的早二叠世基性-超基性岩体中发育有较大型的铜镍硫化物矿床, 如白石泉、图拉尔根、坡北等 (Zhou *et al.*, 2004; Chai *et al.*, 2008)。这些基性-超基性岩体是否属于塔里木大火成岩省的一部分仍然存在一些争议 (Su *et al.*, 2011)。根据对比发现, 与塔里木大火成岩省溢流玄武岩及瓦吉里塔格霞石岩 (塔里木大火成岩省晚期岩浆活动产物) 不同的是这些基性-超基性岩体是高度部分熔融的产物, 且其原始岩浆多为 S 不饱和, 经过后期的演化发生岩浆的 S 饱和及 S 的熔离, 从而产生硫化物矿床, 并且这些硫化物矿床都伴有一定程度的 PGE 矿化 (柴凤梅等, 2006; Qi *et al.*, 2011)。它们与瓦吉里塔格霞石岩在原始岩浆的形成条件上存在的差异表明, 地幔源区的部分熔融程度对于塔里木大火成岩省 Cu-Ni 硫化物铂族元素矿床扮演着重要的角色。因此认为, 不管是在塔里木大火成岩省还是及其周边, 地幔源区产生部分熔融程度较高的基性-超基性岩体是寻找具有经济价值的铜-镍-铂族元素矿

床的重点区域。

5 结论

(1) 瓦吉里塔格霞石岩极度亏损 PGE, SCSS 计算表明在低程度部分熔融的条件下, 霞石岩的母岩浆不能承载部分熔融所产生的 S, 指示瓦吉里塔格霞石岩的母岩浆在形成之初就发生过 S 的过饱和, 使得源区可能有一定量的硫化物残留, 这是导致瓦吉里塔格霞石岩极度亏损 PGE 的主要原因。

(2) 霞石岩极高的 Cu/Pd 值以及岩浆的 S 饱和并非地壳混染和岩浆混合导致, 可能是橄榄石的结晶分异导致, 并且在岩浆上升的过程中没有因素导致霞石岩岩浆的 S 过饱和, 从而发生硫化物的熔离。

(3) 瓦吉里塔格霞石岩与塔里木大火成岩省周边的早二叠世基性-超基性岩的原始岩浆在形成条件上存在着差异, 地幔的部分熔融程度在塔里木大火成岩省形成 Cu-Ni 硫化物铂族元素矿床过程中起到至关重要的作用。

References

- Ali S, Ntaflou T and Upton B G J. 2013. Petrogenesis and mantle source characteristics of quaternary alkaline mafic lavas in the western Carpathian-Pannonian region, Styria, Austria[J]. *Chemical Geology*, 337 ~ 338(1): 99 ~ 113.
- Barker A K, Troll V R, Ellam R M, *et al.* 2012. Magmatic evolution of the Cadamosto seamount, Cape Verde: beyond the spatial extent of EMI[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 163(6): 949 ~ 965.
- Barnes S J and Maier W D. 1999. The fractionation of Ni, Cu and the noble metal in silicate and sulphide[A]. *Dynamic Processes in Magmatic Ore Deposits and Their Application to Mineral Exploration*[C]. Geological Society Canada Mineralogical Society Canada, short course notes: 69 ~ 106.
- Barnes S, Naldrett A J and Gorton M P. 1985. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas[J]. *Chemical Geology*, 53: 303 ~ 323.
- Barnes S J, Pagé P, Prichard H M, *et al.* 2016. Chalcophile and platinum-group element distribution in the ultramafic series of the Stillwater complex, MT, USA—Implications for processes enriching chromite layers in Os, Ir, Ru, and Rh[J]. *Mineralium Deposita*, 51(1): 25 ~ 47.
- Bea F, Garuti G, Pushkarev E V, *et al.* 1997. Platinum-group elements as petrological indicators in mafic-ultramafic complexes of the central and southern Urals: preliminary results[J]. *Tectonophysics*, 276(1): 181 ~ 194.
- Bédard J H. 2005. Partitioning coefficients between olivine and silicate melts[J]. *Lithos*, 83(3): 394 ~ 419.
- Bennett V C, Norman M D and Garcia M O. 2000. Rhenium and platinum group element abundances correlated with mantle source components in Hawaiian picrites: sulphides in the plume[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 183(3): 513 ~ 526.
- Brandon A D, Norman M D, Walker R J, *et al.* 1999. ¹⁸⁶Os-¹⁸⁷Os systematics of Hawaiian picrites[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 174(1 ~ 2): 25 ~ 42.
- Brenan J M, McDonough W F and Dalpé C. 2003. Experimental constraints on the partitioning of rhenium and some platinum-group elements between olivine and silicate melt[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 212(1 ~ 2): 135 ~ 150.
- Buchanan D L and Nolan J. 1979. Solubility of sulfur and sulfide immiscibility in synthetic tholeiitic melts and their relevance to Bushveld complex rocks[J]. *Canadian Mineralogist*, 17(2): 483 ~ 494.
- Cawthorn R G. 2010. The platinum group element deposits of the Bushveld complex in South Africa[J]. *Platinum Metals Review*, 54(4): 205 ~ 215.
- Chai Fengmei, Zhang Zhaochong, Mao Jingwen, *et al.* 2006. Platinum group elements geochemistry of Baishiquan mafic-ultramafic intrusives in Central Tianshan Block, Xinjiang[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 27(2): 123 ~ 128 (in Chinese with English abstract).
- Chai F, Zhang Z, Mao J, *et al.* 2008. Geology, petrology and geochemistry of the Baishiquan Ni-Cu-bearing mafic-ultramafic intrusions in Xinjiang, NW China: implications for tectonics and genesis of ores[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2 ~ 4): 218 ~ 235.
- Cheng Zhiguo, Zhang Zhaochong, Hou T, *et al.* 2017. Decoupling of Mg-C and Sr-Nd-O isotopes traces the role of recycled carbon in magnesio-carbonatites from the Tarim large igneous province[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 202: 159 ~ 178.
- Cheng Zhiguo, Zhang Zhaochong, Santosh M, *et al.* 2014. Carbonate- and silicate-rich globules in the kimberlitic rocks of northwestern Tarim large igneous province, NW China: Evidence for carbonated mantle source[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 95: 114 ~ 135.
- Cheng Zhiguo, Zhang Zhaochong, Santosh M, *et al.* 2015. Petrogenesis of nephelinites from the Tarim Large Igneous Province, NW China: Implications for mantle source characteristics and plume-lithosphere interaction[J]. *Lithos*, 220 ~ 223: 164 ~ 178.
- Crocket J H and Macrae W E. 1986. Platinum-group element distribution in komatiitic and tholeiitic volcanic rocks from Munro township, Ontario[J]. *Economic Geology*, 81(5): 1 242 ~ 1 251.
- Fleet M, Crocket J and Stone W. 1996. Partitioning of platinum-group element (Os, Ir, Ru, Pt, Pd) and gold between sulfide liquid and basalt melt[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(13): 2 397 ~ 2 412.
- Fortin M A, Riddle J, Desjardins L Y, *et al.* 2015. The effect of water on the sulfur concentration at sulfide saturation (SCSS) in natural melts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 160: 100 ~ 116.
- Ge R, Zhu W, Wu H, *et al.* 2012. The Paleozoic northern margin of the

- Tarim craton: passive or active[J]? *Lithos*, 142~143(6): 1~15.
- Hamlyn P R, Keays R R, Cameron W E, *et al.* 1985. Precious metals in magnesian low-Ti lavas: implications for metallogenesis and sulfur saturation in primary magmas[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49(8): 1 797 ~ 1 811.
- Ibrahlm U, Tarkian M, Sadiklar M B, *et al.* 2007. Platinum-group-element geochemistry and mineralogy of ophiolitic chromitites from the Kop mountains, northeastern Turkey[J]. *Canadian Mineralogist*, 45(2): 355 ~ 377.
- Iii W J C and Neal C R. 2005. Platinum-group element constraints on source composition and magma evolution of the Kerguelen plateau using basalts from ODP Leg 183[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(19): 4 685 ~ 4 701.
- Jiang Changyi, Zhang Pengbo, Lu Dengrong, *et al.* 2004. Petrogenesis and magma source of the ultramafic rocks at Wajilitag Region, Western Tarim Plate in Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1 433 ~ 1 444(in Chinese with English abstract).
- Keays R R. 1995. The role of komatiitic and picritic magmatism and s-saturation in the formation of ore deposits[J]. *Lithos*, 34(1~3): 1~18.
- Keays R R. 1997. Requirements for the formation of giant Ni-Cu-PGE sulfide deposits: The role of magma generation[J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 78: F799.
- Klaudius J and Keller J. 2006. Peralkaline silicate lavas at Oldoinyo Lengai, Tanzania[J]. *Lithos*, 91(1): 173 ~ 190.
- Li C, Naldrett A J and Ripley E M. 2001. Critical factors for the formation of a nickel-copper deposit in an evolved magma system: Lessons from a comparison of the pants lake and voisey's bay sulfide occurrences in Labrador, Canada[J]. *Mineralium Deposita*, 36(1): 85 ~ 92.
- Li Yinqi, Li Zilong, Sun Yali, *et al.* 2010. PGE and geochemistry of Wajilitag ultramafic cryptoexplosive brecciated rocks from Tarim Basin: Implications for petrogenesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3 307 ~ 3 318(in Chinese with English abstract).
- Li Yinqi, Li Zilong, Sun Yali, *et al.* 2011. Characteristics of platinum group elements in Permian basalts from Tarim Basin and their implications for magmatic evolution and sulfide mineralization[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(s1): 366 ~ 366(in Chinese).
- Lian Dongyang, Yang Jingsui, Xiong Fahui, *et al.* 2015. Platinum-group element characteristics of the peridotite and podiform chromitite from Dajiweng ophiolite of the western segment of Yarlung-Zangbo suture zone, Tibet[J]. *Geology in China*, (2): 525 ~ 546(in Chinese with English abstract).
- Lorand J P and Alard O. 2001. Platinum-group element abundances in the upper mantle: new constraints from in situ and whole-rock analyses of Massif Central xenoliths (France)[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(16): 2 789 ~ 2 806.
- Maier W D. 2005. Platinum-group element (PGE) deposits and occurrences: mineralization styles, genetic concepts, and exploration criteria[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 41(3): 165 ~ 191.
- Maier W D, Roelofse F and Barnes S J. 2003. The concentration of the platinum-group elements in South African komatiites: Implications for mantle sources, melting regime and PGE fractionation during crystallization[J]. *Journal of Petrology*, 44(10): 1 787 ~ 1804.
- Naldrett A J. 2010. Journal of South Africa from the mantle to the bank: the life of a Ni-Cu-PGE sulfide deposit[J]. *South Africa Journal of Geology*, 113(1): 1 ~ 32.
- Naldrett A J, Hoffman E L, Green A H, *et al.* 1979. The composition of Ni-sulfide ores, with particular reference to their content of PGE and Au[J]. *Canadian Mineralogist*, 17: 403 ~ 415.
- Philipp H, Eckhardt J D and Puchelt H. 2001. Platinum-group elements (PGE) in basalts of the seaward-dipping reflector sequence, SE Greenland Coast[J]. *Journal of Petrology*, 42(2): 407 ~ 432.
- Pirajno F. 2004. Hotspots and mantle plumes: global intraplate tectonics, magmatism and ore deposits[J]. *Mineralogy & Petrology*, 82(3~4): 183 ~ 216.
- Qi L, Gao J, Huang X, *et al.* 2011. An improved digestion technique for determination of platinum group elements in geological samples[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26(9): 1 900 ~ 1 904.
- Qin K Z, Su B X, Sakyi P A, *et al.* 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. 280 Ma Mantle Plume[J]. *American Journal of Science*, 311(3): 237 ~ 260.
- Shima H and Naldrett A J. 1975. Solubility of sulfur in an ultramafic melt and the relevance of the system Fe-S-O[J]. *Economic Geology*, 70(5): 960 ~ 967.
- Snow J E and Schmidt G. 1998. Constraints on earth accretion deduced from noble metals in the oceanic mantle[J]. *Nature*, 391(6 663): 166 ~ 169.
- Snow J E, Schmidt G and Rampone E. 2000. Os isotopes and highly siderophile elements(HSE) in the ligurian ophiolites, Italy[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 175(1~2): 119 ~ 132.
- Song X Y, Zhou M F, Cao Z M, *et al.* 2003. Ni-Cu-(PGE) magmatic sulfide deposits in the Yangliuping area, Permian Emeishan igneous province, SW China[J]. *Mineralium Deposita*, 38(7): 831 ~ 843.
- Su B X, Qin K Z, Sakyi P A, *et al.* 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[J]. *Gondwana Research*, 20(2~3): 516 ~ 531.
- Sun Linhua, Wang Yuejun, Fan Weiming, *et al.* 2007. Petrogenesis and tectonic significances of the diabase dikes in the Bachu area, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1 369 ~ 1 380(in Chinese with English abstract).
- Tao Yan, Luo Taiyi, Gao Zhenmin, *et al.* 2004. The relation between Emeishan continental flood basalts and Cu-Ni-PGE deposits of south-

- western China trap—A case study on Jinbaoshan mafic-ultramafic intrusion, Yunnan[J]. *Geological Review*, 50(1): 9~15(in Chinese).
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution, An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks*[M]. Blackwell Scientific Pub.
- Tian W, Campbell I H, Allen C M, *et al.* 2010. The Tarim picrite-basalt-rhyolite suite, a Permian flood basalt from northwest China with contrasting rhyolites produced by fractional crystallization and anatexis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(3): 407~425.
- Vaillant M L, Barnes S J, Fiorentini M L, *et al.* 2016. Effects of hydrous alteration on the distribution of base metals and platinum group elements within the kevitsa magmatic nickel sulphide deposit[J]. *Ore Geology Reviews*, 72(1): 128~148.
- Vapnik Y, Sharygin V V, Samoilov V, *et al.* 2007. The petrogenesis of basic and ultrabasic alkaline rocks of western Makhtesh Ramon, Israel: Geochemistry, melt and fluid inclusion study[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 96(4): 663~684.
- Vogel D C and Keays R R. 1997. The Application of platinum group geochemistry in constraining the source of basalt magmas: Results from the Newer Volcanic Province, Victoria, Australia[J]. *Chem. Geol.*, 136: 181~204.
- Xu Y G, Wei X, Luo Z Y, *et al.* 2014. The early Permian Tarim large igneous province: main characteristics and a plume incubation model[J]. *Lithos*, 204(3): 20~35.
- Yang S F, Li Z, Chen H, *et al.* 2007. Permian bimodal dyke of Tarim basin, NW China: Geochemical characteristics and tectonic implications[J]. *Gondwana Research*, 12(1): 113~120.
- Yang Yijin, Bai Zhongjie, Zhu Weiguang, *et al.* 2016. Geochemical characteristics of the platinum-group elements of the Neoproterozoic picritic dykes in the Panzhihua area, Sichuan Province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(1): 126~137(in Chinese with English abstract).
- Yu X, Yang S F, Chen H L, *et al.* 2011. Permian flood basalts from the Tarim basin, northwest China: shrimp zircon U-Pb dating and geochemical characteristics[J]. *Gondwana Research*, 20(2~3): 485~497.
- Zeng G, Chen L H, Xu X S, *et al.* 2010. Carbonated mantle sources for Cenozoic intra-plate alkaline basalts in Shandong, North China[J]. *Chemical Geology*, 273(1): 35~45.
- Zhang C L and Zou H B. 2013. Comparison between the Permian mafic dykes in Tarim and the western part of Central Asian Orogenic Belt (CAOB), China NW China: Implications for two mantle domains of the Permian Tarim large igneous province[J]. *Lithos*, 174(5): 15~27.
- Zhang Chengjiang and Li Xiaolin. 1998. Geochemical characteristics of platinum group elements in Emeishan basalts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(3): 299~304(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Zhou Gang, Yan Shenghao, *et al.* 2006. Platinum group element geochemistry of the Devonian arc-related picrites of the south margin of the Altai Mountains in Xinjiang and its geological implications[J]. *Geoscience*, 20(4): 519~526(in Chinese with English abstract).
- Zhou M F, Leshner C M, Yang Z, *et al.* 2004. Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni-Cu-(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district, Eastern Xinjiang, Northwest China: Implications for the tectonic evolution of the central Asian orogenic belt[J]. *Chemical Geology*, 209(3~4): 233~257.
- Zhou M F, Zhao J H, Jiang C Y, *et al.* 2009. OIB-like, heterogeneous mantle sources of Permian basaltic magmatism in the western Tarim basin, NW China: Implications for a possible Permian large igneous province[J]. *Lithos*, 113(3~4): 583~594.
- Zou S Y, Li Z L, Song B, *et al.* 2015. Zircon U-Pb dating, geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes of the wajilitag alkali mafic dikes, and associated diorite and syenitic rocks: Implications for magmatic evolution of the Tarim large igneous province[J]. *Lithos*, s212~215: 428~442.

附中文参考文献

- 柴凤梅, 张招崇, 毛景文, 等. 2006. 新疆哈密白石泉含铜镍镁铁-超镁铁质岩体铂族元素特征[J]. *地球学报*, 27(2): 123~128.
- 姜常义, 张蓬勃, 卢登荣, 等. 2004. 新疆塔里木板块西部瓦吉里塔格地区二叠纪超镁铁岩的岩石成因与岩浆源区[J]. *岩石学报*, 20(6): 1433~1444.
- 励音骐, 厉子龙, 孙亚莉, 等. 2010. 塔里木瓦吉里塔格超镁铁质隐爆角砾岩铂族元素和微量元素地球化学特征及其岩石成因探讨[J]. *岩石学报*, 26(11): 3307~3318.
- 励音骐, 厉子龙, 孙亚莉, 等. 2011. 塔里木二叠纪玄武岩的铂族元素特征及其对岩浆演化和硫化物成矿作用的启示[J]. *矿物学报*, 31(s1): 366~366.
- 连东洋, 杨经绥, 熊发挥, 等. 2015. 雅鲁藏布江缝合带西段达机翁地幔橄榄岩及铬铁矿的铂族元素特征[J]. *中国地质*, (2): 525~546.
- 孙林华, 王岳军, 范蔚茗, 等. 2007. 新疆巴楚辉绿岩脉的岩石成因和大地构造意义[J]. *岩石学报*, 23(6): 1369~1380.
- 陶琰, 罗泰义, 高振敏, 等. 2004. 西南暗色岩铜镍硫化物矿化岩体与峨眉山玄武岩的关系——以云南金宝山岩体为例[J]. *地质论评*, 50(1): 9~15.
- 杨仪锦, 柏中杰, 朱维光, 等. 2016. 四川攀枝花新元古代苦橄质岩脉的铂族元素地球化学特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 35(1): 126~137.
- 张成江, 李晓林. 1998. 峨眉山玄武岩的铂族元素地球化学特征[J]. *岩石学报*, 14(3): 299~304.
- 张招崇, 周刚, 闫升好, 等. 2006. 新疆阿尔泰山南缘泥盆纪弧型苦橄岩铂族元素地球化学特征及其地质意义[J]. *现代地质*, 20(4): 519~526.