

# 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\*

励音骐<sup>1</sup> 厉子龙<sup>1\*\*</sup> 孙亚莉<sup>2</sup> 陈汉林<sup>1</sup> 杨树锋<sup>1</sup> 余星<sup>1,3</sup>

LI YinQi<sup>1</sup>, LI ZiLong<sup>1\*\*</sup>, SUN YaLi<sup>2</sup>, CHEN HanLin<sup>1</sup>, YANG ShuFeng<sup>1</sup> and YU Xing<sup>1,3</sup>

1. 浙江大学地球科学系, 杭州 310027

2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

3. 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012

1. Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

3. Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China

2009-05-03 收稿, 2010-01-25 改回.

Li YQ, Li ZL, Sun YL, Chen HL, Yang SF and Yu X. 2010. PGE and geochemistry of Wajilitag ultramafic cryptoexplosive brecciated rocks from Tarim Basin: Implications for petrogenesis. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11):3307–3318

**Abstract** Wajilitag ultramafic cryptoexplosive brecciated rocks, as one of the most important rock types of the Tarim Permian Large Igneous Province, were studied on platinum group elements (PGE), major, trace and rare earth elements in this study. The results show that these rocks have Os, Ir, Ru, Rh, Pt and Pd contents of  $0.36 \times 10^{-9} \sim 1.08 \times 10^{-9}$ ,  $0.23 \times 10^{-9} \sim 0.44 \times 10^{-9}$ ,  $0.29 \times 10^{-9} \sim 0.92 \times 10^{-9}$ ,  $0.11 \times 10^{-9} \sim 0.18 \times 10^{-9}$ ,  $1.88 \times 10^{-9} \sim 3.16 \times 10^{-9}$  and  $1.39 \times 10^{-9} \sim 3.52 \times 10^{-9}$  respectively, which are lower than those of the primitive mantle and can be compared with the Hawaiian picrites. The Pd/Ir ratios range from 3.6 to 11.9 and the PGE patterns take a shape of positive inclined curve, showing a trend of differentiation and a PGE affinity of basic-ultrabasic rocks under within-plate environment. Generally, the brecciated rocks have higher and concentrated Cu/Pd ratios ( $5.1 \times 10^4 \sim 12.1 \times 10^4$ ) compared to the primitive mantle, indicating that no obvious sulfur oversaturation and segregation occurred during the magma upwelling, but the magma source may have some residual sulfide during its process of partial melting. The positive correlations for IPGE vs. MgO and negative correlations (or no obvious correlation) for PPGE vs. MgO suggest that the PGE differentiation was probably controlled by differentiation of olivine. Geochemically, the brecciated rocks are much enriched in total REE amounts ( $964.1 \times 10^{-6} \sim 1299 \times 10^{-6}$ ) and have strong fractionation between LREE and HREE [ $(La/Yb)_N = 45.88 \sim 64.90$ ]. In the primitive mantle normalized spidergram, the brecciated rocks show humped distribution patterns, with LILE enrichment, slight depletion of Nb and Ta, and negative Zr and Hf anomalies, suggesting that the rocks may have undergone mantle metasomatism. However, similar PGE patterns from the breccias and matrix show that mantle metasomatism might not be a main factor for the PGE fractionation of the brecciated rocks, indicating that the PGE may be existed in the sulphide inclusions in the silicate minerals.

**Key words** PGE; Geochemistry; Petrogenesis; Ultramafic cryptoexplosive brecciated rocks; Wajilitag; Tarim Basin

**摘要** 本文对塔里木盆地二叠纪大火成岩省中瓦吉里塔格地区超镁铁质隐爆角砾岩进行了铂族元素(PGE)和主、微量元素及稀土元素分析和研究。结果显示, 隐爆角砾岩中 Os、Ir、Ru、Rh、Pt 和 Pd 含量分别为  $0.36 \times 10^{-9} \sim 1.08 \times 10^{-9}$ 、 $0.23 \times 10^{-9} \sim 0.44 \times 10^{-9}$ 、 $0.29 \times 10^{-9} \sim 0.92 \times 10^{-9}$ 、 $0.11 \times 10^{-9} \sim 0.18 \times 10^{-9}$ 、 $1.88 \times 10^{-9} \sim 3.16 \times 10^{-9}$  和  $1.39 \times 10^{-9} \sim 3.52 \times 10^{-9}$ , 均低于原始地幔, 与夏威夷苦橄岩相似。该岩石的 Pd/Ir 比值在 3.6~11.9 之间, PGE 分配模式呈一条正倾斜的曲线, 表现出一定程度的分异, 具有非俯冲背景下产生的基性-超基性岩的 PGE 配分特点。略高于原始地幔但变化较小的 Cu/Pd 比值 ( $5.1 \times$

\* 本文受国家重点基础研究发展规划项目(2007CB411303、2011CB808902 和 2001CB409801)、国家自然科学基金(40930315、40972045 和 41072048)、国家人力资源和社会保障部科技择优项目和浙江省研究生创新科研项目联合资助。

第一作者简介: 励音骐, 男, 1984 年生, 博士研究生, 岩石学专业, E-mail: liyinqi@zju.edu.cn

\*\* 通讯作者: 厉子龙, 男, 1965 年生, 教授、博导, 主要从事岩石大地构造学研究, E-mail: zilongli@zju.edu.cn

$10^4 \sim 12.1 \times 10^4$ )表明其岩浆在上升侵位过程中并没有发生明显的饱和硫化物熔离作用,而岩浆源区在部分熔融过程中可能有少量残留的硫化物存在。隐爆角砾岩全岩的 IPGE 元素与 MgO 之间基本上呈正相关,而 PPGE 元素与 MgO 之间则略成负相关或无明显相关性,指示 PGE 的分异主要受到橄榄石结晶分异作用的控制。地球化学特征显示隐爆角砾岩的稀土元素总量高度富集( $964.1 \times 10^{-6} \sim 1299 \times 10^{-6}$ )和轻、重稀土强烈分馏( $(La/Yb)_N = 45.88 \sim 64.90$ ),且微量元素蛛网图上大离子亲石元素富集和 Nb、Ta 的轻微亏损以及 Zr、Hf 的明显贫化,表明岩石可能遭受一定程度的地幔交代作用影响。但是,角砾与胶结物具有相近的 PGE 特征表明交代作用对 PGE 的影响并不大,暗示 PGE 可能主要赋存于禁锢在硅酸盐矿物内的硫化物包裹体中。

**关键词** PGE 特征;地球化学特征;岩石成因;超镁铁质隐爆角砾岩;瓦吉里塔格;塔里木盆地

**中图法分类号** P588.125;P595

## 1 引言

铂族元素(Platinum-Group Elements, PGE)是一组具有高度亲铁和亲硫性的元素,主要富集在地核(Lorand *et al.*, 2008)。近年来的研究表明,PGE 能够为来自幔源的岩石成因提供许多有价值的信息,如探讨基性-超基性岩成因和演化模式、岩浆部分熔融程度以及壳幔相互作用的地球动力学过程等(Naldrett and Duke, 1980; Barnes *et al.*, 1985; Barnes and Naldrett, 1987; Lorand, 1989; Fleet and Stone, 1991; Chai and Naldrett, 1992; Fleet *et al.*, 1996; Garuti *et al.*, 1997; Bennett *et al.*, 2000; 储雪蕾等, 2001; Jiang *et al.*, 2003; 王瑞廷等, 2004; 管涛等, 2004; Chazey and Neal, 2005; Nian *et al.*, 2006; Crocket, 2002; Crocket and Paul, 2004, 2008; 刘庆等, 2008; 刘军锋等, 2008; 孙晓明等, 2008; Qi *et al.*, 2008; Song *et al.*, 2009)。由于 PGE 具有高的电负性(2.2)、化合价( $2^+ \sim 4^+$ )和初始电离电位(5.4 ~ 9.1 eV)等特性(Pauling, 1960; Weast *et al.*, 1986),因此,即使在遭受低温蚀变的影响下(如在风化作用、热液蚀变作用和低温变质作用之下)PGE 的化学性质仍非常稳定。岩石中的 PGE 含量主要取决于岩浆的来源和岩浆演化过程,由于在硫化物中具有非常高的分配系数,PGE 是岩浆演化过程中硫饱和程度的敏感指示剂(柴凤梅等, 2006; 王生伟等, 2007; Qi *et al.*, 2008; Song *et al.*, 2009),也是对亲石元素地球化学特征研究的必要补充。PGE 在幔源岩浆中的含量普遍很低(Morgan, 1986; Lorand, 1989; Handler and Bennett, 1999; Bézoz *et al.*, 2005),然而随着分析技术的发展和测试精度的提高,对与深部地幔活动有密切关系的大火成岩省(如西伯利亚大火成岩省、德干大火成岩省以及峨眉山大火成岩省等)的 PGE 研究已经成为地质学领域中一个新的研究热点(如 Brüggmann *et al.*, 1993; 张成江和李晓林, 1998; Chawde, 2001; 钟宏等, 2006; Qi *et al.*, 2008; Crocket and Paul, 2008)。近年来,对云南、四川等地大量产出的晚古生代铂族元素矿化岩体(如力马河、白马寨、金宝山、杨柳坪等)的 PGE 特征研究表明这些岩体都是峨眉山地幔柱活动的产物(如邓海琳等, 2000; 宋谢炎等, 2004; 陶琰等, 2004, 2007; 王生伟等, 2007),可见铂族元素分布特征与地幔柱活动有着十分密切的关系。

塔里木盆地是我国最大的含油气沉积盆地,地质构造和演化历史漫长而又复杂。盆地内广泛分布的二叠纪玄武岩无论是在地表露头还是深部钻井中都有大量的揭露,分布面积大于  $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,构成了大火成岩省(贾承造, 1997; 陈汉林等, 1997a, b; 姜常义等, 2004a; 杨树锋等, 2005; Yang *et al.*, 2006, 2007; 厉子龙等, 2008; Zhou *et al.*, 2009)(图 1a)。除玄武岩广泛发育之外,盆地内部及周缘还有超镁铁质岩、辉绿岩、辉长岩等其他一些基性-超基性岩类出露,它们也是塔里木二叠纪大火成岩省的重要组成部分。近年来,对其开展岩石大地构造和地球动力学等方面的研究已取得了一些进展(如: 贾承造, 1997; 姜常义等, 2004a, b; Jiang *et al.*, 2006; 杨树锋等, 2005, 2007; Yang *et al.*, 2006, 2007; 李勇等, 2007; 厉子龙等, 2008; Zhang *et al.*, 2008),这对进一步探讨该地区的动力学演化和加大油气及金属矿产勘探力度等都具有重要意义。但是,目前对于塔里木二叠纪基性-超基性岩的 PGE 特征及其成因指示研究几乎仍是空白,因此本文拟对塔里木盆地瓦吉里塔格地区超镁铁质隐爆角砾岩的 PGE 及地球化学特征进行研究,了解塔里木大火成岩省的铂族元素组成特征,有利于进一步认识和阐明塔里木盆地大火成岩省的岩浆演化过程和源区的性质,并为深入研究塔里木盆地二叠纪地球动力学及其演化提供新的资料和证据。

## 2 研究区地质概况

瓦吉里塔格位于新疆巴楚县东南方约 40km,在大地构造上位于塔里木板块西部(图 1),在此出露有一总面积约  $10 \text{ km}^2$  的基性-超基性杂岩体,该杂岩体主要由层状岩体、隐爆角砾岩岩筒和晚期脉岩三部分组成。其中层状岩体多为辉石岩-辉长岩组合,岩石类型复杂多变。隐爆角砾岩筒主要由超镁铁质隐爆角砾岩组成,前人在此区发现了 6 个隐爆角砾岩筒(王懿圣和苏犁, 1987),在地貌上均呈负地形,这些岩筒曾几度被当作金伯利岩评价其含矿性而未果。王懿圣和苏犁(1987)根据野外观察认为隐爆角砾岩筒属火山管道相和火山口相。李昌年等(2001)根据角砾岩中含有大量辉石角砾和单斜辉石俘虏晶而认为其并非金伯利岩,实为角砾云母橄辉岩,确定晚期脉岩与角砾云母橄辉岩为同期岩浆活动的产物并均发生在层状岩体固结之后;且该区晚期岩脉分

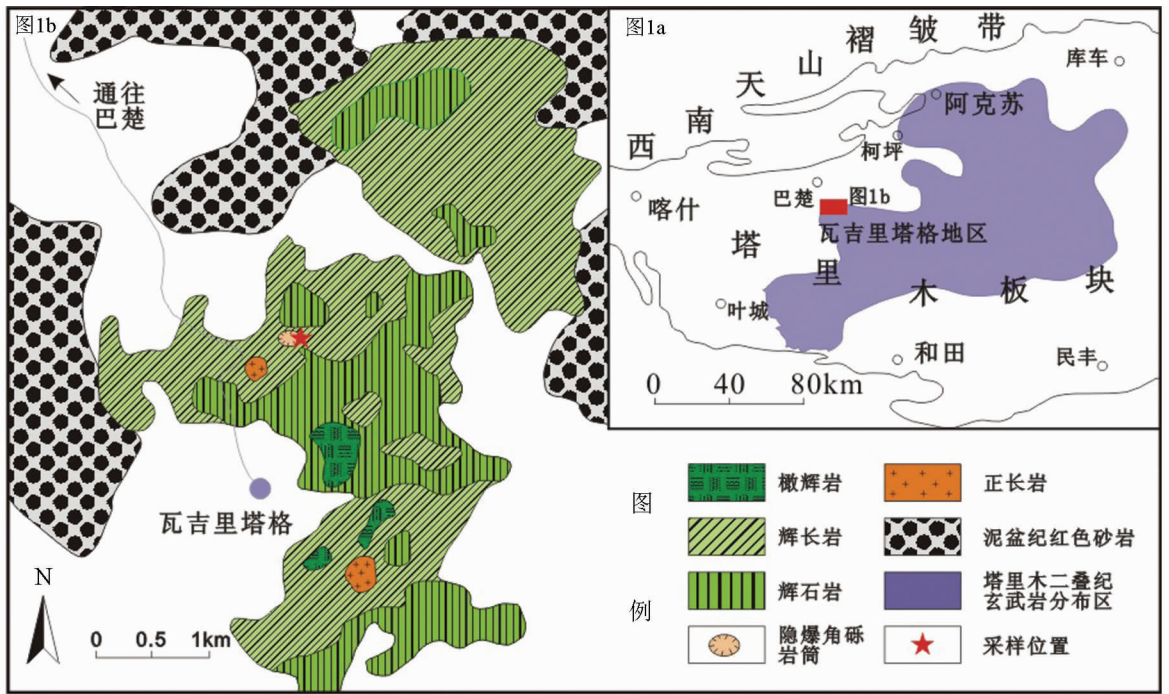


图1 瓦吉里塔格地区大地构造位置(a)及区域地质略图(b) (据 Zhang *et al.*, 2008 修改)

Fig.1 Geotectonic distribution of the Wajilitag area (a) and its geological sketched map (b) (after Zhang *et al.*, 2008)

布范围较广,在层状岩体内部及其周围围绕层状岩体呈放射状排列。姜常义等(2004b)根据岩石地球化学研究认为隐爆角砾岩中的角砾和胶结物是同源岩浆的产物,结合 Sr-Nd-Pb 同位素研究认为这些隐爆角砾岩很有可能源自于核-幔边界之上的 D”层。Zhang *et al.* (2008)认为巴楚地区的超基性杂岩富集大离子亲石元素且具有正的全岩  $\epsilon_{Nd}(t)$  值(0.25 ~ 2.8)和  $\epsilon_{Hf}(t)$  值(5.8 ~ 8.9)以及较低的 $^{87}Sr/^{86}Sr$  初始比值(0.7035 ~ 0.7045)的特征暗示其可能来源于类似 OIB 成分的地幔物质(如软流圈地幔)。鲍佩声等(2009)通过研究发现瓦吉里塔格隐爆角砾岩具有与典型金伯利岩相似的元素地球化学特征,但缺失部分金伯利岩标型矿物,指示其源区地幔深度较浅。同位素年代学资料表明瓦吉里塔格杂岩体中层状岩体的岩石及造岩矿物 Sm-Nd 同位素比值确定的等时线年龄为 306Ma,利用隐爆角砾岩筒内金云母 Ar-Ar 坪年龄方法测定该岩石形成于 252.7Ma,而晚期岩脉形成年龄约在 231Ma(李昌年等,2001),目前据以上有限的同位素年龄数据表明该杂岩体形成年龄介于 306 ~ 231Ma 之间。

### 3 隐爆角砾岩的岩相学特征

隐爆角砾岩由角砾和胶结物两部分组成。其中角砾小者几毫米,大者可达数十厘米,其形态从棱角状、次棱角状到次圆状。角砾成分主要为纯橄辉岩、单辉橄辉岩、橄辉辉石岩、单斜辉石岩等,这些岩石均具有全晶质中粗粒结构、块状构造,且没有显示塑性变形。胶结物为火山熔岩,具斑状结

构,斑晶主要为橄榄石和单斜辉石,其次为金云母及角闪石,而基质呈显晶质结构,主要矿物有橄榄石、辉石及金云母等。在角砾和胶结物中还可可见磷灰石、磁铁矿、钛铁矿、铬铁矿、钙钛矿、锆石和尖晶石等副矿物。此外,前人还在隐爆角砾岩中发现了刚玉、金红石、镁铝榴石、锐钛矿和碳硅石(王懿圣和苏犁,1990)。

本次研究主要从瓦吉里塔格隐爆角砾岩筒中挑选新鲜的、未见明显的变质或蚀变的隐爆角砾岩样品进行 PGE 及主、微量元素分析测试。由于在切割样品时角砾与胶结物不易完全分开,鉴于前人的研究认为角砾和胶结物是同源岩浆的产物,因此在此将两者放在一起考虑。在挑选和切割样品时排除粒径巨大的角砾,尽量挑选角砾粒径适中且与胶结物含量相近、混合均匀的岩石样品进行全岩分析。此外,为了对比研究角砾与胶结物在地球化学特征上的差别,将样品 wjl5-7 中的角砾(对应样品号为 wjl5-7a)与胶结物(对应样品号为 wjl5-7b)分离,分别进行相关 PGE 和地球化学测试。

### 4 实验分析方法及分析结果

本次分析测试皆在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学与地球化学重点实验室完成。

#### 4.1 全岩主、微量元素的分析方法

主量元素分析:取大约 2g 粉末样品(<200 目)在 100℃ 的烘箱内烘烤 3h 后,保存在干燥器中备用。准确称取 1.3 ~

1.5g 样品于瓷坩埚中,低温放入马弗炉中,待温度升至 900℃,计时 60min 后取出。冷却后移入干燥器中 3~4h,再称重。称灼烧过的样品 0.5000g 和  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  熔剂 4.0000g 于塑料杯中,混匀。加 1%  $\text{LiBr}$ -0.5%  $\text{NH}_4\text{I}$  助熔剂 0.4g 于铂金坩埚中,再倒入混合样品,1250℃ 熔融,制成玻璃饼。测试仪器采用日本 Rigaku(理学)ZSX 100-e 型 X-荧光光谱仪,分析精度优于 5% (Goto and Tatsumi, 1994)。

微量元素分析:准确称取烘干样品 0.04g,以顺序先后加 0.6mL 1:1  $\text{HNO}_3$ 、0.6mL  $\text{HF}$ 、0.3mL  $\text{HClO}_4$ , 超声震荡 60min,然后置于电热板上,100℃ 加热保温 2~3d 后,130℃ 蒸干。再加 0.8mL 1:1  $\text{HNO}_3$ ,加盖,100℃ 加热保温过夜后,加 0.8mL  $\text{HF}$  和 0.3mL 3N  $\text{HClO}_4$ ,密封,并转移于不锈钢钢套中,于 190℃ 烘箱内加热 48h。开盖,蒸至近干,加 4mL 4N  $\text{HNO}_3$ ,加盖,并超声震荡 30min 后密封,再转移于不锈钢钢套中,于 170℃ 烘箱内加热 4h,趁热以 3%  $\text{HNO}_3$  稀释,并按 2000 倍稀释倍数定容于塑料瓶中。称 4g 上述溶液和 4g  $20 \times 10^{-9}$  Rh(0.1%  $\text{HNO}_3$  介质)内标溶液于塑料试管中并摇匀。测试仪器采用 PE Elan 6000 型 ICP-MS 仪器,仪器工作参数及分析精度见刘颖等(1996)。瓦吉里塔格隐爆角砾岩的主、微量元素分析结果见表 1。

#### 4.2 PGE 实验分析方法

PGE 分析采用铀试金富集技术,测试仪器为 PE Elan 6000 型 ICP-MS,样品制备详细流程见孙亚莉(2007)。其过程简述如下:15g 样品(200 目),与 40g  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 、2.5g Fe 粉,1.0g Ni 粉,1.0g 硫磺在锥形瓶中混匀后,转入粘土坩埚中,并加适量  $^{190}\text{Os}$  稀释剂,表面再覆盖一层  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  粉末。将粘土坩埚置于 1050℃ 高温炉内熔融 45min,取出坩埚。空气中冷却后,敲碎坩埚,从底部取出试金扣,并置于盛 10mL  $\text{H}_2\text{O}$  的烧杯中。试金扣粉化后,加 30mL  $\text{HCl}$ ,加热溶解。溶液清亮后,过滤收集不溶残渣。残渣连同滤膜一起转移于 50mL 蒸馏瓶中,补加 3mL  $\text{HNO}_3$  后加热蒸馏 Os,蒸出的  $\text{OsO}_4$  用置于冰水浴中的 10mL  $\text{H}_2\text{O}$  吸收,该吸收液用于 Os 的测定。残留液制备成 10mL 2%  $\text{HNO}_3$  上机液,待 Ru、Rh、Pd、Ir、Pt 的测定。样品制备全化学流程空白为:Os  $1.5 \times 10^{-12}$ 、Ir  $1.5 \times 10^{-12}$ 、Ru  $5 \times 10^{-12}$ 、Rh  $1 \times 10^{-12}$ 、Pt  $15 \times 10^{-12}$ 、Pd  $30 \times 10^{-12}$ ;质量控制样为国家标准物质 GPT-4,其分析结果与推荐值吻合。瓦吉里塔格隐爆角砾岩的 PGE 分析结果见表 2。

#### 4.3 全岩主量元素、微量元素分析结果

主量元素特征:角砾岩全岩以及胶结物的  $\text{SiO}_2$  含量均非常低,为 29.54%~31.57%, $\text{MgO}$  和  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  以及  $\text{TiO}_2$  含量分别为 15.68%~19.98%、1.17%~2.58% 和 1.68%~2.23%。根据 IUGS 对高镁及苦橄质岩石的分类方案(Le Bas, 2000),其主要岩石类型应为麦美奇岩和苦橄岩,不过这种岩石定名仅是依据化学成分而确定的,并无特定的岩相学意义。而角砾(wjl5-7a)中  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  以及  $\text{TiO}_2$

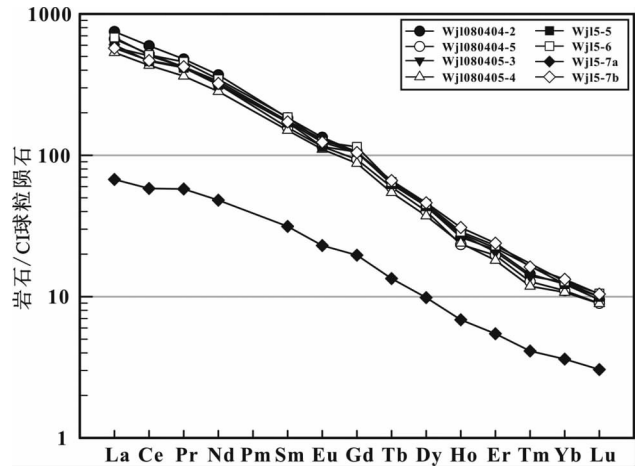


图 2 瓦吉里塔格隐爆角砾岩稀土元素 CI 球粒陨石标准化配分图(CI 球粒陨石值据 Taylor and McLennan, 1985) 样品 wjl5-7a 为角砾,wjl5-7b 为胶结物,其余样品为全岩,下同  
Fig. 2 CI chondrite-normalized REE pattern for Wajilitag cryptoexplosive brecciated rocks (the normalization values of CI chondrite from Taylor and McLennan, 1985)

The samples of wjl5-7a and wjl5-7b being from the breccia and matrix respectively and the others being from whole rock

含量分别为 41.86%、20.97%、1.67% 和 1.31%,主要为一些超基性岩包体(如单斜辉石岩、纯橄榄岩、橄榄辉石岩等),主量元素分析结果与显微镜下鉴定结果基本一致。因此从地球化学成分看,瓦吉里塔格隐爆角砾岩应属于苦橄质岩石。角砾岩的全岩烧失量较高( $\text{LOI} = 8.10 \sim 10.46$ ),这与角砾岩中含有较多的含水矿物(如角闪石、金云母等)有关。值得注意的是角砾岩全岩和胶结物均具有高  $\text{P}_2\text{O}_5$  的特征(2.27%~3.16%),而角砾中的  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量则比较低(0.38%),说明  $\text{P}_2\text{O}_5$  主要赋存于胶结物中。通过 CIPW 计算角砾岩中的磷灰石标准矿物含量在 5.56%~7.62%,显微镜下观察也显示胶结物中含有较多的磷灰石。此外,所有样品的  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ (全铁)含量为 11.38%~14.93%,属铁富集型。

微量和稀土元素特征:角砾岩全岩和胶结物的  $\Sigma \text{REE} = 964.1 \times 10^{-6} \sim 1299 \times 10^{-6}$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 45.88 \sim 64.90$ ,  $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 3.43 \sim 4.40$  和  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 8.09 \sim 9.17$ ,表现出稀土元素的高度富集,且轻、重稀土之间均有显著的分馏及强烈的轻稀土富集(图 2)。而角砾中的  $\Sigma \text{REE} = 146.3 \times 10^{-6}$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 19.81$ ,  $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 2.23$ ,  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 5.58$ ,明显低于角砾岩全岩和胶结物的稀土元素含量,不过其稀土分配曲线亦成轻稀土富集型。无论是角砾岩全岩、胶结物还是角砾,在原始地幔标准化微量元素蛛网图上均表现为大离子亲石元素的富集(图 3),曲线形态具有板内玄武岩的大隆起特征(姜常义等,2004b),同时表现出 Nb、Ta 的轻微亏损以及 Zr、Hf 的明显贫化。虽然角砾在微量及稀土元素含量方面明显低于胶结物,但是两者的曲线形态基本一致。

瓦吉里塔格隐爆角砾岩的主、微量元素分析结果表明全

表1 瓦吉里塔格隐爆角砾岩的主量元素 (wt%) 及微量元素 ( $\times 10^{-6}$ ) 分析结果

Table 1 Major (wt%) and trace ( $\times 10^{-6}$ ) elemental compositions of the Wajilitag cryptoexplosive brecciated rocks

样品号	wjl080404-2	wjl080404-5	wjl080405-3	wjl080405-4	wjl5-5	wjl5-6	wjl5-7a	wjl5-7b
岩石名称	隐爆角砾岩							
分析对象	全岩					角砾		胶结物
SiO <sub>2</sub>	29.78	29.56	29.54	30.07	31.57	—	41.86	31.25
TiO <sub>2</sub>	1.87	1.76	2.23	1.68	2.12	—	1.31	2.09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.59	3.68	4.23	3.76	4.28	—	3.56	4.32
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	13.89	13.51	14.93	12.96	13.41	—	11.38	12.80
MnO	0.23	0.21	0.22	0.20	0.19	—	0.16	0.20
MgO	19.98	19.69	15.96	18.65	15.68	—	20.97	16.69
CaO	17.11	17.00	19.85	18.68	20.06	—	14.99	18.93
Na <sub>2</sub> O	0.39	0.56	1.37	0.79	1.43	—	1.29	1.32
K <sub>2</sub> O	0.78	1.51	0.56	0.79	0.50	—	0.38	1.26
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.83	2.69	3.16	2.47	2.27	—	0.38	2.65
LOI	9.99	10.26	8.10	10.46	8.75	—	3.15	7.87
Total	100.43	100.44	100.15	100.50	100.25	—	99.43	99.38
Rb	14.80	33.39	12.54	20.22	8.43	11.51	8.89	30.05
Sr	2311	1977	2928	2057	2506	1182	713.7	1676
Y	67.19	62.95	63.29	56.03	74.00	75.22	13.82	62.83
Zr	471.2	448.0	412.9	340.4	453.0	461.6	104.7	412.5
Nb	162.7	140.5	128.1	112.7	111.1	117.1	14.71	123.6
Ba	858.1	1006	1109	1485	665.2	1135	321.5	3523
Hf	6.62	6.17	7.73	6.23	7.96	7.87	3.43	9.08
Ta	7.16	6.59	7.11	5.62	2.75	4.09	0.93	7.28
Pb	19.10	19.06	22.97	23.14	15.93	16.07	8.68	21.42
Th	31.69	28.60	23.94	22.95	23.26	24.89	2.40	23.57
U	8.39	7.48	7.80	6.22	8.04	9.40	0.68	7.68
La	277.5	246.2	214.1	197.4	223.4	252.2	24.97	212.0
Ce	571.6	499.2	485.7	415.8	444.3	491.9	55.94	449.4
Pr	67.12	59.01	59.12	50.86	58.31	64.16	8.09	59.22
Nd	263.1	225.2	237.1	200.7	223.9	244.9	34.19	228.9
Sm	42.32	36.14	40.31	34.55	39.31	42.72	7.22	39.64
Eu	12.06	10.37	11.69	9.93	10.36	11.19	2.07	11.14
Gd	32.73	29.00	32.37	27.22	32.76	35.53	6.10	32.41
Tb	3.91	3.57	3.80	3.27	3.74	3.88	0.81	3.97
Dy	16.53	15.29	16.64	14.16	16.57	17.18	3.74	17.53
Ho	2.37	2.10	2.47	2.15	2.52	2.59	0.62	2.77
Er	5.38	4.90	5.19	4.52	5.52	5.75	1.37	5.97
Tm	0.58	0.51	0.56	0.47	—	—	0.17	0.65
Yb	3.07	2.76	3.17	2.69	3.07	3.20	0.90	3.32
Lu	0.38	0.36	0.40	0.36	0.40	0.42	0.12	0.42
∑REE	1299	1135	1113	964.1	1064	1176	146.3	1067
(La/Yb) <sub>N</sub>	64.90	64.05	48.48	52.74	52.25	56.46	19.81	45.88
(La/Sm) <sub>N</sub>	4.23	4.40	3.43	3.69	3.67	3.81	2.23	3.45
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	8.83	8.70	8.45	8.39	8.84	9.17	5.58	8.09

注: Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup> 代表全铁 (FeO + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); 样品 wjl5-6 的主量元素含量未测

表2 瓦吉里塔格隐爆角砾岩的 PGE ( $\times 10^{-9}$ ) 及 Ni、Cu ( $\times 10^{-6}$ ) 元素含量及与世界其他地区超镁铁质岩 PGE 含量对比  
Table 2 PGE ( $\times 10^{-9}$ ) with Ni and Cu ( $\times 10^{-6}$ ) abundances of the Wajilitag cryptoexplosive brecciated rocks and comparison with other ultramafic rocks in the world

样品号	岩石类型	Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	Ni	Cu	Pd/Ir	Cu/Pd ( $\times 10^4$ )
Wjl080404-2		0.984	0.436	0.916	0.159	2.728	2.636	672.3	135.9	6.0	5.2
Wjl080404-5		0.781	0.279	0.554	0.119	1.884	1.989	613.3	133.7	7.1	6.7
Wjl080405-3	隐爆角砾岩(全岩)	0.559	0.295	0.416	0.167	3.155	3.515	441.8	187.4	11.9	5.3
Wjl080405-4		1.076	0.389	0.801	0.176	2.959	1.386	626.0	143.1	3.6	10.3
Wjl5-5		0.420	0.268	0.285	0.121	2.818	2.744	347.9	157.3	10.2	5.7
Wjl5-6		0.359	0.225	0.359	0.123	2.893	2.510	442.3	128.2	11.2	5.1
Wjl5-7a	隐爆角砾岩(角砾)	0.444	0.265	0.437	0.135	2.283	2.406	555.5	290.3	9.1	12.1
Wjl5-7b	隐爆角砾岩(胶结物)	0.368	0.227	0.366	0.114	2.100	2.183	405.0	169.0	9.6	7.7
瓦吉里塔格隐爆角砾岩平均值		0.62	0.30	0.52	0.14	2.60	2.42	513	168	8.1	6.9
夏威夷苦橄岩(10)		0.71	0.55	0.94	—	4.10	3.41	—	83.9	6.2	2.5
新疆哈密白石泉镁铁-超镁铁质岩(8)		0.59	0.44	1.21	0.41	5.46	6.50	1169	621	14.9	9.6
原始地幔		3.40	3.20	5.00	0.90	7.10	3.90	1960	30	1.2	0.8

注:夏威夷苦橄岩数据据 Bennett *et al.* (2000);新疆哈密白石泉镁铁-超镁铁质岩数据据柴凤梅等(2006);原始地幔值据 McDonough and Sun(1995),括弧内数字为分析的样品数

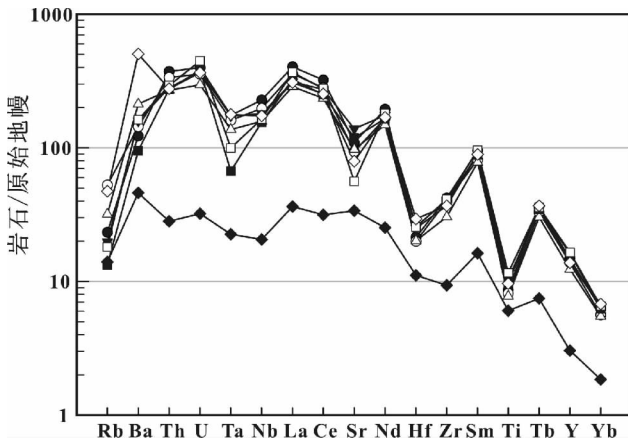


图3 瓦吉里塔格隐爆角砾岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(原始地幔标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.3 Primitive mantle normalized spidergram for the Wajilitag cryptoexplosive brecciated rocks (the normalization values of primitive mantle from Sun and McDonough, 1989)

岩主、微量元素的含量与胶结物(wjl5-7b)的较为接近,胶结物的化学成分对全岩成分有重要影响,而角砾的地球化学成分则主要反映了在岩浆侵位过程中被岩浆捕获的来自深部的超基性岩包体的特征。

#### 4.4 PGE 分析结果

瓦吉里塔格隐爆角砾岩中 Os、Ir、Ru、Rh、Pt 和 Pd 含量分别为  $0.36 \times 10^{-9} \sim 1.08 \times 10^{-9}$ 、 $0.23 \times 10^{-9} \sim 0.44 \times 10^{-9}$ 、

$0.29 \times 10^{-9} \sim 0.92 \times 10^{-9}$ 、 $0.11 \times 10^{-9} \sim 0.18 \times 10^{-9}$ 、 $1.88 \times 10^{-9} \sim 3.16 \times 10^{-9}$  和  $1.39 \times 10^{-9} \sim 3.52 \times 10^{-9}$ 。PGE 呈现一定程度的分异,Pd/Ir 比值在 3.6~11.9 之间,在 PGE 分配模式图上表现为正倾斜的曲线,并具有轻微的 Ir 亏损(图 4)。瓦吉里塔格隐爆角砾岩的 PGE 含量均低于原始地幔值,与夏威夷苦橄岩的 PGE 含量(Bennett *et al.*, 2000)较为接近,两者的 PGE 原始地幔标准化分配模式也较为相似(表 2 及图 4),具有非俯冲构造背景下产生的基性-超基性岩 PGE 配分特点(高洪林等,2001)。值得注意的是,尽管隐爆角砾岩中角砾和胶结物的微量和稀土元素含量有明显的差异,但是两者的 PGE 含量及分配模式却几乎一致(图 4),这一特征暗示它们可能是来自同一岩浆源区但属于不同岩浆演化阶段的产物。

## 5 讨论

### 5.1 瓦吉里塔格隐爆角砾岩的 PGE 特征对其岩浆源区特征的指示

目前对 PGE 的地球化学特征研究认为,PGE 各元素虽然化学性质相似,但也略有差别。Os、Ir、Ru、Rh、Pt、Pd 六种元素在硅酸质岩浆中的相容性是依次递减的(Naldrett, 1989; Fleet *et al.*, 1996)。根据 PGE 的相容性可将 Os、Ir、Ru 归为趋于相容的 Ir 组(IPGE),而 Rh、Pt、Pd 则可归为趋于不相容的 Pd 组(PPGE)(Naldrett *et al.*, 1979; 储雪蕾等, 2001)。一般来讲,典型的地幔橄榄岩捕虏体和阿尔卑斯型橄榄岩的 PGE 化学性质相对较稳定,经球粒陨石或原始地

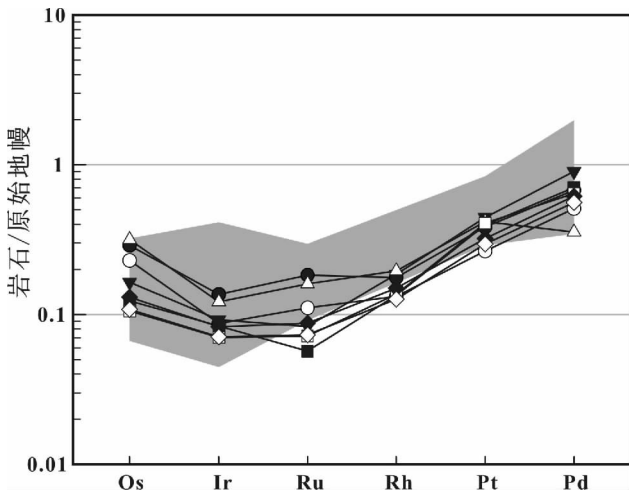


图4 瓦吉里塔格隐爆角砾岩 PGE 原始地幔标准化分配模式图(原始地幔标准化值据 McDonough and Sun, 1995) 图中阴影区为夏威夷苦橄岩的 PGE 分布范围(据 Bennett *et al.*, 2000)

Fig.4 Primitive mantle normalized PGE pattern for the Wajilitag cryptoexplosive brecciated rocks ( the normalization values of primitive mantle from McDonough and Sun, 1995) Shadow area showing the Hawaiian picrites (after Bennett *et al.*, 2000)

幔标准化后基本呈平坦、未分异的分配模式,而分异的岩浆 PGE 特征变化较大(许成等,2003)。目前认为在岩浆演化过程中造成 PGE 分异的机制主要有部分熔融和结晶分异以及硫化物熔离作用等(Barnes *et al.*, 1988;Bennett *et al.*, 2000;Crocket and Paul, 2008;Qi *et al.*, 2008)。由于 PGE 元素高度亲硫,它们的组成特征主要受到硫化物的控制(如柴凤梅等,2006;王生伟等,2007;Qi *et al.*, 2008)。硫过饱和的岩浆会发生硫化物熔离作用,使得 PGE 特别是 Os、Ir、Pt、Pd 四种元素的含量会随着硫化物熔离而大大降低(Fleet *et al.*, 1996),从而会影响残余岩浆中 PGE 的含量和分布特征。柴凤梅等(2006)根据新疆哈密白石泉二叠纪镁铁-超镁铁质岩体的铂族元素研究认为该岩体发生过饱和硫化物的熔离作用,并且认为原始岩浆的结晶分异是导致岩浆硫饱和及发生硫化物熔离的主要原因。王生伟等(2007)通过对比峨眉山大火成岩省中金山、白马寨以及杨柳坪三个铜镍硫化物矿床的 PGE 数据,认为峨眉山地幔柱形成铜镍铂族元素矿床可以分成硫的低饱和、硫的中度饱和以及硫的高度饱和三个阶段,表明 PGE 的富集程度与硫饱和度关系密切。所以岩浆是否出现过硫饱和应是探讨岩石 PGE 地球化学特征时首先要考虑的问题之一。

由于 PGE 在硫化物中的分配系数在  $10^4$  以上,而 Cu 在硫化物中的分配系数约在  $10^2$  左右,即 PGE 在硫化物中的分配系数大大高于 Cu(Crocket, 2002),因此在硫过饱和的岩浆中,随着硫化物的熔离,残余岩浆中的 Cu/Pd 比值会大大升

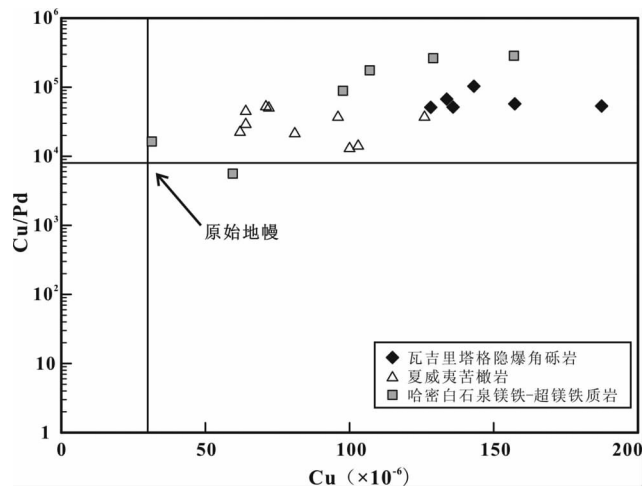


图5 瓦吉里塔格隐爆角砾岩全岩 Cu/Pd vs. Cu 关系并与夏威夷苦橄岩(来自硫不饱和岩浆)及哈密白石泉镁铁-超镁铁质岩(来自硫饱和岩浆)对比图

夏威夷苦橄岩数据据 Bennett *et al.* (2000),哈密白石泉镁铁-超镁铁质岩数据据柴凤梅等(2006)

Fig.5 Cu/Pd vs. Cu diagram for Wajilitag cryptoexplosive brecciated rocks (whole rock) and comparison with Hawaiian picrites (derived from S-unsaturated magma) and Baishiquan mafic-ultramafic rocks in Hami of East Tianshan Mts (derived from S-saturated magma)

The data of Hawaiian picrites are from Bennett *et al.* (2000) and of Baishiquan mafic-ultramafic rocks are from Chai *et al.* (2006)

高且变化较大,而在硫不饱和岩浆中的 Cu/Pd 比值应当与原始地幔的比值接近并且相对稳定。瓦吉里塔格隐爆角砾岩的 Cu/Pd 比值在  $5.1 \times 10^4 \sim 12.1 \times 10^4$ ,与夏威夷苦橄岩相似,略高于原始地幔的 Cu/Pd 比值(约  $0.8 \times 10^4$ )但是变化相对较小(图5)。如此相对稳定的 Cu/Pd 比值表明瓦吉里塔格隐爆角砾岩的母岩浆在上升侵位过程中并没有发生明显的硫化物熔离作用,因为 Cu 和 Pd 在硫不饱和岩浆体系中均表现为不相容元素(Bennett *et al.*, 2000;Qi *et al.*, 2008)。而瓦基里塔格隐爆角砾岩的 Cu/Pd 比值略高于原始地幔值以及岩石本身相对较低的 PGE 含量,暗示其岩浆源区在部分熔融过程中可能有少量残留的硫化物存在(Bennett *et al.*, 2000)。相比之下,位于新疆哈密的白石泉镁铁-超镁铁质岩(柴凤梅等,2006),其 Cu/Pd 比值不但比较高(约  $10^5$ ),而且变化较大(其变化范围在  $10^3 \sim 10^5$ ,图5),暗示其母岩浆经历过不同程度的饱和硫化物熔离。据此推测,瓦吉里塔格地区超镁铁质隐爆角砾岩的岩浆源区可能存在少量残留的硫化物,致使其 PGE 含量相对较低,但是岩浆在上升侵位过程中并没有发生明显的饱和硫化物熔离作用。

前人通过瓦吉里塔格地区隐爆角砾岩以及巴楚地区的基性-超基性杂岩主微量元素特征的研究均认为该地区岩石具有岩浆早期阶段橄榄石堆晶及结晶作用的特征(姜常义



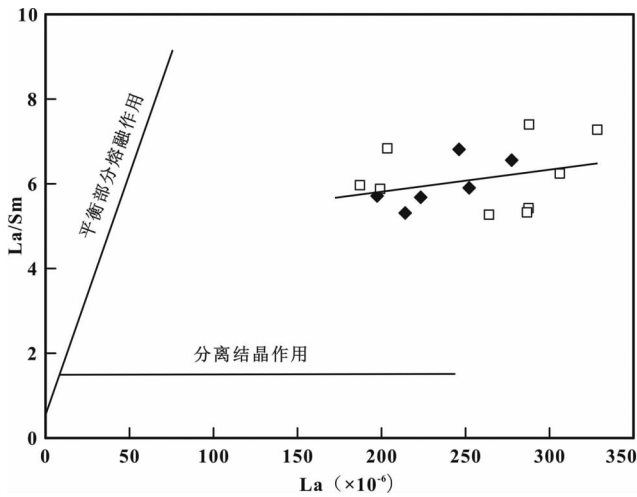


图6 瓦吉里塔格隐爆角砾岩全岩 La/Sm vs. La 关系图

◆-本文数据, □-姜常义等(2004b)和鲍佩声等(2009)

Fig. 6 La/Sm vs. La diagram for the Wajilitag cryptoexplosive brecciated rocks (whole rock)

◆-this study; □-being from Jiang *et al.* (2004b) and Bao *et al.* (2009)

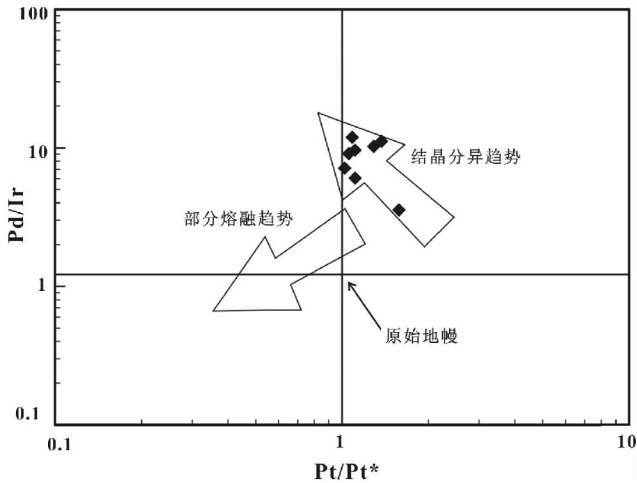


图7 瓦吉里塔格隐爆角砾岩的 Pd/Ir vs. Pt/Pt\* 关系图 (底图据 Garuti *et al.*, 1997)

Fig. 7 Pd/Ir vs. Pt/Pt\* diagram for the Wajilitag cryptoexplosive brecciated rocks (after Garuti *et al.*, 1997)

等, 2004b; Zhang *et al.*, 2008)。在 La/Sm 对 La 图解中, 瓦吉里塔格隐爆角砾岩成分显示一种近水平趋势 (图 6), 也指示其岩浆演化以分离结晶作用为主 (赵振华, 1997)。Garuti *et al.* (1997) 发现, 利用 Pd/Ir 与 Pt/Pt\* 之间的关系可以很好地地区分部分熔融和结晶分异, 即两者在地幔部分熔融的残留物中具有正相关关系, 而在岩浆结晶产物中则表现为负相关。瓦吉里塔格隐爆角砾岩 Pd/Ir 与 Pt/Pt\* 之间呈现出一定程度的负相关性 (图 7), 指示结晶分异作用应是 PGE 分异的主控

因素。MgO 的含量变化与橄榄石的结晶分异有直接关系 (Baker *et al.*, 1987), 而后者又同时比较容易赋存 Ir、Ru 等 IPGE 元素 (Gijbels *et al.*, 1974; Crocket and MacRae, 1986; Brüggmann *et al.*, 1987), 趋于相容的 IPGE 会随着橄榄石的结晶分异而离开熔体, 导致残余岩浆中的 Ir、Ru 等元素的含量减少, 而相对的 Pt、Pd 等元素的含量则会增加, 最终在 PGE 分配模式图上形成一条正倾斜的曲线。从 PGE vs. MgO 关系图 (图 8) 上可以看出, IPGE 元素与 MgO 基本上呈正相关, 而 PPGE 元素与 MgO 则略成负相关或无明显相关性, 这一特征说明 PGE 的分异受到了橄榄石结晶分异作用的影响。因此, 笔者认为橄榄石的结晶分异作用应该是造成瓦吉里塔格隐爆角砾岩 PGE 分异的主要原因, 同时 Ir 的轻微亏损也可能和岩浆结晶早期 Ir 和橄榄石发生共沉淀有关 (Keays *et al.*, 1981)。

## 5.2 瓦吉里塔格隐爆角砾岩的成岩构造环境探讨

瓦吉里塔格隐爆角砾岩的 PGE 特征暗示其应形成于非俯冲背景下的板内构造环境中, 与在塔里木盆地内部大量出露的二叠纪玄武岩及超基性岩脉的成岩构造环境相同 (姜常义等, 2004a; 陈汉林等, 2006; 杨树锋等, 2007; 厉子龙等, 2008; Zhang *et al.*, 2008)。尽管从时代上讲, 瓦吉里塔格隐爆角砾岩的形成时间 (~250Ma) 要略晚于塔里木二叠纪玄武岩的喷发时间 (~290Ma), 但是结合相关地球化学等资料认为其应为塔里木二叠纪大火成岩省的一部分。目前, 越来越多的学者通过研究认为塔里木二叠纪大火成岩省的形成与深部地幔柱活动有关 (Zhang *et al.*, 2008; 余星等, 2009; Zhou *et al.*, 2009; Pirajno *et al.*, 2009), 且与地幔柱活动有关的火成岩大多具有 Pd 大于 Pt 以及 Ru 负异常的特征 (陶琰等, 2004), 瓦吉里塔格隐爆角砾岩的 PGE 特征也为上述学者的推论提供了新的证据。姜常义等 (2004b) 的研究结果亦表明, 瓦吉里塔格隐爆角砾岩具有适度亏损的 Sr 和 Nd 同位素组成, 与一些洋岛玄武岩和地幔柱组分相近。不过鲍佩声等 (2009) 根据隐爆角砾岩中的包体矿物温压计估算其成岩深度仅为 150km, 指示其源地幔深度较浅。瓦吉里塔格所处巴楚地区在早一中二叠世是塔里木板块内岩墙群、侵入岩体最为发育的地区, 同时也是该时期塔里木板块内的沉积剥蚀区, 陈汉林等 (2006) 认为这是来自地球深部地幔柱源的岩浆上升导致塔里木板块地壳抬升的结果。据此推测, 瓦吉里塔格隐爆角砾岩的岩浆源区物质为较浅深度侵位的地幔组分, 可能是由于深部地幔上涌导致地壳抬升以及岩石圈伸展减薄的结果。

微量及稀土元素分析结果显示瓦吉里塔格隐爆角砾岩高度富集轻稀土元素及大离子亲石元素, 但该岩石同时又具有与 OIB 类似的 Sr-Nd 同位素组成 (姜常义等, 2004b), 且瓦吉里塔格杂岩体亦具有正  $\varepsilon_{Nd}(t)$  及  $\varepsilon_{Hf}(t)$  值 (Zhang *et al.*, 2008)。由于隐爆角砾岩中稀土元素总量明显高于正常的地壳物质, 因此造成该地区岩石富集稀土元素及大离子亲石元



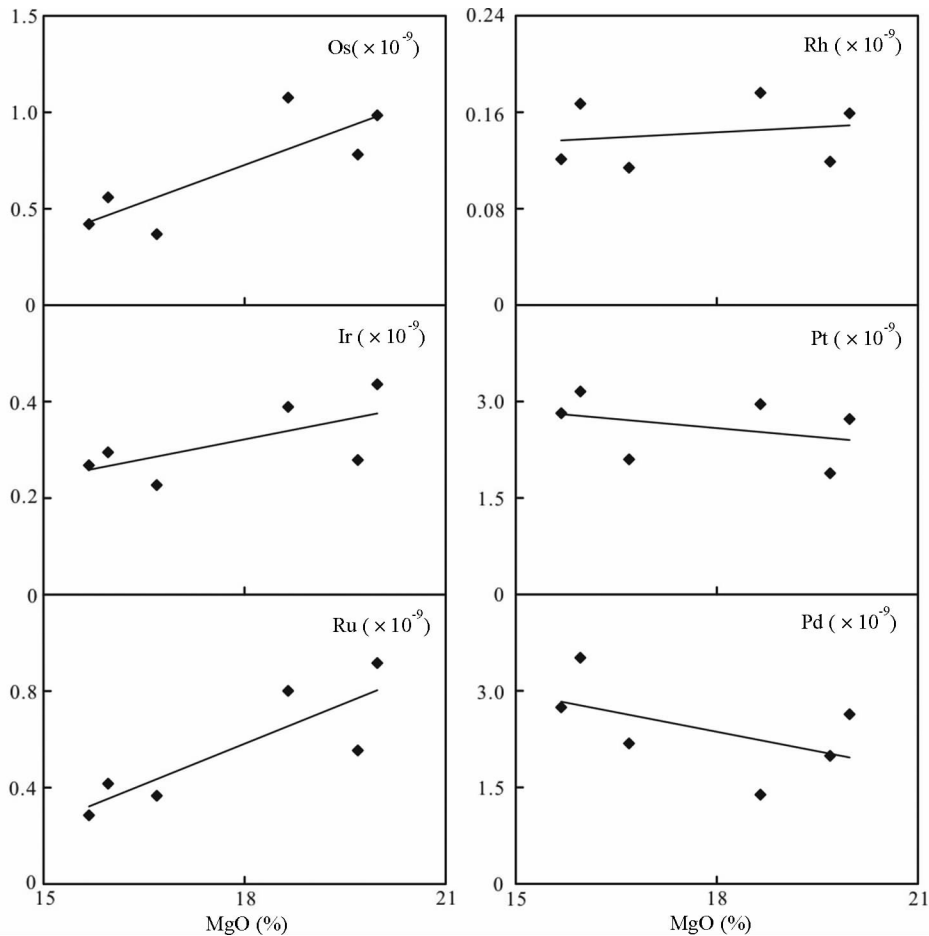


图8 瓦吉里塔格隐爆角砾岩全岩及胶结物的 PGE vs. MgO 关系图

Fig. 8 PGE vs. MgO diagram for Wajilitag cryptoexplosive brecciated rocks (whole rock and matrix)

素的原因应该和地壳混染无关 (Zhang *et al.*, 2008)。软流圈/地幔热柱岩浆在交代岩石圈地幔反应时会富集 REE 和其他不相容元素而相对亏损 HFSE (郑永飞, 1999), 瓦吉里塔格隐爆角砾岩在成岩过程中有可能受到了地幔交代作用的影响。金云母、角闪石等含水矿物在隐爆角砾岩中的出现也暗示交代作用的存在。隐爆角砾岩中胶结物与角砾具有明显不同的微量及稀土元素特征, 可能就是交代作用的结果; 前者因为交代作用而明显富集 REE 及 LILE, 而后者可能并没有受到交代作用的影响。尽管如此, 两者的 PGE 特征却没有明显的变化, 暗示交代作用在改变岩石的微量及稀土元素含量的同时, 对 PGE 的影响并不大。来自幔源的岩石通常具有包裹体和粒间硫化物两种不同的 PGE 存在形式 (许成等, 2003), 瓦吉里塔格隐爆角砾岩中的 PGE 可能主要赋存于禁锢在硅酸盐矿物内的硫化物包裹体中 (Alard *et al.*, 2000), 因为以包裹体形式存在的硫化物并不易受地幔交代作用的影响, 具有较为稳定的 PGE 特征。

## 6 结论

(1) 瓦吉里塔格隐爆角砾岩 PGE 含量均低于原始地幔,

其 PGE 分配模式呈正倾斜的分布曲线, 且与夏威夷苦橄岩相似, 具有非俯冲背景下产生的基性-超基性岩的 PGE 配分特点。隐爆角砾岩中角砾和胶结物之间的 PGE 含量及分配模式几乎一致, 暗示它们可能是来自同一岩浆源区的不同岩浆演化阶段的产物。

(2) 隐爆角砾岩全岩的 Cu/Pd 比值变化较小, 表明其岩浆在上升侵位过程中并没有发生明显的饱和硫化物熔离作用。但略高于原始地幔的 Cu/Pd 比值, 暗示其岩浆源区在部分熔融过程中可能有少量残留的硫化物存在。

(3) 隐爆角砾岩全岩的 IPGE 元素与 MgO 含量之间基本上呈正相关, 而 PPGE 元素与 MgO 含量之间则略成负相关或无明显相关性, 指示隐爆角砾岩的 PGE 分异主要受到了橄榄石的结晶分异作用控制。

(4) 瓦吉里塔格隐爆角砾岩高度富集稀土元素、富集大离子亲石元素和轻微亏损的 Nb 和 Ta 以及明显亏损的 Zr 和 Hf 的地球化学特征, 表明其在成岩过程中很可能受到地幔交代作用的影响。不过交代作用对 PGE 的影响并不大, 暗示 PGE 可能主要赋存于禁锢在硅酸盐矿物内的硫化物包裹体中。

**致谢** 本研究得到了中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室何平工程师、马金龙研究员、梁细荣研究员、涂湘林研究员、胡光黔工程师、孙彦敏高工、刘颖高工、曾文工程师等在元素分析方面给予的指导和支 持,两位匿名评审专家对本论文初稿提出了许多宝贵的修改意见,在此一并表示衷心感谢。

## References

- Alard O, Griffin WL, Lorand JP, Jackson SE and O'Reilly SY. 2000. Non-chondritic distribution of the highly siderophile elements in mantle sulphides. *Nature*, 407: 891–894
- Baker JA, Menzies MA, Thirlwall MF and MacPherson CG. 1997. Petrogenesis of Quaternary intraplate volcanism, Sana'a, Yemen: Implications for plume-lithosphere interaction and polybaric melt hybridization. *Journal of Petrology*, 38(10): 1359–1390
- Bao PS, Su L, Zhai QG and Xiao XC. 2009. Compositions of the kimberlitic brecciated peridotite in the Bachu area, Xinjiang and its ore-bearing potentialities. *Acta Geologica Sinica*, 83(9): 1276–1301 (in Chinese with English abstract)
- Barnes SJ, Naldrett AJ and Gorton MP. 1985. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas. *Chemical Geology*, 53: 303–323
- Barnes SJ and Naldrett AJ. 1987. Fractionation of platinum-group elements and gold in some komatiites of the Abitibi greenstone belt, northern Ontario. *Economic Geology*, 82: 165–183
- Barnes SJ, Boyd R, Korneliusson A, Nilsson LP, Often M, Pedersen RB and Robins B. 1988. The use of mantle normalization and metal ratios in discriminating between the effects of partial melting, crystal fractionation and sulphide segregation on platinum-group elements, gold, nickel and copper: Examples from Norway. In: Prichard HM, Potts PJ, Bowles JFW, Cribb SJ (eds.). *Geo-Platinum 87*. London: Elsevier, 113–143
- Bennett VC, Norman MD and Garcia MO. 2000. Rhenium and platinum group element abundances correlated with mantle source components in Hawaiian picrites: Sulphides in the plume. *Earth and Planetary Science Letters*, 183: 513–526
- Bézos A, Lorand JP, Humler E and Gros M. 2005. Platinum-group element systematics in Mid-Oceanic Ridge basaltic glasses from the Pacific, Atlantic, and Indian Oceans. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(10): 2613–2627
- Brüggemann GE, Arndt NT, Hofmann AW and Tobschall HJ. 1987. Noble metal abundances in komatiite suites from Alexo, Ontario, and Gorgona Island, Colombia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(8): 2159–2169
- Brüggemann GE, Naldrett AJ, Asif M, Lightfoot PC, Gorbachev NS and Fedorenko VA. 1993. Siderophile and chalcophile metals as tracers of the evolution of the Siberian Trap in the Noril'sk region, Russia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(9): 2001–2018
- Chai FM, Zhang ZC, Mao JW, Dong LH, Ye HS, Wu H and Mo XH. 2006. Platinum group elements geochemistry of Baishiquan mafic-ultramafic intrusives in central Tianshan Block, Xinjiang. *Acta Geoscientia Sinica*, 27(2): 123–128 (in Chinese with English abstract)
- Chai G and Naldrett AJ. 1992. Characteristics of Ni-Cu-PGE mineralization and genesis of the Jinchuan deposit, Northwest China. *Economic Geology*, 87: 1475–1495
- Chawde MP. 2001. Distribution of PGE in basic-ultramafic intrusives associated with continental flood basalt from a part of lower Narmada rift zone of Deccan volcanic province, India. *Geological Survey of India (Special Publication Series)*, 64: 579–583
- Chazey III WJ and Neal CR. 2005. Platinum-group element constraints on source composition and magma evolution of the Kerguelen Plateau using basalts from ODP Leg 183. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(19): 4685–4701
- Chen HL, Yang SF, Dong CW, Jia CZ, Wei GQ and Wang ZG. 1997a. Confirmation of Permian basite zone in Tarim basin and its tectonic significance. *Geochimica*, 26(6): 77–87 (in Chinese with English abstract)
- Chen HL, Yang SF, Dong CW, Zhu GQ, Jia CZ, Wei GQ and Wang ZG. 1997b. Research on geological thermal event of Tarim basin. *Chinese Science Bulletin*, 42(10): 1096–1099 (in Chinese)
- Chen HL, Yang SF, Wang QH, Luo JC, Jia CZ, Wei GQ, Li ZL, He GY and Hu AP. 2006. Sedimentary response to the Early-Mid Permian basaltic magmatism in the Tarim plate. *Geology in China*, 33(3): 545–552 (in Chinese with English abstract)
- Chu XL, Sun M and Zhou MF. 2001. The Platinum-group element geochemistry in chemical geodynamics. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 112–122 (in Chinese with English abstract)
- Crocket JH and MacRae WE. 1986. Platinum-group element distribution in komatiitic and tholeiitic volcanic rocks from Munro Township, Ontario. *Economic Geology*, 81: 1242–1251
- Crocket JH. 2002. Platinum-group elements in basalts from Maui, Hawai'i: Low abundances in alkali basalts. *The Canadian Mineralogist*, 40: 595–609
- Crocket JH and Paul DK. 2004. Platinum-group elements in Deccan mafic rocks: A comparison of suites differentiated by Ir content. *Chemical Geology*, 208: 273–291
- Crocket JH and Paul DK. 2008. Platinum-group elements in igneous rocks of the Kutch rift basin, NW India: Implications for relationships with the Deccan volcanic province. *Chemical Geology*, 248: 239–255
- Deng HL, Li CN, Qi L and Hu J. 2000. Preliminary study on Jinbaoshan PGE deposit in Yunnan Province. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 19(4): 333–336 (in Chinese)
- Fleet ME and Stone WE. 1991. Partition of platinum-group elements in the Fe-Ni-S system and their fractionation in nature. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(1): 245–253
- Fleet ME, Crocket JH and Stone WE. 1996. Partitioning of platinum-group elements (Os, Ir, Ru, Pt, Pd) and gold between sulfide liquid and basalt melt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(13): 2397–2412
- Gao HL, Mu ZG, Jin XD and Zhu HP. 2001. PEGs abundance patterns and its implications of carboniferous volcano zone to south and north of Turpan-Hami Basin, Xinjiang Uigur Autonomous Region. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 37(3): 385–393 (in Chinese with English abstract)
- Garuti G, Fershtater G, Bea F, Montero P, Pushkarev EV and Zaccarini F. 1997. Platinum-group elements as petrological indicators in mafic-ultramafic complexes of the central and southern Urals: Preliminary results. *Tectonophysics*, 276: 181–194
- Gijbels RH, Millard HT, Desborough GA and Bartel AJ. 1974. Osmium, ruthenium, iridium and uranium in silicates and chromite from the eastern Bushveld Complex, South Africa. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38(2): 319–337
- Goto A and Tatsumi Y. 1994. Quantitative analysis of rock samples by an X-ray fluorescence spectrometer. *The Rigaku Journal*, 11: 40–59
- Guan T, Huang ZL, Xie LH, Xu C and Li WB. 2004. Progresses on modes of occurrences of platinum-group elements in mantle derived rocks. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 23(1): 68–73 (in Chinese with English abstract)
- Handler MR and Bennett VC. 1999. Behaviour of platinum-group elements in the subcontinental mantle of eastern Australia during variable metasomatism and melt depletion. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(21): 3597–3618
- Jia CZ. 1997. *Tectonic Characteristics and Oil-Gas, Tarim Basin, China*. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese)
- Jiang CY, Zhang PB, Lu DR, Bai KY, Wang YP, Tang SH, Wang JH and Yang C. 2004a. Petrology, geochemistry and petrogenesis of the Kalpin basalts and their Nd, Sr and Pb isotopic compositions. *Geological Review*, 50(5): 492–500 (in Chinese with English abstract)
- Jiang CY, Zhang PB, Lu DR and Bai KY. 2004b. Petrogenesis and magma source of the ultramafic rocks at Wajilitag region, western Tarim Plate in Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1433–1444 (in Chinese with English abstract)
- Jiang CY, Li YZ, Zhang PB and Ye SF. 2006. Petrogenesis of Permian

- basalts on the western margin of the Tarim Basin, China. *Russian Geology and Geophysics*, 47(2): 232–241
- Jiang SY, Yang JH, Ling HF, Feng HZ, Chen YQ and Chen JH. 2003. Re-Os isotopes and PGE geochemistry of black shales and intercalated Ni-Mo polymetallic sulfide bed from the Lower Cambrian Niutiang Formation, South China. *Progress in Natural Science*, 13(10): 788–794
- Keays RR, Ross JR and Woolrich P. 1981. Precious metals in volcanic peridotite-associated nickel sulfide deposits in western Australia. II: Distribution within the ores and host rocks at Kambalda. *Economic Geology*, 76: 1645–1674
- Le Bas MJ. 2000. IUGS reclassification of the high-Mg and picritic volcanic rocks. *Journal of Petrology*, 41(10): 1467–1470
- Li CN, Lu FS and Chen MH. 2001. Research on petrology of the Wajilitag complex body in north edge in the Tarim Basin. *Xinjiang Geology*, 19(1): 38–42 (in Chinese with English abstract)
- Li Y, Su W, Kong P, Qian YX, Zhang KY, Zhang ML, Chen Y, Cai XY and You DH. 2007. Zircon U-Pb ages of the Early Permian magmatic rocks in the Tazhong-Bachu region, Tarim basin by LA-ICP-MS. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 1097–1107 (in Chinese with English abstract)
- Li ZL, Yang SF, Chen HL, Langmuir CH, Yu X, Lin XB and Li YQ. 2008. Chronology and geochemistry of Taxinan basalts from the Tarim; Evidence for Permian plume magmatism. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 959–970 (in Chinese with English abstract)
- Liu JF, Sun WD, Sun Y, Sun YL and Liu FJ. 2008. Geochemistry and platinum-group elements of ultramafic rocks from the Songshugou area in the eastern Qinling; Constraints on petrogenesis. *Geological Review*, 54(1): 57–64 (in Chinese with English abstract)
- Liu Q, Hou QL, Zhou XH and Xie LW. 2008. Platinum-group element geochemistry of Cretaceous mafic-ultramafic rocks in the northern Dabie. *Geology in China*, 35(5): 859–868 (in Chinese with English abstract)
- Liu Y, Liu HC and Li XH. 1996. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP-MS. *Geochimica*, 25(6): 552–558 (in Chinese with English abstract)
- Lorand JP. 1989. Abundance and distribution of Cu-Fe-Ni sulphides, sulphur, copper and platinum group elements in orogenic-type spinel peridotites of Ariege (northeastern Pyrenees, France). *Earth and Planetary Science Letters*, 93(1): 50–64
- Lorand JP, Luguët A and Alard O. 2008. Platinum-group elements; A new set of key tracers for the earth's interior. *Elements*, 4(4): 247–252
- McDonough WF and Sun SS. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120: 223–253
- Morgan JW. 1986. Ultramafic xenoliths; Clues to the Earth's late accretionary history. *Journal of Geophysical Research*, 91: 12375–12387
- Naldrett AJ, Hoffman EL, Green AH, Chou CL, Naldrett SR and Alcock RA. 1979. The composition of Ni-sulfide ores, with particular reference to their content of PGE and Au. *The Canadian Mineralogist*, 17: 403–415
- Naldrett AJ and Duke JM. 1980. Platinum metals magmatic sulfide ores. *Science*, 208(4451): 1417–1424
- Naldrett AJ. 1989. *Magmatic Sulfide Deposits*. New York: Oxford University Press
- Nian H, Shen W and Zhang XS. 2006. Preliminary study on the PGE geochemistry of the Permian basalts in the Jinping area. *Journal of China University of Geosciences*, 17(2): 132–137
- Pauling L. 1960. *The Nature of the Chemical Bond*. 3rd Edition. Ithaca: Cornell University Press
- Pirajno F, Ernst RE, Borisenko AS, Fedoseev G and Naumov EA. 2009. Intraplate magmatism in Central Asia and China and associated metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 35(2): 114–136
- Qi L, Wang CY and Zhou MF. 2008. Controls on the PGE distribution of Permian Emeishan alkaline and peralkaline volcanic rocks in Longhoushan, Sichuan Province, SW China. *Lithos*, 106: 222–236
- Song XY, Cao ZM, Luo FX, Zhu TG, Li YG and Chen JZ. 2004. Origin of Yangliuping Ni-Cu-PGE sulfide deposit in Danba, Sichuan. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 31(3): 256–266 (in Chinese with English abstract)
- Song XY, Keays RR, Zhou MF, Qi L, Ihlenfeld C and Xiao JF. 2009. Siderophile and chalcophile elemental constraints on the origin of the Jinchuan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, NW China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(2): 404–424
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. London: Geological Society Special Publication, 42: 313–345
- Sun XM, Wang SW, Shi GY and Xiong DX. 2008. Trace and platinum group elements (PGE) geochemistry of sulfide ores and related intrusive rocks from the Baimazhai Cu-Ni deposit in Yunnan Province, China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(3): 239–246 (in Chinese with English abstract)
- Sun YL. 2007. Study on determination of Platinum group elements by inductively coupled plasma-mass spectrometry combined with effective nickel sulfide fire assay. *Acta Mineralogica Sinica*, 27(Suppl. 1): 233–235 (in Chinese)
- Tao Y, Gao ZM, Luo TY and Qi JD. 2004. PGE in Jinbaoshan intrusion; Possible evidence of mantle plume origin. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 23(1): 28–31 (in Chinese with English abstract)
- Tao Y, Hu RZ, Qi L and Luo TY. 2007. Geochemical characteristics and metallogenesis of the Limahe mafic-ultramafic intrusion, Sichuan. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2785–2800 (in Chinese with English abstract)
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell
- Wang RT, Mao JW, He Y, Wang DS and Tang ZL. 2004. Geochemical characteristics of platinum group elements in Jinchuan super-large sulfide copper-nickel deposit, Jinchang City, Gansu Province, China. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(3): 279–286 (in Chinese with English abstract)
- Wang SW, Sun XM, Shi GY, Xiong DX and Zai W. 2007. Distinction of platinum group elements (PGE) geochemistry between the Jinbaoshan and Baimazhai magmatic sulfide deposits in Yunnan Province, China, and its implication for ore genesis. *Acta Geologica Sinica*, 81(1): 93–108 (in Chinese with English abstract)
- Wang YS and Su L. 1987. A discussion on petrological and mineralogical characteristics of kimberlitic rock in Bachu County, Xinjiang, China and a comparison with some other kimberlitic occurrences. *Periodical of Xi'an Geological Mineral Institute*, 15: 47–56 (in Chinese with English abstract)
- Wang YS and Su L. 1990. A discussion on compositional features and crystallization condition of phlogopite from kimberlite in mount Wajir, Bachu County, Xinjiang, China. *Periodical of Xi'an Geological Mineral Institute*, 28: 47–55 (in Chinese with English abstract)
- Weast RC, Astle MJ and Beyer WH. 1986. *Handbook of chemistry and physics*. 66th Edition. Boca Raton: CRC Press
- Xu C, Huang ZL, Liu CQ, Zhai SK, Li WB and Guan T. 2003. Review on geochemistry of platinum-group elements. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 520–528 (in Chinese with English abstract)
- Yang SF, Chen HL, Ji DW, Li ZL, Dong CW, Jia CZ and Wei GQ. 2005. Geological process of Early to Middle Permian magmatism in Tarim Basin and its geodynamic significance. *Geological Journal of China Universities*, 11(4): 504–511 (in Chinese with English abstract)
- Yang SF, Li ZL, Chen HL, Chen W and Yu X. 2006.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating of basalts from Tarim Basin, NW China and its implication to a Permian thermal tectonic event. *Journal of Zhejiang University (Science A)*, 7(Suppl. II): 320–324
- Yang SF, Li ZL, Chen HL, Santosh M, Dong CW and Yu X. 2007. Permian bimodal dyke of Tarim Basin, NW China: Geochemical characteristics and tectonic implications. *Gondwana Research*, 12(1): 113–120
- Yang SF, Yu X, Chen HL, Li ZL, Wang QH and Luo JC. 2007. Geochemical characteristics and petrogenesis of Permian Xiaohaizi ultrabasic dyke in Bachu area, Tarim basin. *Acta Petrologica Sinica*,

- 23(5): 1087–1096 (in Chinese with English abstract)
- Yu X, Chen HL, Yang SF, Li ZL, Wang QH, Lin XB, Xu Y and Luo JC. 2009. Geochemical features of Permian basalts in Tarim Basin and compared with Emeishan LIP. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1492–1498 (in Chinese with English abstract)
- Zhang CJ and Li XL. 1998. Geochemical characteristics of platinum group elements in Emeishan Basalts. *Acta Petrologica Sinica*, 14(3): 299–304 (in Chinese with English abstract)
- Zhang CL, Li XH, Li ZX, Ye HM and Li CN. 2008. A Permian layered intrusive complex in the western Tarim block, northwestern China: Product of a ca. 275 Ma mantle plume? *Journal of Geology*, 116(3): 269–287
- Zhao ZH. 1997. *Minor Elements Geochemistry Theory*. Beijing: Science Press, 37–42 (in Chinese)
- Zheng YF. 1999. *Chemical Geodynamics*. Beijing: Science Press. 262–283 (in Chinese)
- Zhong H, Zhu WG, Qi L, Zhou MF, Song XY and Zhang Y. 2006. PGE geochemistry of Emeishan basalts in Panxi area. *Chinese Science Bulletin*, 51(11): 1297–1304 (in Chinese)
- Zhou MF, Zhao JH, Jiang CY, Gao JF, Wang W and Yang SH. 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. *Lithos*, 113: 583–594

#### 附中文参考文献

- 鲍佩声, 苏犁, 翟庆国, 肖序常. 2009. 新疆巴楚地区金伯利质角砾橄辉岩物质组成及含矿性研究. *地质学报*, 83(9): 1276–1301
- 柴凤梅, 张招崇, 毛景文, 董连慧, 叶会寿, 吴华, 莫新华. 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. *地球学报*, 27(2): 123–128
- 陈汉林, 杨树锋, 董传万, 贾承造, 魏国齐, 汪振国. 1997a. 塔里木盆地二叠纪基性岩带的厘定及其大地构造意义. *地球化学*, 26(6): 77–87
- 陈汉林, 杨树锋, 董传万, 竺国强, 贾承造, 魏国齐, 汪振国. 1997b. 塔里木盆地地质热事件研究. *科学通报*, 42(10): 1096–1099
- 陈汉林, 杨树锋, 王清华, 罗俊成, 贾承造, 魏国齐, 厉子龙, 何光玉, 胡安平. 2006. 塔里木板块早-中二叠世玄武质岩浆作用的沉积响应. *中国地质*, 33(3): 545–552
- 储雪蕾, 孙敏, 周美夫. 2001. 化学地球动力学中的铂族元素地球化学. *岩石学报*, 17(1): 112–122
- 邓海琳, 李朝阳, 漆亮, 胡静. 2000. 云南金宝山铂族元素矿床初步研究. *矿物岩石地球化学通报*, 19(4): 333–336
- 高洪林, 穆治国, 靳新娣, 朱和平. 2001. 新疆吐哈盆地南北缘石炭纪火山岩铂族元素配分及其指示意义. *北京大学学报(自然科学版)*, 37(3): 385–393
- 管涛, 黄智龙, 谢力华, 许成, 李文博. 2004. 几种幔源岩石铂族元素赋存状态研究进展. *矿物岩石地球化学通报*, 23(1): 68–73
- 贾承造. 1997. *中国塔里木盆地构造特征与油气*. 北京: 石油工业出版社
- 姜常义, 张蓬勃, 卢登蓉, 白开寅, 王瑶培, 唐索寒, 王进辉, 杨淳. 2004a. 柯坪玄武岩的岩石学、地球化学、Nd、Sr、Pb 同位素组成与岩石成因. *地质论评*, 50(5): 492–500
- 姜常义, 张蓬勃, 卢登荣, 白开寅. 2004b. 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. *岩石学报*, 20(6): 1433–1444
- 李昌年, 路凤香, 陈美华. 2001. 巴楚瓦吉里塔格火成杂岩体岩石学研究. *新疆地质*, 19(1): 38–42
- 李勇, 苏文, 孔屏, 钱一雄, 张克银, 张明利, 陈跃, 蔡习尧, 尤东华. 2007. 塔里木盆地塔中-巴楚地区早二叠世岩浆岩的 LA-ICP-MS

- 锆石 U-Pb 年龄. *岩石学报*, 23(5): 1097–1107
- 厉子龙, 杨树锋, 陈汉林, Langmiur CH, 余星, 林秀彬, 励音骐. 2008. 塔西南玄武岩年代学和地球化学特征及其对二叠纪地幔柱岩浆演化的制约. *岩石学报*, 24(5): 959–970
- 刘军锋, 孙卫东, 孙勇, 孙亚莉, 刘方杰. 2008. 东秦岭松树沟超镁铁质岩体地球化学和铂族元素特征: 对成因的指示. *地质论评*, 54(1): 57–64
- 刘庆, 侯泉林, 周新华, 谢烈文. 2008. 北大别白垩纪镁铁-超镁铁岩的铂族元素地球化学研究. *中国地质*, 35(5): 859–868
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. *地球化学*, 25(6): 552–558
- 宋谢炎, 曹志敏, 罗辅勋, 朱廷国, 李佑国, 陈加忠. 2004. 四川丹巴杨柳坪铜镍铂族元素硫化物矿床成因初探. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 31(3): 256–266
- 孙晓明, 王生伟, 石贵勇, 熊德信. 2008. 云南白马寨 Cu-Ni 硫化物矿微量和铂族元素地球化学和矿床成因意义. *矿物岩石地球化学通报*, 27(3): 239–246
- 孙亚莉. 2007. 有效实用的铀试金富集等离子体质谱测定铂族元素方法研究. *矿物学报*, 27(增1): 233–235
- 陶琰, 高振敏, 罗泰义, 祁敬东. 2004. 金宝山岩体铂族元素特征及成因意义. *矿物岩石地球化学通报*, 23(1): 28–31
- 陶琰, 胡瑞忠, 漆亮, 罗泰义. 2007. 四川力马河镁铁-超镁铁质岩体的地球化学特征及成岩成矿分析. *岩石学报*, 23(11): 2785–2800
- 王瑞廷, 毛景文, 赫英, 王东生, 汤中立. 2004. 金川超大型铜镍硫化物矿床的铂族元素地球化学特征. *大地构造与成矿学*, 28(3): 279–286
- 王生伟, 孙晓明, 石贵勇, 熊德信, 翟伟. 2007. 云南金宝山和白马寨铜镍硫化物矿床铂族元素(PGE)地球化学的差异及其成因意义. *地质学报*, 81(1): 93–108
- 王懿圣, 苏犁. 1987. 新疆巴楚瓦吉里塔格“金伯利岩”岩石矿物特征及与某些相关地区对比. *西安地质矿产研究所所刊*, 15: 47–56
- 王懿圣, 苏犁. 1990. 新疆巴楚瓦吉里塔格金伯利岩中金云母成分特征及形成条件讨论. *西安地质矿产研究所所刊*, 28: 47–55
- 许成, 黄智龙, 刘从强, 翟世奎, 李文博, 管涛. 2003. 铂族元素地球化学研究评述. *地学前缘*, 10(4): 520–528
- 杨树锋, 陈汉林, 冀登武, 厉子龙, 董传万, 贾承造, 魏国齐. 2005. 塔里木盆地早-中二叠世岩浆作用过程及地球动力学意义. *高校地质学报*, 11(4): 504–511
- 杨树锋, 余星, 陈汉林, 厉子龙, 王清华, 罗俊成. 2007. 塔里木盆地巴楚小海子二叠纪超基性脉岩的地球化学特征及其成因探讨. *岩石学报*, 23(5): 1087–1096
- 余星, 陈汉林, 杨树锋, 厉子龙, 王清华, 林秀斌, 徐岩, 罗俊成. 2009. 塔里木盆地二叠纪玄武岩的地球化学特征及其与峨眉山大火成岩省的对比. *岩石学报*, 25(6): 1492–1498
- 张成江, 李晓林. 1998. 峨眉山玄武岩的铂族元素地球化学特征. *岩石学报*, 14(3): 299–304
- 赵振华. 1997. *微量元素地球化学原理*. 北京: 科学出版社, 37–42
- 郑永飞. 1999. *化学地球动力学*. 北京: 科学出版社, 262–283
- 钟宏, 朱维光, 漆亮, 周美夫, 宋谢炎, 张贻. 2006. 攀西地区峨眉山玄武岩的铂族元素地球化学特征. *科学通报*, 51(11): 1297–1304