



PGE 的地球化学性质及其分配系数的实验研究进展

喻 钢 杨晓勇

(中国科学院壳-幔物质与环境重点实验室, 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

摘 要: 随着现代化仪器的发展和分析方法的改进, 对 PGE 的分析技术已经取得突破。PGE 已经成为岩石学、矿床学和地球化学的一个重要研究领域。本文系统综述了 PGE 和 Au 元素的分配系数实验的研究进展, 区分和总结了适用于岩浆硫化物矿床的实验数据。根据此实验数据发现仅用硫化物液相不混溶模型难以解释岩浆硫化物矿床的高 PGE-Au 含量, 提出应该增加考虑岩浆后期的熔体或流体活动对 PGE-Au 元素的再富集过程。同时介绍一些关于 PGE 数据处理的常用方法及其应用。

关键词: 铂族元素; Au; 分配系数; 岩浆硫化物; 岩石成因

中图分类号: P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2007)01-0067-10

Geochemical characteristics of platinum-group elements and their laboratory partitioning determination

YU Gang and YANG Xiao-yong

(CAS Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environments, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: With the development of modern analysis, great breakthrough in PGE measurement has been achieved. Platinum group elements (PGEs) can now be regarded as one of the important fields in petrology, ore deposits and geochemistry. At present, the PGEs are becoming an increasingly important element group to trace the characteristics of geochemical processing. In this paper, the new data of laboratory partitioning of platinum-group elements and gold are summarized from literature abroad. The results of the controlled atmosphere experiments have yielded more S-rich sulfides, which seem to be the most appropriate laboratory data to be applied to magmatic sulfide-PGE deposits. It is also found that the sulfide liquid immiscibility model alone can not account for the apparently high concentration of PGE-Au in PGE-Au sulfide reef deposits based on these laboratory partitioning coefficients, suggesting the existence of extensive transformation and enrichment by either rock-melt process or rock-fluid process during the protracted post-accumulation and late magmatic history of large igneous bodies.

Key words: PGEs; gold; partitioning parameter; magmatic sulfide; petrologic genesis

1 概述

铂金属组元素(platinum-group element, 简称 PGE)包括 Ru、Rh、Pd、Os、Ir 和 Pt 共 6 个元素, 它们

多具有可变的化合价(+2、+3、+4), 离子半径从 0.62Å (Ru⁴⁺) 到 0.80Å (Pt²⁺), 熔点很高, 从最低 1552°C (Pd) 到最高的 3045°C (Os), 基本的物理化学性质见表 1。根据元素组合, PGE 可以分成 2 个亚组: Ir 亚组(简称 IPGE), 包括 Os、Ir 和 Ru 和 Pd

收稿日期: 2005-04-18; 修订日期: 2006-11-16

基金项目: 国家科技部 973 项目(2003CB214606)

作者简介: 喻 钢(1981-), 男, 博士研究生, 地球化学专业, 通讯作者: 杨晓勇, E-mail: xyang@ustc.edu.cn

亚组(简称 PPGE,包括 Rh、Pt 和 Pd)。贵金属 Au 和贱金属 Cu 及 Ni 由于和 PGE 地球化学性质有相似之处,且 Au 往往与 Pd 亚组相关,所以也经常同 PGE 放在一起投影做图来讨论地球化学问题。

表 1 铂金属组元素的化学性质(引自杨学明等,2000)

Table 1 Chemical properties of platinum-group elements (from Yang Xueming *et al.*, 2000)

元素	元素符号	原子序数	电荷	离子半径/Å	熔点/°C
钌	Ru	44	2+	0.74	2 310
			3+	0.68	
			4+	0.62	
铑	Rh	45	2+	0.72	1 966
			3+	0.66	
			4+	0.6	
钯	Pd	46	2+	0.86	1 552
			3+	0.76	
锇	Os	76	4+	0.615	3 045
			2+	0.74	
			4+	0.63	
铱	Ir	77	2+	0.74	2 410
			4+	0.68	
铂	Pt	78	2+	0.80	1 722
			4+	0.625	

原始地幔岩中的铂族元素和 Au 相对于 CI 球粒陨石(平均陨石)不存在分馏(Chou, 1978; Crocket, 1981),并在大多数高温地球化学过程中展现相似的地球化学特征,因此它们对于研究地球及宇宙早期历史及其演化(如 Kramar *et al.*, 2001; Hou *et al.*, 2004; Siebert *et al.*, 2005)地质历史时期的地学分界事件(Keller *et al.*, 2003; Kamo *et al.*, 2003; Glikson and Allen, 2004)地幔成因的超基性岩(Orberger *et al.*, 1998; Irvine *et al.*, 2003; Lorand *et al.*, 2003; Zhong *et al.*, 2003; Crocket and Paul, 2004; Zheng *et al.*, 2005)以及地幔演化和岩浆硫化物 PGE 矿床的起源非常有用,是极有研究潜力的一类微量元素(如 Puchtel *et al.*, 2004; Barnes, 2004; Büchl *et al.*, 2004; Distler *et al.*, 2004; Zhou *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2004; Hanley *et al.*, 2005; Maier, 2005)。PGE 的地球化学行为和 REE 有相似之处,在岩浆体系中各元素间具有分馏的特征,在不同的岩浆体系中,其分配系数也不相同,所以 PGE 可以作为一种有效地球化学示踪元素。铂组元素数据的表达方法与 REE 和不相容元素相同,分析检测的灵敏度通常按以下顺序递减:Ir>Au>Rh>Pd>

Pt>Os>Ru。PGE 在洋底玄武岩中的含量极低,其中有些元素低于分析检测限。过去,由于 PGE 的分析方法和测试精度有限,限制了其在地球化学和矿床学研究中的应用。在这种情况下,现代化测试手段的运用是很关键的一个环节(杨学明等, 2000; Hsu *et al.*, 2001; Dai *et al.*, 2001; Gros *et al.*, 2002; Barefoot, 2004; Meisel and Moser, 2004)。随着现代化的仪器的发展和分析方法的改进,对 PGE 的分析已经取得突破,常规的分析方法被高精度的分析仪器所代替,分析结果已接近真实(如 ICP-MASS 和 LA-ICP-MS),目前 PGE 已经成为岩石学、矿床学和地球化学的一个重要研究领域。同时由于 PGE 矿产具有巨大的经济价值,世界各国的经济地质学家也正积极探索和找寻此类经济矿床。

PGE 的分馏主要受控于它们在固相和熔体之间的分配,硫化物液体可能起关键的支配作用。了解和掌握 PGE 的分配系数,对于寻找岩浆型 PGE 矿产具有重要的指导意义。遗憾的是,许多矿物的 PGE 分配系数资料还不多。Campbell 等(1983)提出 Pt 和 Pd 在硫化物熔体与硅酸盐熔体之间的分配系数可能分别高达 160 000 和 120 000, Barnes 等(1985)提出 PGE 在硫化物/硅酸盐熔体间的分配系数的大小顺序是 Os>Ir>Ru>Rh>Pt>Pd。因此, PGE 的分馏可能用来判断熔体中硫的饱和程度。硫不饱和的玄武质熔体的极度分馏作用可能是由于 PGE 相容于橄榄石(Brugmann *et al.*, 1987),说明它们富集于地幔残留体或者分离结晶作用产生的分离矿物相之中。系统地开展 PGE 在硫化物/熔体之间分配系数的测定一直困扰着地球化学界。近十年来, PGE 分配系数的测定随着 PGE 测定精度的提高而完善,研究深度和广度都有了很大发展。本文重点对 PGE 和 Au 元素的分配系数实验进展做一综述,并介绍一些关于 PGE 数据处理的常用方法及数据应用。

2 PGE 分配系数的实验测定

多种多样的实验流程和分析技术已经应用于 PGE 和 Au 在(Fe, Ni)硫化物合金及硫饱和的玄武质熔体之间分配系数的实验测定(例如: Peach *et al.*, 1990, 1994; Stone *et al.*, 1990; Fleet and Stone, 1991; Bezmen *et al.*, 1991, 1994; Fleet *et al.*, 1991a, 1991b, 1993, 1996; Crocket *et al.*,

1992, 1997; Li *et al.*, 1996; Brenan *et al.*, 2003; Meisel and Moser, 2004; Peregoedova *et al.*, 2004)。PGE-Au 在(Fe, Ni)单硫化物固溶体(monosulfide solid solution, 简称 MSS)硫化物液相和富 Fe 富 PGE 合金中的分配系数的实验研究已很成熟,且已被不同的实验所重复。PGE-Au 在 MSS/富 S 硫化物液相中 1 000~1 040℃ 时的 $D_{\text{PGE-Au}}$ 为:Os(4.3), Ir(3.6), Ru(4.2), Rh(3.0), Pt(0.21), Pd(0.21), Au(0.09), 由此可见岩浆的分离结晶可在 MSS 中富集 Os、Ir、Ru 和 Rh, 而在残余液相中富集 Pt、Pd 和 Au(Fleet *et al.*, 1993; Barnes *et al.*, 1997)。然而在 FeS 结晶与富 Fe 硫化物液相平衡时所有 PGE 和 Au 一般都不相容的。对于 Os-Ir 合金/FeS 在 11GPa 时, $D_{\text{PGE-Au}}$ 为:Os(1 400), Ir(160), Pt(32), Ru(0.6), Rh(0.2) 和 Pd(0.04), 而对 Fe-Pt-Os 合金/硫化物液相在 8.5G Pa 时, $D_{\text{PGE-Au}}$ 为:Os(120), Ir(82), Pt(20), Ru(5.0), Rh(1.6) 和 Pd(0.1)(Fleet *et al.*, 1991b)。相同的矿物组合在 105Pa 下也有相似的分配系数(Fleet 和 Stone, 1990; Barnes *et al.*, 2004)。此外 Li 等(1996) Jana 和 Walker(1997)在 5.0 GPa 和 105Pa 下对于相似的液相和固相合金也分别获得了相似的结果。Jana 和 Walker(1997)研究表明,对于相容(亲金属)元素随着硫化物液相中 S 含量的减少其 D 值会有明显的降低。

然而对于硫化物液相和硅酸盐熔体体系,不同研究者的 PGE-Au 分配系数实验结果却出现了较大的差异范围($10^2 \sim 10^6$, 见表 2)。尽管 PGE-Au 在自然界的高温矿物组合中展现相近的地球化学特征,但它们在各种与硅酸盐熔体相关的实验中却表现得像 7 个不同的金属元素。Ru 是当中唯一具有可逆

分配行为的金属,其他元素的 D 值一般随实验时间增加而变大。这种变化的原因要么是由于金属化学状态在硅酸盐熔体中的系列变化,要么是由于合金相发生钝化现象。这一体系的分配系数主要有两套(Fleet *et al.*, 1996):①密封石英玻璃管中的实验,体系含有 0~17 mol% NiS,硫化物部分含有小于 100×10^{-6} 的 PGE-Au,实验温度为 1 300℃,时间为 0.5~2 h,得到的 D 值为: $D_{\text{Os}}=(3.7 \pm 1.3) \times 10^3$, $D_{\text{Ir}}=(3.2 \pm 1.1) \times 10^3$, $D_{\text{Ru}}=(4.4 \pm 2.4) \times 10^3$, $D_{\text{Pt}}=(4.6 \pm 0) \times 10^3$, $D_{\text{Pd}}=(5.0 \pm 1.8) \times 10^3$, $D_{\text{Au}}=(3.0 \pm 1.0) \times 10^3$;②不密封、对大气开放的实验,体系含有 36 mol% NiS,硫化物部分含有 $100 \times 10^{-6} \sim 1 000 \times 10^{-6}$ 的 PGE-Au,实验温度为 1 250℃,时间为 48 h(表 2),得到的 D 值为: $D_{\text{Os}}=(30 \pm 6) \times 10^3$, $D_{\text{Ir}}=(26 \pm 11) \times 10^3$, $D_{\text{Ru}}=(6.4 \pm 2.1) \times 10^3$, $D_{\text{Pt}}=(10 \pm 4) \times 10^3$, $D_{\text{Pd}}=(17 \pm 7) \times 10^3$ 。上述情况说明,氧逸度可能成为影响 PGE 分配系数的一个重要的外因。

2.1 应用密封石英管测定的分配系数

Fleet 等(1999)采用密封石英管测定了 Os、Ir、Ru、Pt、Pd 和 Au 在硫化物液相和硫饱和的硅酸盐熔体之间的分配系数。这些实验体系中的 Ni/(Fe + Ni)(摩尔比)变化范围为 0.02~0.75,结果硫化物部分 PGE 含量的测定值小于 60×10^{-6} ,而且根据实验,计算得出的含量与实验结果在分析误差范围内对应得非常好。只是 Os 含量有一些偏低。硫化物部分中的 Au 含量变化范围为 $0.1 \times 10^{-6} \sim 24 \times 10^{-6}$,其中高值($>1 \times 10^{-6}$)仅出现在某些可逆实验中,主要源于一些早期实验在初始硫化物中加入了 Au。实际测得的 $D_{\text{PGE-Au}}$ 值都几乎一致或稍低,平均值在 Ni/(Fe + Ni)(摩尔比)=0.02 时,约

表 2 硫化物液相/硅酸盐熔体体系中 PGE-Au 的分配系数

$\times 10^3$

Table 2 Partitioning parameters in sulfide liquid/silicate melt of PGE-Au

Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	Au	参考文献
	130			9.1	88		Stone 等(1990)
3.7	3.2			4.6	5.0	3.0	Fleet 等(1991a);Crocket 等(1992)
0.23	310	2.5	27	>1 000	55	16	Bezmen 等(1991,1994)
	25~54				43		Peach 等(1994)(使用 MORB 玻璃)
	130~1 520				12~78		Peach 等(1994)(使用合成的硅酸盐)
	35				34		Peach 等(1994)(使用值)
	15				35		Peach 等(1994)(MORB)
3.7	3.2	4.4		4.6	5.0	3.0	Fleet 等(1996)(使用值,密封的石英玻璃管实验)
30	26	6.4		10	17		Fleet 等(1996)(使用值,不密封、大气开放的实验)

为 2×10^3 ,而在 $Ni/(Fe + Ni)$ (摩尔比) = 0.61 时,约为 3×10^3 。4 个具有相似体系组成的可逆实验得到了相似的 D_{PGE-Au} ,而且 6 种贵金属元素的每一个在最后玻璃中的含量都比初始物质中含量低,因为早期的可逆实验中所有玻璃都不含有硫化物泡,因此可以使用直接测定的实验结果估算这些可逆反应中的初始 PGE-Au 含量。上述可逆实验结果都表明金属从硅酸盐熔体分配进入了硫化物熔体。

Fleet 等(1991a)、Crocket 等(1992)和 Fleet 等(1999)研究的密封石英管实验都在非常还原的条件下进行,并且由氧缓冲体系[具体是铁-方铁矿(IW)、铁-硅-铁橄榄石(IQF)和石墨-CO-CO₂

(CCO) 3 种],产生的硫化物液相是富金属的。如:Fleet 等(1991a)和 Crocket 等(1992)的实验产生的硫化物平均硫原子分数为 42.9%(CCO 缓冲,金属/S = 1.333)、46.0%(IQF 缓冲,金属/S = 1.173)或 46.8%(IW 缓冲,金属/S = 1.137),并且所有平均的 $Ni/(Ni + Fe)$ (摩尔比) = 0.15。而在 Fleet 等(1999)的实验中平均硫原子分数在 $Ni/(Ni + Fe)$ (摩尔比) = 0.02 时,为 46.4%(金属/S = 1.155);在 $Ni/(Ni + Fe)$ (摩尔比) = 0.55 时,为 44.1%(金属/S = 1.268);在 $Ni/(Ni + Fe)$ (摩尔比) = 0.74 时,为 44.0%(金属/S = 1.273),并得到了一致的 D_{PGE-Au} 值($1 \times 10^3 \sim 5 \times 10^3$, 图 1a)。

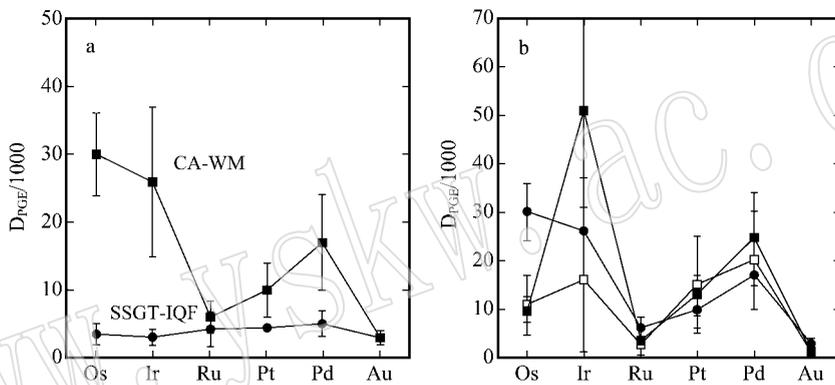


图 1 富硫化物液相实验中 PGE-Au 的差异分配图解

Fig. 1 Diagram showing different partitioning parameters in sulfide-rich liquid

a—不同的富硫化物流体中 PGE-Au 的分配系数对比, CA-WM 是在控制的大气中的测定结果, SSGT-IQF 是在密封石英管测定结果, IQF 作为缓冲体系; b—大气开放条件下 PGE-Au 的分配系数实验结果

a—comparison between differential partitioning coefficients with S-rich sulfide liquids, CA-WM refers to result obtained under controlled atmosphere, WM under oxygen buffer; SSGT-IQF under sealed silica glass tube, and IQF under oxygen buffer; b—differential partitioning of PGE-Au for experiments under open atmosphere

目前所有文献都指出,即使在不同实验中,主量元素、贱金属、S 甚至 O 都能相对快速地达到平衡,特别对于密封的石英管实验,因为那些实验初始物质已预先经过了混合。这一点也已被所有贵金属在富 Fe 和富 Ni 硫化物液相中的可逆实验结果所支持。Fleet 等(1999)的实验清楚地说明在密封石英管实验中, PGE-Au 和 Ni 能在玄武质熔体中沿化学势梯度自由转移。相反在 Fleet 等(1996)的开放大气实验中仅有 Ru 具有良好的可逆分配行为。

2.2 对大气开放的分配系数测定实验结果

Fleet 等(1996)和 Crocket 等(1997)的实验使用方铁矿-磁铁矿(wustite-magnetite, WM)的氧缓冲体系, $\log f_{S_2}$ 约为 -1.0, f_{O_2} 和 f_{S_2} 由 CO 和 SO₂ 的

混合气体控制,且 WM 缓冲体系的存在使硫化物和硅酸盐的初始比例仅有较小的变化。这些实验的平均(S+O)原子分数在 $Ni/(Ni + Fe)$ (摩尔比) = 0.18 时,为 55.2%;在 $Ni/(Ni + Fe)$ (摩尔比) = 0.036 时,为 53.5%;在 $Ni/(Ni + Fe)$ (摩尔比) = 0.66 时,为 49.1%。可见在开放的大气条件下,实验所产生的是富硫的硫化物液相,实验测得 PGE-Au 分配系数之间有相当大的差异(图 1b),即 D_{Os} 、 D_{Ir} 和 D_{Pd} 相当高,而 D_{Ru} 和 D_{Au} 的测定值低至 1 000, D_{Pt} 为中等大小。

由此,人们对密封石英管实验和大气开放实验中 PGE-Au 分配系数差别很大有了合理的解释。早期的产生富集金属硫化物液相的实验得到一致的

PGE-Au 分配系数, 适于应用于地球历史早期的研究。一般来说, 这种 PGE-Au 在玄武质熔体中具有一致的分配系数以及高的溶解度, 这可能归因于还原态的贵金属元素与 S 及还原态的 Ni、Fe 等形成复杂的化合物, 因为实验结果显示, PGE 合金在含还原态 S 及 S 饱和的硅酸盐熔体中也有更大的溶解度。相反, 大气开放实验是在中等的还原(WM)条件下进行, 并且生成富集硫的硫化物液相, 如 Naldrett (1989) 总结大多数生成富集硫的硫化物液相实验具有的硫的质量分数为 38%~40% (氧校正后)。因此, 尽管大气开放实验的 PGE-Au 分配系数实验数据之间有较大差异, 但它却适合应用于岩浆硫化物 PGE 矿床的研究。

3 硫化物中 PGE 含量及其分配系数研究

镍-铜硫化物-PGE 矿床一般认为是由玄武岩或超基性岩岩浆在早期岩浆分离阶段分离出的不混融的硫化物液相形成(如 Naldrett, 1989)。PGE 脉状矿床的硫化物液相不混熔模型可通过测定硫化物和硅酸盐部分的组成及利用实验岩石学得出的分配系数来检验。

PGE 和 Au 强烈富集于岩浆硫化物和 PGE 硫化物矿石中, 富集程度与相关的母岩浆中镁铁/超镁铁比值有关, 也与假定的母岩浆和硫化物的含量成比例(von Gruenewaldt *et al.*, 1989; Naldrett, 1989; Sassani and Shock, 1998)。块状硫化物和 PGE 硫化物矿石的 PGE-Au 含量(Naldrett, 1989)被重新计算(以镁铁和超镁铁岩作为背景值进行标准化)后投在图 2 上。因为 Bushveld 和 Stillwater 杂岩的母岩浆及岩浆块状硫化物的辉长岩母岩的 PGE-Au 含量难以确定, 本文使用大陆溢流玄武岩的平均和估计数据(表 3 中的 CFB*) 作为那些与镁铁-超镁铁岩有关的矿石中的 PGE-Au 丰度的标准化因子。来自 Langmuir 矿的块状硫化物的 PGE-Au 含量用贫硫化物的橄榄岩的 PGE-Au 平均值(表 3 的科马提岩)标准化。

整体来看, 实验得到的 $D_{\text{PGE-Au}}$ 值比直接形成于硫化物不混融液相的岩浆 PGE 硫化物矿体的 $D_{\text{PGE-Au}}$ 值低 1~2 数量级, 而比具有原始岩浆成分的 $D_{\text{PGE-Au}}$ 值高 1~2 数量级。所以图 2 中没有一个矿体的 PGE 曲线同实验得到的曲线具有一致的分布规律。因为根据富集硫的硫化物液相实验得到的

分配系数推算对母岩标准化后的原始岩浆硫化物的 PGE 曲线应该有 Ir 和 Pd 峰、Ru 和 Au 谷, 而不是像实际样品呈水平分布(或者在 Ru 出现峰)。研究发现 Bushveld 杂岩的边缘岩床在化学成分上是镁玄武质的(Davies and Tredoux, 1985), 并且比使用的大陆溢流玄武岩(表 5)具有较高的 Ru 和稍微高的 Ir 含量, 所以如果用它作为矿体 PGE 标准化的标准, 则脉状矿体标准化后的 PGE 曲线与实际分配系数之间的差异就会变小。

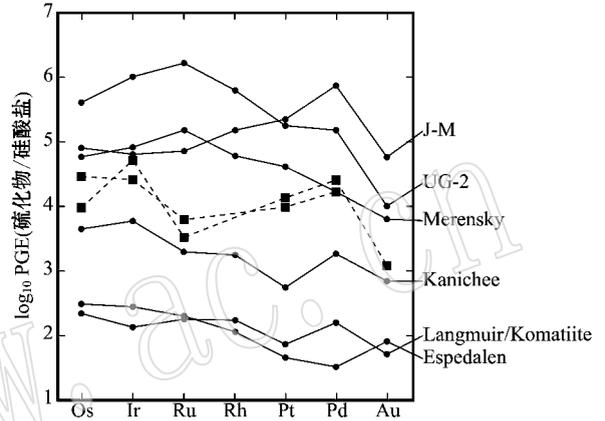


图 2 一些 PGE 岩浆硫化物矿床的 PGE-Au 丰度对大陆溢流玄武岩和科马提岩的标准化图解

Fig. 2 Diagram of normalized PGEs-Au of some magmatic sulfide ore deposits on the basis of continental basalts and komatiite

黑色方块是开放实验(硫富集硫化物液相)结果, UG-2、Merensky 和 J-M 是 Bushveld 和 Stillwater 杂岩中的含铂脉状矿体, Kanichee 和 Espedalen 分别是加拿大安大略湖 Abitibi 带中和挪威南部的与辉长岩相关的块状硫化物矿床, Langmuir 是加拿大安大略湖 Abitibi 带中与科马提岩有关的块状硫化物矿体(数据来源于 Naldrett, 1989)

The filled squares represent the average partitioning coefficients for open atmosphere experiments (S-rich sulfide liquids), UG-2, Merensky and J-M are platinum reefs in the Bushveld and Stillwater Complexes, Kanichee and Espedalen are massive sulfide deposits associated with gabbro in the Abitibi belt of Ontario, Canada and southern Norway, respectively, and the Langmuir mine is massive sulfide associated with komatiite in the Abitibi belt of Ontario, Canada (data from Naldrett, 1989)

4 PGE 数据的处理

可参照稀土元素的数据处理和做图原则对 PGE 数据进行处理和做图, 纵坐标值使用标准化后的对数坐标, 横坐标是元素排布, 一般顺序是 Os、Ir、Ru、

表 3 一些全岩的 PGE-Au 含量

 $\omega_B/10^{-9}$

Table 3 Contents of PGE-Au in some whole rocks

序号	岩石类型	Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	Au	样品说明及数据来源
1	OIB(Leg 115 ,ODP)		0.11	0.22	0.31	7.3	8.1	3.2	大洋热点 49 ,Greenough & Fryer(1990)
2	其他 OIB	0.087	0.34				1.59	1.73	大洋热点 30 至 59 ,Greenough & Fryer(1990)
3	CFB		0.092			6.9	7.4	3.5	大洋热点 49 至 107 ,Greenough & Fryer(1990)
4	CFB*	0.087	0.092	0.22	0.31	6.9	7.4	3.5	1、2 和 3 玄武岩数据的平均值
5	科马提岩	1.80	1.71	3.93	1.3	12.1	10.2	3.48	Fleet 等(1999)
6	Bushveld 岩床		0.35	3.0	1.4	17.0	12.0	3.05	Davies 和 Tredoux(1985)

OIB 指洋岛玄武岩 ,CFB 指大陆溢流玄武岩。

Rh、Pt、Pd 外加上元素 Au。表 4 列出了球粒陨石、原始地幔、富集地幔、太古宙地幔和平均地壳 5 类标准化值。从表中可以看出,不同文献所提供的数值略有差别。至于使用哪一套,主要取决于研究对象的不同。一般来讲,研究地幔超基性岩可以选择球粒陨石或原始地幔、富集地幔标准化值,研究地壳中的岩石可以采用平均地壳的标准化值,也可以统一地使用球粒陨石标准化值,但应注意,在对不同岩石(矿床)的 PGE 进行比较时,要使用同一套标准化值。

4.1 球粒陨石标准化

Naldrett 和 Duke(1980)的研究表明,对于 PGE 和 Au 含量的球粒陨石标准化图解,若按熔点降低(表 1)的顺序排列进行投影做图,能够获得与 REE 型式十分相似的光滑曲线。但是和 REE 相比,PGE 的亲性和并不密切,所以 PGE 不是按照它们在元素

周期表中由轻到重的次序排列,Ir 亚组和 Pd 亚组的地球化学行为也不相同。在地幔的部分熔融作用过程中,Ir 亚组倾向于相容元素,而 Pd 亚组倾向于不相容元素。在 PGE 含量极低的岩石中,只能测定 Au、Pd 和 Ir,球粒陨石标准化配分型式的斜率可由 Ir/Pd 比值来确定。但在这种情况下,Au 不能参与投图,因为它比 Pd 活泼,不能作为 PGE 配分型式的可靠指示元素。

和 REE 配分曲线的描述方法相似,可以把某体系的 PGE 相对于球粒陨石标准化曲线的亏损和富集定义为异常。但目前还没有充分的依据说明为什么这些元素在不同自然体系中会出现不同变化形式,从而构成不同的异常类型,前文有关 PGE 分配系数测定的实验和 Barnes & Naldrett(1986)的研究结果可以帮助人们认识这类元素在自然界的分布特征。

表 4 PGE 和贵金属以及共生的过渡金属元素的标准化数据

 $\omega_B/10^{-9}$

Table 4 Standard values for the normalization of PGEs and some transitional elements

元素	球粒陨石			原始地幔		富集地幔	太古宙地幔	平均地壳
	1	2	3	1	2			
Ni				2 110 000	2 110 000			89
Cu				28 000	28 000	28 000		63
IPGE								
Os	510	514	700	3.3	4.0~5.6			
Ir	510	540	500	3.6	3.5	4	3.4	
Ru		690	1 000	4.3				
PPGE								
Rh		200						0.06
Pt	1 060	1 020	1 500		7	7	7.5	0.4
Pd	510	545	1 200	4		4	5	0.4
Au	160	152	170	1	0.5	1	0.75~1.5	
Re	35				0.1			0.35
资料来源	1	2	3	4	5	6	7	8,9

1、7—Sur(1982) 2—Naldrett 和 Duke(1980) 3—Cochetie 等(1989) 4—Brugmann 等(1987) 5—Jagoutz 和 Palmé(1979) 6—Sun 等(1991) ; 8—Wedepohl(1995) 9—黎彤和倪守斌(1990)。

4.2 原始地幔标准化

Brugmann 等(1987)提出了 1 个原始地幔标准化 PGE(Pd、Ru、Ir、Os)-Au-Cu-Ni 图解,元素大体上按它们在地幔熔体中的不相容性增大而排序。正如表 4 所示,Brugmann 等(1987)的观察结果表明自从晚太古代以来上地幔中 PGE 的估计丰度基本没有变化。关于地幔 PGE 丰度的意义还存在一些争论,其变化范围为球粒陨石的 0.5%~1%,即地幔 PGE 丰度小于球粒陨石的 PGE 丰度 2 个数量级。另一方面,石榴石和尖晶石二辉橄榄岩包体呈现平的球粒陨石标准化 PGE 型式,说明地幔至少具有球粒陨石的 PGE 比值。

5 在岩浆硫化物-PGE 矿床研究中的应用

岩浆硫化物-PGE 矿床的硫化物矿物组合主要是磁黄铁矿+黄铜矿+镍黄铁矿±黄铁矿。如上所述,这些矿体的硫含量(质量分数)一般是 38%~40%(Naldrett, 1989)表明矿石具 S 富集特征。镁铁和超镁铁岩石的岩浆组成不能简单达到足够的还原环境,从而支持其产生富集金属的不混熔硫化物液相。一般传统观点把岩浆硫化物-PGE 矿床 PGE-Au 丰度的较大变化(达 4 个数量级)归因于 R 因子(硅酸盐与硫化物的质量比)对 PGE 进入不混熔硫化物液相时分配系数的影响(Campbell and Barnes, 1984)。因为当 $D_{\text{PGE-Au}}$ 非常大(10^5 或 10^6)时,有效控制金属富集的不是分配系数 D 而是 R 因子(如 Naldrett and Wilson, 1990),但适合的实验测得的 $D_{\text{PGE-Au}}$ 数据却明显低于 10^5 或 10^6 (Peach *et al.*, 1994; Fleet *et al.*, 1999)。因此, R 因子理论并不能直接解释块状硫化物脉状矿床具显著高的 PGE-Au 含量。假定低的早期硅酸盐/硫化物比值可使 R 因子模型解释块状硫化物矿体中的 PGE-Au 丰度的问题,但这种相当大量的硫化物却不能通过平衡条件下硫化物不混溶液相的分离直接形成。因此,假如一个 PGE 硫化物脉状矿床确定是形成于早期岩浆分离的硫化物不混溶液相,那根据已有的实验分配系数数据,一个额外的再活化和富集过程是必须的,例如,在像 Bushveld 和 Stillwater 杂岩一样的大火成岩体的堆积期后和岩浆晚期活动中的岩石和熔体或岩石和流体反应过程。现已有大量矿物组成和金属分带的证据支持在 PGE-硫化物矿体的母岩中存在岩浆晚期的富流体熔体或流体活动(Boudreau

and Meurer, 1997)。

由图 2 可知块状硫化物的标准化 PGE 曲线基本水平,脉状矿床的曲线大致水平,但 Bushveld 杂岩有 Ru 峰, Stillwater 杂岩有 Pd 峰。总的来说,所有这些岩浆矿石都相对于假定的硅酸盐碱地部分富集贵金属,但富集系数变化很大,从 Bushveld 和 Stillwater 杂岩的脉状矿体的高值($10^5 \sim 10^6$)到科马提岩型块状硫化物和许多辉长岩型块状硫化物的低值(约 10^2)。未封闭实验获得的分配系数(Fleet *et al.*, 1996; Crocket *et al.*, 1997)看来最适合用来比较实际标准化的样品,因为该实验产生的是富硫的硫化物不混溶液相,与矿石的富硫特征一致。然而实验数据与标准化的矿体数据并不十分吻合,实验获得的 D_{Ir} 和 D_{Pd} 同 PGE 硫化物脉状矿体的 D_{Ir} 和 D_{Pd} 近似,而 D_{Ru} 和 D_{Au} 同辉长岩相关的块状硫化物矿体的 D_{Ru} 和 D_{Au} 近似。Fleet 和 Wu(1995)的实验也说明 PGE-Au 在高温干(S-Cl)和湿(氢硫化物)流体中有很大的活动性。广泛的岩浆晚期硫化物再活化现象并不少见,它已被用来解释镁铁和超镁铁杂岩中所有变质条件不超过低级变质的岩浆硫化物矿体的 Ni 亏损特征(Fleet and Stone, 1990)极有可能矿体的形成是受几种因素的共同制约,如 PGE-Au 在堆积相(硫化物,铬铁矿和橄榄石等)形成时的原始富集和流体或不混熔硫化物液相的二次富集。但人们已认识到相当多的实验数据并不支持存在固相线下的流体对 PGE 的二次富集。另外,还应该考虑晚期岩浆硫饱和熔体的富集作用,因为它的存在已被 Bushveld 和 Stillwater 杂岩堆积后期的重熔和在其他层状镁铁和超镁铁岩中的渗透交代所证实(Irvine, 1980)。而不混熔硫化物液相对 PGE-Au 的二次富集主要是通过堆积相内部熔体的回流来实现的,其富集规律类似 R 因子,并不受硫化物液相与硅酸盐熔体的平衡分配控制。

6 结语

(1) 铂组元素已经成为岩石学、矿床学、地球化学的一个重要研究领域和有效的示踪元素, PGE 和 Au 元素的分配系数实验的研究,可以解释块状硫化物矿床的成因及其 PGE-Au 在相关矿体(地质体)中的丰度分布问题,这对于发现和找寻铂组元素和金矿床具有理论上的指导意义。

(2) 目前对铂组元素分配系数的理论和实验研

究还远远不够,需要开展相关的攻关研究,其研究成果可以深化对 PGEs 在岩浆作用中地球化学行为的认识,同时对岩浆作用过程也具有很好的地球化学示踪意义。

致谢 十分感谢陈江峰教授在成文过程中给予的热情鼓励和大力支持。

References

- Barefoot R R. 2004. Determination of platinum group elements and gold in geological materials: a review of recent magnetic sector and laser ablation applications [J]. *Analytica Chimica Acta*, 509 : 119~125.
- Barnes S J, Maier W D and Ashwal L D. 2004. Platinum-group element distribution in the Main Zone and Upper Zone of the Bushveld Complex, South Africa [J]. *Chem. Geol.*, 208 : 293~317.
- Barnes S J, Makovicky E, Makovicky M, *et al.* 1997. Partition coefficients for Ni, Cu, Pd, Pt, Rh and Ir between monosulfide solid solution and sulfide liquid and the formation of compositionally zoned Ni-Cu sulfide bodies by fractional crystallization of sulfide liquid [J]. *Can. J. Earth Sci.*, 34 : 366~374.
- Barnes S J and Naldrett A J. 1986. Variations in platinum group element concentrations in the Alexo mine komatitite, Abitibi greenstone belt, northern Ontario [J]. *Geol. Mag.*, 123 : 515~524.
- Barnes S J, Naldrett A J and Gorton M P. 1985. The origin of platinum-group elements in the terrestrial magmas [J]. *Chem. Geol.*, 53 : 303~323.
- Bezmen N I, Asif M, Brugmann G E, *et al.* 1994. Distribution of Pd, Ru, Rh, Ir, Os, and Au between sulfide and silicate melts [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58 : 1251~1260.
- Bezmen N I, Ye G, Brugmann G E and Naldrett A J. 1991. Mechanism of concentration of platinum-group elements: partitioning between silicate and sulfide melts [J]. *Int. Geol. Rev.*, 33 : 784~792.
- Boudreau A E and Meurer W P. 1997. Chromographic separation of the PGE, S and base metals during degassing of a compacting, solidifying crystal pile [J]. *EOS, Trans. AGU*, 78 : F801.
- 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 and Planetary Science Letter*, 212 : 135~150.
- Brugmann G E, Arndt N T, Hoffman A W *et al.* 1987. Noble metal abundance in komatitite suites from Alexo, Ontario and Gorgona Island, Colombia [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 51 : 2159~2169.
- Büchl A, Brüggemann G and Batanova V G. 2004. Formation of podiform chromitite deposits: implications from PGE abundances and Os isotopic compositions of chromites from the Troodos complex, Cyprus [J]. *Chem. Geol.*, 208 : 217~232.
- Campbell I H and Barnes S J. 1984. A model for the geochemistry of the platinum-group elements in magmatic sulfide deposits [J]. *Can. Mineral.*, 22 : 151~160.
- Campbell I H, Naldrett A J and Barnes S J. 1983. A model for origin of the platinum-rich sulfides horizons in the Bushveld and Stillwater complex [J]. *J. Petrol.*, 24 : 133~165.
- Chou C L. 1978. Fractionation of Siderophile Elements in the Earth's Upper Mantle [A]. *Proc. 9th Lunar Planet. Sci. Conf. [C]*, 219~230.
- Cochetie A, Auge T and Meyer G. 1989. Geochemistry of the platinum-group elements in various types of spinels from the Vourinos ophiolitic complex, Greece [J]. *Chem. Geol.*, 77 : 27~39.
- Crocket J H. 1981. Geochemistry of platinum-group elements [A]. *Cabri L J. Platinum-Group Elements: Mineralogy, Geology and Recovery [C]*. *CIM Spec.*, 23 : 47~64.
- Crocket J H, Fleet M E and Stone W E. 1992. Experimental partitioning of osmium, iridium and gold between basalt melt and sulfide liquid at 1300°C [J]. *Aust. J. Earth Sci.*, 39 : 427~432.
- Crocket J H, Fleet M E and Stone W E. 1997. Implications of composition for experimental partitioning of platinum-group elements and gold between sulfide liquid and basaltic melt: the significance of nickel content [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61 : 4139~4149.
- Crocket J H and Paul D K. 2004. Platinum-group elements in Deccan mafic rocks: a comparison of suites differentiated by Ir content [J]. *Chem. Geol.*, 208 : 273~291.
- Dai X, Koeberl C and Fröschl H. 2001. Determination of platinum group elements in impact breccias using neutron activation analysis and ultrasonic nebulization inductively coupled plasma mass spectrometry after anion exchange preconcentration [J]. *Analytica Chimica Acta*, 436 : 79~85.
- Davies G and Tredoux M. 1985. The platinum-group element and gold contents of the marginal rocks and sills of the Bushveld Complex [J]. *Econ. Geol.*, 80 : 838~848.
- Distler V V, Yudovskaya M A, Mitrofanov G L, *et al.* 2004. Geology, composition, and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia [J]. *Ore Geol. Rev.*, 24 : 7~44.
- Fleet M E, Chryssoulis S L, Stone W E, *et al.*, 1993. Partitioning of platinum-group elements and Au in the Fe-Ni-Cu-S system: experiments on the fractional crystallization of sulfide melt [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 115 : 36~44.
- Fleet M E, Crocket J H, Liu M and Stone W E. 1999. Laboratory partitioning of platinum-group elements (PGE) and gold with application to magmatic sulfide-PGE deposits [J]. *Lithos*, 47 : 127~142.
- Fleet M E, Crocket J H and Stone W E. 1991a. Partitioning of palladium, iridium, and platinum between sulfide liquid and basalt melt: effects of melt composition, concentration, and oxygen fugacity [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55 : 2545~2554.
- Fleet M E, Crocket J H and Stone W E. 1996. Partitioning of platinum-group elements Os, Ir, Ru, Pt, Pd and gold between sulfide liquid and basalt melt [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60 : 2397~2412.
- Fleet M E and Stone W E. 1990. Nickeliferous sulfides in xenoliths,

- olivine megacrysts and basaltic glass [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.* , 105 : 629~636.
- Fleet M E and Stone W E. 1991. Partitioning of platinum-group elements in the Fe-Ni-S system and their fractionation in nature [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , 55 : 245~253.
- Fleet M E, Trønnes R G and Stone W E. 1991b. Partitioning of platinum group elements in the Fe-O-S system to 11 GPa and their fractionation in the mantle and meteorites [J]. *J. Geophys. Res.* , 96 : 21 949~21 958.
- Fleet M E and Wu T W. 1995. Volatile transport of precious metals at 10008C : speciation , fractionation , and effect of basemetal sulfide [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , 59 : 487~495.
- Glikson A and Allen C. 2004. Iridium anomalies and fractionated siderophile element patterns in impact ejecta , Brockman Iron Formation , Hamersley Basin , Western Australia : evidence for a major asteroid impact in simatic crustal regions of the early Proterozoic earth [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.* , 220 : 247~264.
- Greenough J D and Fryer B J. 1990. Distribution of Au , Pd , Pt , Rh , Ru and Ir in ODP Leg 115 Indian Ocean hot-spot basalts : implications for magmatic processes [A]. Duncan R A , Back-man J , Peterson L C , *et al.* *Proc. Ocean Drilling Program , Scientific Results. Ocean Drilling Program , College Station , TX [C]* , 115 : 71~84.
- Gros M, Lorand J P and Luguet A. 2002. Analysis of platinum group elements and gold in geological materials using NiS fire assay and Te coprecipitation ; the NiS dissolution step revisited [J]. *Chem. Geol.* , 185 : 179~190.
- Hanley J J , Pettke Th , Mungall J E , *et al.* 2005. The solubility of platinum and gold in NaCl brines at 1.5 kbar , 600 to 800°C : A laser ablation ICP-MS pilot study of synthetic fluid inclusions [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , 69 : 2 593~2 611.
- Hou Q L , Kolesnikov E M , Xie L W , *et al.* 2004. Platinum group element abundances in a peat layer associated with the Tunguska event , further evidence for a cosmic origin [J]. *Planet. Space Sci.* , 52 : 331~340.
- Hsu W , Huss G R and Wasserburg G J. 2001. Ion probe measurements of Os , Ir , Pt , and Au in individual phases of iron meteorites [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , 64 : 1 133~1 147.
- Irvine T N. 1980. Magmatic infiltration metasomatism , doublediffusive fractional crystallization , and adcumulus growth in the Muskox intrusion and other layered intrusions [A]. Hargraves R B. *Physics of Magmatic Processes [C]*. Princeton University , NJ , 325~383.
- Irvine G J , Graham D , Kjarsgaard P B A. 2003. A Re-Os isotope and PGE study of kimberlite-derived peridotite xenoliths from Somerset Island and a comparison to the Slave and Kaapvaal craton [J]. *Lithos* , 71 : 461~488.
- Jagoutz E and Palme H. 1979. The abundances of major , minor and trace elements in the earth 's mantle as derived from primitive ultramafic nodules [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , (Sup. 11) : 2 031~2 050.
- Jana D and Walker D. 1997. The influence of sulfur on partitioning of siderophile elements [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , 61 : 5 255~5 277.
- Kamo S L , Czamanske G K , Amelin Y , *et al.* 2003. Rapid eruption of Siberian flood-volcanic rocks and evidence for coincidence with the Permian-Triassic boundary and mass extinction at 251 Ma [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.* , 214 : 75~91.
- Keller G , Stinnesbeck W , Adatte T , *et al.* 2003. Multiple impacts across the Cretaceous-Tertiary boundary [J]. *Earth-Sci. Rev.* , 62 : 327~363.
- Kramar U , Stüben D , Berner Z , *et al.* 2001. Are Ir anomalies sufficient and unique indicators for cosmic events ? [J]. *Planet. Space Sci.* , 49 : 831~837.
- Li C , Barnes S J , Makovicky E , *et al.* 1996. Partitioning of nickel , copper , iridium , rhenium , platinum , and palladium between monosulfide solid solution and sulfide liquid : effects of composition and temperature [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , 60 : 1 231~1 238.
- Li Tong and Ni Shoubin. 1976. *The Element Abundances of the Crust and Earth [M]*. Beijing : Geol. Publ. House (in Chinese).
- Liu B G , Luo Y N , Zhou M F , *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]. *Chem. Geol.* , 209 : 233~257.
- Lorand J P , Reisberg L and Bedini R M. 2003. Platinum-group elements and melt percolation processes in Sidamo spinel peridotite xenoliths , Ethiopia , East African Rif [J]. *Chem. Geol.* , 96 : 57~75.
- Maier W D. 2005. Platinum-group element (PGE) deposits and occurrences : Mineralization styles , genetic concepts , and exploration criteria [J]. *J. Afr. Earth Sci.* , 41 : 165~191.
- Meisel T and Moser J. 2004. Reference materials for geochemical PGE analysis : new analytical data for Ru , Rh , Pd , Os , Ir , Pt and Re by isotope dilution ICP-MS in 11 geological reference materials [J]. *Chem. Geol.* , 208 : 319~338.
- Naldrett A J. 1989. *Magmatic Sulfide Deposits. Oxford Monographs on Geology and Geophysics [M]*. New York : No. 14. Clarendon Press , 186.
- Naldrett A J and Duke J M. 1980. Platinum metals in magmatic sulfide ores [J]. *Science* , 208 : 1 417~1 427.
- Naldrett A J and Wilson A H. 1990. Horizontal and vertical variations in noble-metal distribution in the Great Dyke of Zimbabwe : a model for the origin of the PGE mineralization by fractional segregation of sulfide [J]. *Chem. Geol.* , 88 : 279~300.
- Orberger B , Xu Y and Reeves S J. 1998. Platinum group elements in mantle xenoliths from eastern China [J]. *Tectonophysics* , 296 : 87~101.
- Peach C L , Mathez E A and Keays R R. 1990. Sulfide melt-silicate melt distribution coefficients for noble metals and other chalcophile elements as deduced from MORB : implications for partial melting [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , 54 : 3 379~3 399.
- Peach C L , Mathez E A , Keays R R *et al.* 1994. Experimentally determined sulfide melt-silicate melt partition coefficients for iridium and

- palladium [J]. *Chem. Geol.* , 117 : 361 ~ 377.
- Peregoedova A , Barnes S J and Baker D R. 2004. The formation of Pt-Ir alloys and Cu-Pd-rich sulfide melts by partial desulfurization of Fe-Ni-Cu sulfides : results of experiments and implications for natural systems [J]. *Chem. Geol.* , 208 : 247 ~ 264.
- Puchtel I S , Humayun M , Campbell A J , *et al.* 2004. Platinum group element geochemistry of komatiites from the Alexo and Pyke Hill areas , Ontario , Canada [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , 68 : 1 361 ~ 1 383.
- Sassani D C and Shock E L. 1998. Solubility and transport of platinum-group elements in supercritical fluids : summary and estimates of thermodynamic properties for ruthenium , rhodium , palladium , and platinum solids , aqueous ions , and complexes to 1 000°C and 5 kbar [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , 62 : 2 643 ~ 2 671.
- Siebert C , Kramers J D , Meisel Th , *et al.* 2005. PGE , Re-Os , and Mo isotope systematics in Archean and early Proterozoic sedimentary systems as proxies for redox conditions of the early Earth [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , 69 : 1 787 ~ 1 801.
- Stone W E. Crocket J H and Fleet M E , 1990. Partitioning of palladium , iridium , platinum , and gold between sulfide liquid and basalt melt at 1 200°C [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , 54 : 2 341 ~ 2 344.
- Sun S S. 1982. Chemical composition and origin of earth's primitive mantle [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , 46 : 179 ~ 182.
- Sun S S , Wallance D A and Glikson H D M. 1991. Chemical composition and origin of earth's primitive mantle [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , 46 : 179 ~ 182.
- von Gruenewaldt G , Hullbert L J and Naldrett A J. 1989. Contrasting platinum-group element concentration patterns in cumulates of the Bushveld Complex [J]. *Mineral. Deposita* , 24 : 219 ~ 229.
- Wedepohl K H. 1995. The composition of the continental crust [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , 59 : 1 217 ~ 1 232.
- Yang Xueming , Yang Xiaoyong and Chen Shuangxi. 2000. *Petrochemistry* [M]. Hefei : Publishing House of University of Science and Technology of China (in Chinese).
- Zheng J , Sun M , Zhou M F and Robinson P. 2005. Trace elemental and PGE geochemical constraints of Mesozoic and Cenozoic peridotitic xenoliths on lithospheric evolution of the North China Craton [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , 69 : 3 401 ~ 3 418.
- Zhong H , Yao Y , Prevec S A , *et al.* 2003. Trace-element and Sr-Nd isotopic geochemistry of the PGE-bearing Xinjie layered intrusion in SW China [J]. *Chem. Geol.* , 203 : 237 ~ 252.
- Zhou M F , Lesher 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]. *Chem. Geol.* , 209 : 233 ~ 257.

附中文参考文献

- 黎 彤 ,倪守斌. 1990. 地球的化学元素丰度 [M]. 北京地质出版社.
- 杨学明 ,杨晓勇 ,陈双喜. 2000. 岩石地球化学(译著) [M]. 合肥 : 中国科学技术大学出版社.

《岩石矿物学杂志》征订征稿启事

《岩石矿物学杂志》是由中国地质学会岩石学专业委员会、矿物学专业委员会、中国地质科学院地质研究所联合主办的学术性期刊,属地质类全国中文核心期刊,主要报道内容包括:岩石学领域的专题性或区域性岩浆岩、变质岩、沉积岩的岩类学、岩理学、实验岩石学、宇宙岩石学、工艺岩石学等方面的基础理论和应用研究成果;矿物学领域的描述矿物学、理论矿物学、材料矿物学、应用矿物学、宝玉石矿物学、环境矿物学、矿物药理学、矿相学、新矿物及矿物中包裹体等方面的研究成果;与岩石学、矿物学有关的边缘交叉学科中的构造岩石学、岩石大地构造学、岩石地球化学、同位素年代学、同位素地球化学、岩石成矿学、环境地质学、煤岩学、储层地质学等方面的创造性和综合性研究成果;岩石和矿物鉴定的新方法、新技术、新仪器;与岩石学和矿物学有关的最新地质科技信息、研究动态、研究简报、问题讨论、书刊简介、会议简讯等。现设有专题研究、问题讨论、综述与进展、学术争鸣、环境矿物学、宝玉石矿物学、综合资料、方法与应用、新书介绍、简讯等栏目。

《岩石矿物学杂志》为双月刊,逢单月 25 日出版,全年订价 150 元,邮发代号 82-52,热忱欢迎专业人士踊跃投稿,同时欢迎新老读者继续订阅本刊。如误时漏订,请直接与本刊编辑部联系。

地址:北京西城区百万庄 26 号中国地质科学院地质所《岩石矿物学杂志》编辑部,邮编:100037;电话:010-68328475;E-mail:yskwzazhi@sohu.com。