

·综述与进展·

斑岩型铜矿床中铂族元素的研究现状与存在问题

王敏芳 邓晓东 李占轲 毕诗健

(中国地质大学资源学院,湖北 武汉 430074)

摘要: 铂族元素的研究在过去几十年取得了重要的进展。铂族元素可以赋存于不同的岩石类型中,形成于不同的时代。由于铂族元素具有特殊的化学性质,比较稳定且难溶于普通的酸、碱等,故铂族元素成矿具有特殊性。作为一种非常规铂族元素矿化类型,富铂族元素的斑岩型铜矿床的研究对研究铂族元素从地幔岩石圈转移进入花岗岩质岩石及随后从熔体进入流体并在硫化物中富集的机理,具有重要的研究意义。本文从斑岩型铜矿床中铂族元素的分布特征、矿化特征、铂族矿物特征、流体包裹体特征和富集成矿机理方面论述了斑岩型铜矿床中铂族元素的研究现状,并指出目前斑岩型铜矿床中铂族元素研究存在的主要问题,如影响斑岩型铜矿中铂族元素含量高低的影响因素不明确,富PGE斑岩型铜矿中流体包裹体研究不够系统,PGE的富集机理研究还欠深入,并指出今后我国斑岩型铜矿中PGE研究的重点,指出长江中下游地区一系列斑岩型铜矿床是我国斑岩铜矿中铂族元素研究的有利地区。

关键词: 铂族元素 斑岩型铜矿床 铂族矿物 影响因素 流体包裹体 富集机理

中图分类号: P618.53

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2010)01-0100-09

Current situation and existing problems in the study of platinum group elements in porphyry copper deposits

WANG Min-fang, DENG Xiao-dong, LI Zhan-ke and BI Shi-jian

(Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The study of platinum group elements has made important achievements in recent decades. PGE can be hosted in different types of rocks formed in different epochs. The ore-forming condition of PGE is also quite special due to their particular chemical characteristics such as stable chemical behaviors and refractory of common acid and alkali solutions. PGE mineralization in porphyry copper deposits belongs to one of the unconventional PGE mineralizations and is significant for the understanding of the problem how PGE were transported from lithosphere to granite and then concentrated in sulfides. This paper describes the current status of the study of PGE in porphyry copper deposits in the following five aspects: PGE distribution, PGE mineralization, platinum group minerals, fluid inclusions, and enrichment mechanism. The main existing problems in PGE study for porphyry copper deposits, such as unclear influencing factors on PGE distribution, inadequate systematic study of fluid inclusions, insufficient researches on the enrichment mechanism of PGE in porphyry copper deposits, are also discussed. The emphatic points in the study of PGE in porphyry copper deposits are pointed out, and it is further suggested that the series of porphyry copper deposits in the middle and lower Yangtze region are potential

收稿日期: 2009-04-01; 修订日期: 2009-05-13

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(40902026); 中国地质大学(武汉)优秀青年教师资助计划(CUGQNL0735); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CUG090102)

作者简介: 王敏芳(1980-), 女, 讲师, 博士, 从事矿床学研究, E-mail: wang-minfang@163.com。

areas for the study of PGE in porphyry copper deposits in China. Mutschler *et al.* first described PGE content of Cordilleran alkaline suite porphyries containing copper and precious metals. Later, elevated PGE content was reported by Eliopoulos *et al.* based on a PGE content analysis of samples from different alteration zones. Then, much research work on PGE concentration in porphyry copper deposits has been done. A comparison of porphyry copper deposits in different tectonic environments made by Tarkian *et al.* shows that the porphyry Cu deposits of the island arc type have higher Pd and Pt content than those of the continental margin type. However, some other scientists hold that the PGE content is only related to the sulfide content of the porphyry Cu deposits and has no relation to the geological age, chemical composition of the intrusives and types of magma. So, what are the true factors which affect the PGE content in the porphyry copper deposits? According to a careful optical and microanalysis, the presence of the platinum group minerals (PGM) has been revealed by some researchers. Most of the PGM so far diagnosed in the porphyry copper deposits are tellurides, arsenides, bismuthides and, especially, merenskyite. Based on fluid inclusion study, it is considered that the mineralizing fluids seem to be high temperature and high salinity fluids in the porphyry Cu deposits, and Pd and Pt might have been transported as chloride complexes under suitable physicochemical conditions.

Key words: platinum group element; porphyry copper deposit; platinum group mineral; influencing factor; fluid inclusion; enrichment mechanism

铂族元素(PGE)位于元素周期表第八副族,包括钌(Ru)、铑(Rh)、钯(Pd)、锇(Os)、铱(Ir)、铂(Pt) 6种元素。铂族元素具有共同的物理性质,除了钨和钨为钢灰色外,其余均为银白色,熔点高,强度大,电热性稳定,抗电火花蚀耗性高,抗腐蚀性优良,高温抗氧化性能强,催化活性良好。正是由于这些特有的性质,使得铂族金属被广泛地应用于现代工业和尖端技术中,如汽车尾气净化、航空航天、电子、珠宝、化工、石油、陶瓷、玻璃装潢等领域。据 Johnson Matthey 2008年10月公布的最新分析报告显示,2007年铂市场供不应求,其中汽车、珠宝行业仍然延续2000年以后的发展态势,需求量大。我国铂族金属矿产资源比较贫乏,全国保有储量仅约310吨,工业储量23吨(耿林等,2007),不足世界储量的0.3%。铂矿日益提升的社会需求和科学体系发展的要求,使得研究、寻找和利用铂族元素成为一种必须。

1 铂族元素的主要矿化类型

铂族元素(PGE)具强烈的亲铁和亲硫性,自然界中主要以合金和硫化物形式存在,超过90%的PGE来自于岩浆成因的硫化物矿床(王生伟等,2006)。全球五大铂族元素矿床,南非Bushveld、俄罗斯Noril'sk-Talnakh、加拿大Sudbury、美国Stillwater和津巴布韦Great Dyke,都是与镁铁-超镁铁质层状侵入体或岩浆Cu-Ni硫化物相关的岩浆矿床,它

们提供了约96%~99%的世界产量,也代表了世界上主要的铂族元素矿床类型(Boudreau and McCallum, 1992; Barnes *et al.*, 2006; Holwell and McDonald, 2007; Naldrett *et al.*, 2008)。

Stribny等(2000)研究认为,铂族元素矿化可分为“常规PGE矿化”和“非常规PGE矿化”两种类型,前者包括富集于:①层状侵入体,如南非Bushveld矿床、美国Stillwater矿床、津巴布韦Great Dyke矿床等;②岩浆硫化物矿床,如俄罗斯Noril'sk-Talnakh,加拿大Sudbury,甘肃金川(朱文凤等,2000)等;③砂矿,大多产于哥伦比亚(Tolstykh *et al.*, 2002)和俄罗斯(Gornostayev *et al.*, 1999)的PGE矿化。后者包括了所有产于沉积岩和变质岩中的PGE矿化以及富集于岩浆岩中的非上述常规矿化类型的PGE矿化(Stribny *et al.*, 2000),具体如下:①斑岩铜矿中的PGE矿化,如希腊Skouries(Eliopoulos *et al.*, 1991; Economou-Eliopoulos and Eliopoulos, 2000, 2005a, 2005b),保加利亚Elatsite(Petrunov *et al.*, 1992; Eliopoulos *et al.*, 1995; von Quadt *et al.*, 2002; Kehayov *et al.*, 2003; Tarkian *et al.*, 2003; Auge *et al.*, 2005),菲律宾Santo Tomas II(Tarkian and Koopmann, 1995)等;②火山岩块状硫化物矿床(VMS)中的PGE矿化,如俄罗斯Uzelginsk(Vikentyev *et al.*, 2004),巴布亚新几内亚Satanic Mills矿区(Pašava *et al.*, 2004)等;③黑色页岩型PGE矿化,如俄罗斯Sukhoi Log

(Vikentyev *et al.*, 2004) 加泰罗尼亚 Llandoverian (Canet *et al.*, 2004) 和我国华南地区(孙晓明等, 2003; 王敏等, 2004) 等。

2 斑岩铜矿中铂族元素的研究现状

Mutschler 等(1985)最先报道北美科迪勒拉地区斑岩铜矿中 PGE 的富集。随后, Eliopoulos 等(1991)对希腊北部 Skouries 斑岩铜矿中的 PGE 和 Au 进行了相关研究, 分析了不同蚀变带样品中铂族元素的分布特征, 至此与斑岩铜矿相关的铂族元素的研究工作才陆续开展。我国许多大型斑岩铜矿中也存在着铂族元素的矿化, 如德兴斑岩铜矿矿石内铂族元素平均含量达 $3 \times 10^{-9} \sim 50 \times 10^{-9}$, 黑龙江多宝山斑岩铜矿已探明铂族元素储量 1 804 kg, 西藏江达县玉龙斑岩铜矿铂族元素远景储量 3.4 t (梁有彬等, 1997; 项仁杰等, 1999)。1989 年中国有色金

属工业总公司对长江中下游地区铁铜矿床进行了铂族元素查定工作, 发现在矿床局部地段的选冶产品中可出现 Pd 的富集, 并且含 Pt、Pd 特征及共生元素组合与富 PGE 的超基性岩矿床存在明显的差异, 如桃花咀铜铁金矿床、铁山铁铜矿床、铜绿山铜铁矿床、铜山口铜钼矿床、丰山铜钼矿床等(谷湘平等, 1993)。

世界上富 PGE 的代表性斑岩铜矿床有: 希腊 Skouries 矿床, 保加利亚 Elatsite 矿床、Medet 矿床, 菲律宾 Santo Tomas II 矿床、Biga 矿床, 马来西亚 Mamut 矿床, 塞尔维亚 Majdanpek 矿床、Bor 矿床, 巴布亚新几内亚 Ok Tedi、Panguna 矿床, 俄罗斯 Aksug 矿床、Sora 矿床、Zhireken 矿床和蒙古 Erdenetiun-Obo 矿床等(Tarkian and Stribny, 1999; Sotnikov *et al.*, 2001)(图 1)。此外, 还有一些分布于 British Columbia (Thompson *et al.*, 2001) 以及印度 (Auge *et al.*, 2005) 的斑岩铜矿中也富 PGE。

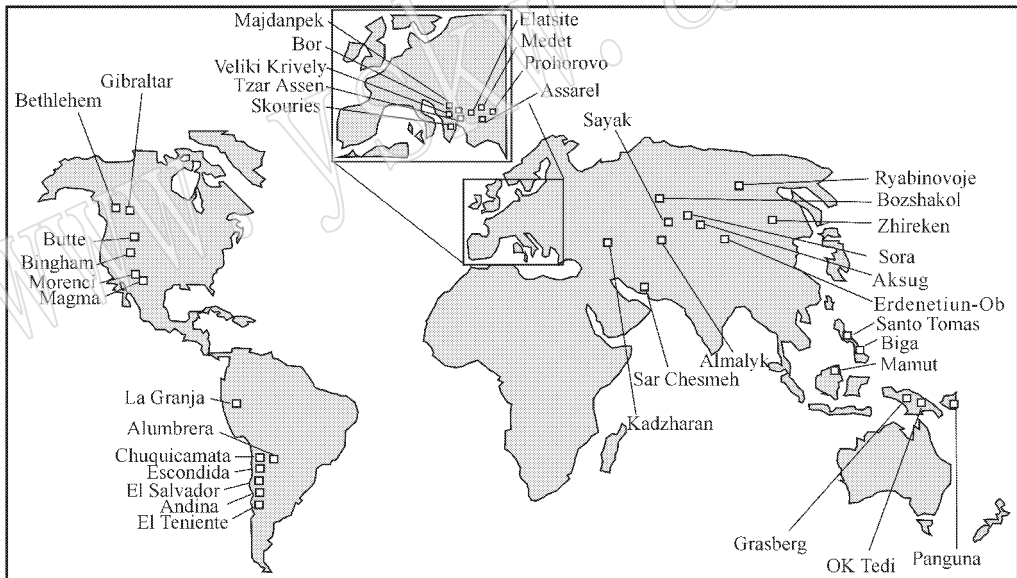


图 1 世界主要富铂族元素的斑岩型铜矿床分布位置示意图

Fig. 1 Distribution of major PGE-rich porphyry copper deposits in the world

2.1 斑岩型铜矿床中铂族元素含量分布特征

依照各元素的地球化学行为及行为差异, PGE 通常被分为 IPGE (Os, Ir 和 Ru) 和 PPGE (Pd, Pt 和 Rh) 两亚族元素。IPGE 具有难熔而且相容性特征, 经常保留在高温形成合金或寄存于尖晶石等矿物相中或滞留在地幔残留体中; PPGE 具有在金属硫化物中赋存的特点, 较多呈现不相容性, 部分熔融时优先进入硅酸盐熔体 (Gueddari *et al.*, 1996)。因此, 从

元素地球化学行为看, 斑岩铜矿中应富集 PPGE 亚族元素。Tarkian 和 Stribny (1999) 通过对世界 33 个斑岩铜矿床中 42 个样品(浮选精矿或硫化物精矿)进行了分析, 其中 23 个矿床中 Pd 的含量高出检测限 (8×10^{-9}), 10 个矿床中 Pt 的含量高于检测限, 而 Os, Ir, Ru 和 Rh 含量均低于检测限, 表明在斑岩铜矿中主要富集 Pd 和 Pt, 尤其是 Pd (Tarkian and Stribny, 1999; Auge *et al.*, 2005; Berzina *et al.*,

2007)。通过对比不同产出环境中斑岩铜矿床的 Pd 和 Pt 含量的高低,发现岛弧型比大陆边缘型的斑岩铜矿具有较高 Pd 和 Pt 含量的趋势比较明显。然而,保加利亚的 5 个岛弧型斑岩铜矿床,只有 2 个矿床显示铂族元素含量高,其他 3 个矿床贫铂族元素,说明斑岩铜矿中铂族元素含量与大地构造环境并没有直接的联系(Tarkian and Stribrny, 1999)。那么,究竟是什么因素影响斑岩铜矿中铂族元素含量的高低呢?许多研究者提出了各自不同的结论。有人认为斑岩铜矿中 Pd 和 Pt 的高含量与钠质钙碱性岩浆作用有关,与高钾钙碱性的岩浆作用有关的斑岩型矿床具有较低的 Pd 和 Pt 含量(Eliopoulos *et al.*, 1991)。但也有人认为,铂族元素的含量多少只与矿床中硫化物含量的高低有关,与侵入岩的地质年代、化学成分和岩浆类型等似乎没有什么关系(Tarkian and Koopmann, 1995; Tarkian and Stribrny, 1999)。笔者对湖北丰山斑岩型铜(钼)矿床开展的相关研究表明,硫化物中 Pd 和 Pt 含量明显较斑岩体和蚀变岩中含量高(王敏芳等, 2009),似乎更好地支持了后者。

2.2 斑岩型铜矿床中铂族元素矿化特征

Mutschler 等(1985)对不同类型的样品开展铂族元素含量测定,发现 Pd 和 Pt 含量主要富集在浮选精矿或硫化物精矿(铜精矿或钼精矿)中, Pd + Pt 含量达 $2 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-6}$,甚至可以达到 20×10^{-6} 。Sotnikov 等(2001)通过对俄罗斯和蒙古境内的多个斑岩型 Cu 或 Cu-Mo 矿床研究认为,在部分斑岩铜矿的矿石样品中, Pd 和 Pt 含量也很高,可以达到 $n \times 10^{-8}$ 或者 $n \times 10^{-7}$,而在围岩和岩体样品中, Pd 和 Pt 含量相对较低,多为 $n \times 10^{-9} \sim n \times 10^{-8}$ 。Lowell 和 Guilbert(1970)指出斑岩型矿床具有明显的蚀变分带性,许多学者研究认为,在富 PGE 的斑岩铜矿中,钾化带最为发育,石英-绢云母化带和青磐岩化带次之,泥化带最不发育(Eliopoulos *et al.*, 1991; Economou-Eliopoulos and Eliopoulos, 2000, 2005a, 2005b; Economou-Eliopoulos *et al.*, 2001; Sotnikov *et al.*, 2001; Auge *et al.*, 2005; Berzina *et al.*, 2005),并且钾化带中的磁铁矿-斑铜矿-黄铜矿矿物组合中往往 Pd 和 Pt 含量稍高(Tarkian and Koopmann, 1995; Berzina *et al.*, 2005)。

Thompson 等(2001)、Tarkian 和 Stribrny(2003)和 Auge 等(2005)开展了大量与碱性岩有关的富

PGE 斑岩铜矿的研究,通过与钙碱性岩有关的斑岩铜矿的对比研究发现,与碱性岩有关的斑岩铜矿更容易发生 Pd 和 Pt 的富集(李金祥等, 2006)。Tarkian 等(1999)对已发表的大量测试数据进行分析,发现斑岩型铜矿中 Pd 和 Pt 含量高与 Cu、Au 含量高密切相关, Pd、Pt 含量和 Au 含量呈正相关的趋势比较明显(图 2)。其中, Au 与 Pd 的相关系数 $r = 0.72$, Pd 与 Pt 相关系数 $r = 0.61$ (Tarkian and Stribrny, 1999),这表明斑岩铜矿中 Pt、Pd 和 Au 具有共同的成因(Tarkian and Koopmann, 1995; Stribrny *et al.*, 2000; Tarkian *et al.*, 2003; 李金祥等, 2006)。因此,有人提出,富金的斑岩型铜矿中更容易形成 Pd 和 Pt 的富集(Economou-Eliopoulos and Eliopoulos, 2000; Auge *et al.*, 2005; 李金祥等, 2006)。王敏芳等(2009)通过对丰山斑岩型铜-钼矿床开展研究,发现矿床中 Au 与 Pd 和 Pt 表现出明显的镜像关系。Berzina 等(2005)发现在斑岩型铜-钼矿床的围岩样品中, Pd 与 Mo 成正相关,相关系数 $r = 0.83$,与 Cu 成负相关,相关系数 $r = -0.70$, Pt 与 Mo 呈弱正相关性,相关系数 $r = 0.31$,而与 Cu 相关性不大,相关系数 $r = -0.03$ 。

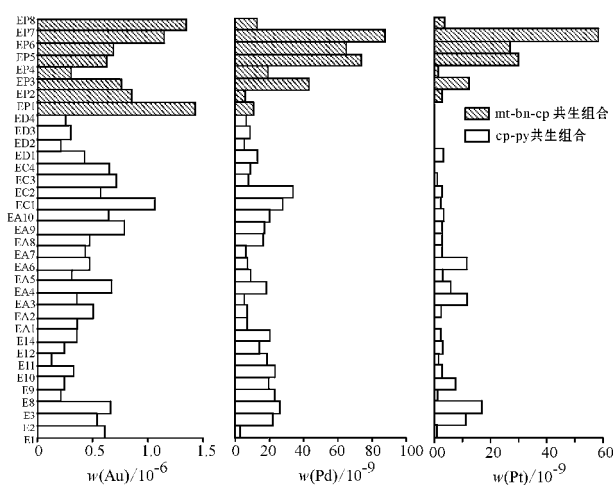


图 2 Elatsite 斑岩型铜矿床中 Au、Pd 和 Pt 含量分布柱状图 (含量测试数据据 Tarkian *et al.*, 2003)

Fig. 2 Columnar section showing Au, Pd and Pt content of the Elatsite porphyry deposits (after Tarkian *et al.*, 2003)

2.3 斑岩型铜矿床中铂族矿物研究

许多学者研究发现,在斑岩型铜矿床中,铂族元素矿物(PGM)主要以碲钨矿、碲钼矿、黄碲钨矿等碲化物形式出现(Filimonova, 1984; Mutschler *et al.*, 1985; Eliopoulos *et al.*, 1991; Petrunov *et al.*,

1992; Piestrzynski *et al.*, 1994; Tarkian and Stribny, 1999; Kozlov *et al.*, 2000; Auge *et al.*, 2005)。其中, 碲钼矿是主要的铂族金属矿物, 可呈卵圆形以包裹体的形式存在于黄铜矿和斑铜矿中, 也可以自形晶的形式存在于硅酸盐和黄铜矿的边界或者在黄铜矿中被银金矿和碲金银矿所包围 (Eliopoulos *et al.*, 1991; Tarkian and Koopmann, 1995), 又可以圆柱状、针状从 Cu-Fe 硫化物中熔离出来 (Tarkian and Stribny, 1999)。除此之外, 斑岩铜矿中的 PGM 还有斜碲钼矿、等轴碲钼矿以及其他一些无法识别的铂族元素矿物 (Petrunov *et al.*, 1992; Daltry and Wilson, 1997)。总之, 在斑岩型铜矿床中 PGM 主要表现为碲化物、碲化物和钼化物或碲钼化物等形式, 以碲化物, 特别是碲钼矿最为常见。

2.4 斑岩型铜矿床中流体包裹体研究

目前, 仅 Taikian 等 (2003) 对保加利亚 Elatsite 斑岩 Cu 矿床、Tarkian 和 Koopmann (1995) 对菲律宾 Santo Tomas II 斑岩型 Cu-Au 矿床开展了流体包裹体的研究。他们分别对早期磁铁矿-斑铜矿-黄铜矿矿物组合和晚期黄铜矿-黄铁矿矿物组合中石英脉进行取样观察, 发现存在 3 种类型包裹体: A 类型是多相高盐度包裹体, 在早期和晚期的矿物组合中都能观察到; B 类型是富液相低-中盐度包裹体, 多出现在黄铜矿-黄铁矿矿物组合中; C 类型是富气相包裹体, 经常与多相包裹体共生。通常, A 类型包裹体一般个体较大 (5~25 μm), 常见石盐子晶, 部分样品中见有钾盐子晶, 过冷却后加温, NaCl 子晶最后消失, 表明这类包裹体是从原始 NaCl 过饱和溶液中捕获的 (Tarkian and Koopmann, 1995; 卢焕章等, 2004)。此外, 在部分样品中见到不透明子矿物, 推测可能是赤铁矿或黄铁矿。

Tarkian 和 Koopmann (1995) 对 Santo Tomas II 矿床 133 个流体包裹体的均一温度和盐度测试数据进行研究, 表明包裹体的盐度与均一温度无相关性, 说明在晚期矿化过程中有大气水的加入, 氢氧同位素资料也证明了这一点 (Beane and Tittley, 1981)。成矿流体温度在 380~520 $^{\circ}\text{C}$ 间, 盐度 $\alpha(\text{NaCl})\%$, 下同 [高 (35%~>60%)。Taikian 等 (2003) 对 Elatsite 斑岩型矿床中的 400 个包裹体样品 (300 个样品取自 mt-bn-cp 矿物组合, 100 个样品取自 cp-py 矿物组合) 进行测试, 分析不同类型包裹体的均一温度、盐度和密度: A 类型多相包裹体根据均一温度不同

分为两个亚类 A1 (均一温度高, 200~>700 $^{\circ}\text{C}$) 和 A2 (均一温度低, 80~200 $^{\circ}\text{C}$), 反映流体演化的两个不同期次, 包裹体盐度在 28.8%~63.5% 之间, 密度范围 1.059~1.342 g/cm^3 ; B 类型包裹体是低-中盐度, 范围在 0.4%~22% 间, 表明有大气水的加入, 密度在 0.773~1.175 g/cm^3 之间, 均一温度与 A2 包裹体相近; C 类型包裹体为富气相包裹体, 均一温度变化在 300~580 $^{\circ}\text{C}$ 间, 盐度范围在 10.7%~23.8% 间, 密度轻, 范围在 0.22~0.41 g/cm^3 (图 3)。

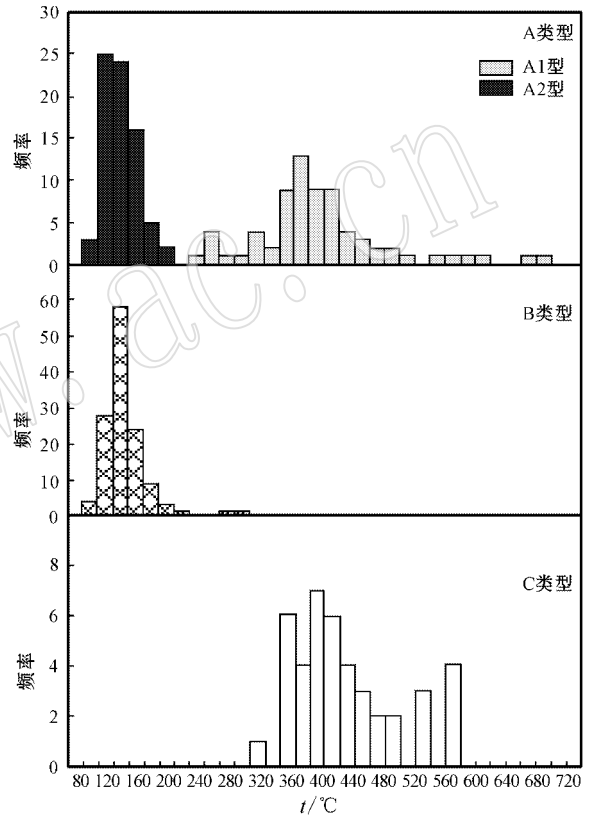


图 3 Elatsite 斑岩型铜矿床中流体包裹体均一温度直方图 (据 Tarkian 等, 2003)

Fig. 3 Histograms showing homogenization temperatures of fluid inclusions (after Tarkian *et al.*, 2003)

根据流体包裹体反映出的流体性质, Tarkian 和 Koopmann (1995), Taikian 等 (2003) 认为, 这些斑岩铜矿成矿流体性质与实验室模拟的流体条件极为相似, 因此提出在上述斑岩铜矿床中, Pd 和 Pt 主要是以氯的络合物形式被高盐度高温流体进行搬运和富集成矿的。但是, 仅仅两个矿床实例的流体包裹体研究中所反映出来的流体温度、盐度特征, 是否具有普遍意义? Pd 和 Pt 的搬运形式究竟怎样? 这些都需要对富 PGE 的斑岩型铜矿床开展系统研究。

2.5 斑岩型铜矿床中铂族元素的来源、富集与成矿

PGE 主要集中在地幔硫化物中(Barnes *et al.*, 1985),而硫化物仅占地幔物质的 0.05%。因此,即使 PGE 在硫化物中有很高的分配系数($K = 106$) (Lorand, 1990),地幔熔融时大部分 PGE 仍然会残留在地幔中。因此,必须要有较高的地幔部分熔融程度,才能使 PGE 有效地转移到熔体中并进入地壳参与成矿。科马提岩是地幔高度部分熔融的产物,这也是为什么重要的 PGE 矿床都与这类岩石有关的原因。

同样,斑岩型铜矿中能否出现 PGE 的富集也受上地幔或俯冲洋壳的化学成分和部分熔融程度的控制(Thompson *et al.*, 2001; 唐冬梅等, 2008)。决定斑岩铜矿 PGE 富集的另外一个重要因素是初始岩浆的分异作用,在初始岩浆的演化过程中,只有硫化物不发生明显的分异才能使 PGE 最终保留在演化后的斑岩岩浆中并随后进入斑岩铜矿成矿流体参与成矿(Tarkian and Stribrny, 1999)。另外,斑岩铜矿中 PGE 的富集与成矿流体系统的组成、性质和演化也有密切关系(Tarkian and Stribrny, 1999)。实验证明,在富 Cl、S 的体系中,PGE 能以挥发分的形式进行迁移,其迁移能力为: $\text{Pd} > \text{Pt} > \text{Rh} > \text{Ir}$, Pd 和 Pt 的迁移能力明显大于其他铂族元素(Wood, 1987; Fleet and Wu, 1993)。这一实验结果可以很好地解释斑岩铜矿中主要富集 Pd 和 Pt 而少见其他 PGE 这一现象。Mountain 和 Wood (1988) 研究认为,在氧化($\log f_{\text{O}_2} > -25$)和酸性条件下,在温度为 300~500 °C 的高盐度流体中,PGE 主要以氯的络合物形式存在,其中 Pd 和 Pt 的含量可达 10×10^{-9} 以上。Xiong 和 Wood (2000) 的实验研究表明,如果各方面的物理化学条件具备,在斑岩铜矿成矿早阶段,成矿流体中 Pd 的含量可达 10×10^{-9} 以上,一个大型斑岩铜矿的成矿流体搬运 Pd 的能力可达 10 吨,而 Os 也至少可达 3 吨。这些学者的研究表明,在合适的物理化学条件下,Pd 和 Pt 可以氯的络合物形式被斑岩型矿床成矿流体搬运,并产生一定规模的 PGE 矿化。

3 存在问题与讨论

虽然斑岩铜矿床中铂族元素的研究已经达到一定的水平,但仍然存在不少问题有待深入研究:

(1) 斑岩型铜矿床中铂族元素含量高低的影响

因素

斑岩型铜矿床中常富集 Pd、Pt 和 Au,尤其是 Pd,而其他铂族元素(即使与 Pt、Pd 和 Au 性质非常相似的 Rh)相对贫化,产生这种现象的原因是什么?换句话说,斑岩铜矿中 PGE 含量的影响因素是什么?尽管 Taikian 和 Stribrny (1999) 研究认为,在斑岩型铜矿床中 Pd 和 Pt 的含量与大地构造背景没有直接联系,但是不同大地构造背景下 Pd 和 Pt 的分配是否存在固定的模式?能否与成矿动力学背景相联系,能否作为斑岩型铜矿床成矿岩浆的起源和成矿物质来源的示踪剂?这需要分析技术的发展和数据的积累才能完善。正如前所述,湖北丰山斑岩型 Cu-Mo 矿床中 Pt 和 Pd 的含量特征似乎支持了 PGE 含量仅与硫化物含量高低有关这一观点,然而这还需要更多斑岩铜矿床数据的支持。

(2) 富 PGE 斑岩型铜矿床中流体包裹体研究不够系统

如前所述,对富铂族元素的斑岩铜矿的流体包裹体研究,仅限于保加利亚 Elatsite 斑岩 Cu 矿床(Tarkian *et al.*, 2003)和菲律宾 Santo Tomas II 斑岩型 Cu-Au 矿床(Tarkian and Koopmann, 1995)。虽然 Tarkian 等人的研究结果相当细致,对成矿流体的温度、盐度和密度进行了讨论,但是仅仅从两个矿床实例的流体包裹体研究中所反映出来的流体温度、盐度特征,是否具有普遍意义(李晓峰等, 2003)和说服力?这需要对富 PGE 的斑岩型铜矿床开展系统研究。流体包裹体是反映成矿流体性质的重要手段,通过流体包裹体的研究,可以查明成矿流体的组成、性质及演化规律,可为讨论 PGE 的搬运形式和富集机制提供参考。

(3) 斑岩型铜矿床中铂族元素的富集机理研究还欠深入

斑岩型铜矿床中的原始 Pd 和 Pt 富集是成矿的必要条件,也就是说幔源岩浆是必须的。幔源岩浆在侵位过程中,岩浆硫化物的早期熔离缺失是必须满足的条件,只有这样才能有铂族元素供后来在斑岩系统中热液搬运和富集(Tarkian and Stribrny, 1999)。由于 IPGE 和 PPGE 的地球化学性质及行为差异,低程度地幔部分熔融岩浆中富集 Cu、Pd 和 Pt,而高程度部分熔融的岩浆,则富集 IPGE 元素。Pt 和 Pd 表现为亲硫性,与 S 饱和度密切相关。利用 Cu/Pd 比值判断 S 是否达到饱和,当 $\text{Cu}/\text{Pd} > 6\ 500$ (原始地幔),表明岩浆经过了硫化物的熔离作用,反

之则表明岩浆中的硫处于不饱和状态(Maier *et al.* , 1996)。当溶入硅酸盐岩浆中的硫达到饱和时, S 就会与 Ni、Cu、Fe、Co 及 PGE 等元素结合而形成一种不混溶的硫化物熔体,引起岩浆中的硫达到饱和的机制主要有岩浆的分异(Houghton *et al.* , 1974) 岩浆的混合(Irvine, 1975; Li *et al.* , 2001) 和围岩的混染(Leshner and Campbell, 1993)。而壳源物质的混染和岩浆通道中的交换作用对 S 饱和起多大作用? 是否也能提供成矿金属元素? 研究 PGE 在岩浆演化过程不同阶段中的物理和化学性质, 并结合实验室模拟、观测 PGE 的地球化学行为, 取得大量地化数据, 可以综合讨论 PGE 的富集与成矿。

4 结语

自 Mutschler 等(1985) 指出北美科迪勒拉山系与碱性岩相关的许多斑岩体中富集铜和铂族元素以来, 国外陆续开展了斑岩铜矿中铂族元素的研究, 而我国研究基础相对薄弱, 只是项仁杰等(1999) 简单报道了德兴、多宝山、玉龙斑岩铜矿中有 PGE 富集, 而对铂族元素的分布特征、铂族矿物类型和富集成矿机理未做研究。因此, 今后应加强对斑岩型铜矿床中的铂族元素研究, 重点开展对长江中下游地区一系列斑岩型铜矿床的研究, 如丰山、铜山口、铜绿山等矿床, 夯实我国斑岩铜矿中铂族元素研究的基础, 进一步丰富铂族元素的成矿理论, 为找矿提供科学的依据, 推动铂族元素勘查取得更大的突破。

References

- Auge T, Petrunov R and Bailly L. 2005. On the origin of the PGE mineralization in the Elatsite porphyry Cu-Au deposit, Bulgaria: comparison with the Baula-Nuasahi complex, India, and other alkaline PGE-rich porphyries[J]. *Canadian Mineralogist*, 43(4): 1355~1372.
- Barnes S J, Cox R and Zientek M. 2006. Platinum-group element, Gold, Silver and Base Metal distribution in compositionally zoned sulfide droplets from the Medvezky Creek Mine, Noril'sk, Russia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152(2): 187~200.
- Barnes S J, Naldrett A J and Gorton M P. 1985. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas[J]. *Chemical Geology*, 53(3~4): 303~323.
- Beane R E and Titley S R. 1981. Porphyry copper deposits. Part II. Hydrothermal alteration and mineralization[J]. *Economic Geology 75th Anniversary Volume*: 235~269.
- Berzina A N, Sotnikov V I, Economou-Eliopoulos M, *et al.* 2005. Factors controlling palladium and gold contents in the Aksug porphyry Cu-Mo deposit (Russia) [A]. Mao J W and Bierlein F P. *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge* [C]. Beijing: Springer, 353~356.
- Berzina A N, Sotnikov V I, Economou-Eliopoulos M, *et al.* 2007. First finding of merenskyite (Pd,Pt)₂Te₂ in porphyry Cu-Mo ores in Russia [J]. *Russian Geology and Geophysics*, 48(8): 656~658.
- Boudreau A E and McCallum I S. 1992. Concentration of platinum-group elements by magmatic fluids in layered intrusions [J]. *Economic Geology*, 87(7): 1830~1848.
- Canet C, Alfonso P, Melgarejo J C, *et al.* 2004. Geochemical evidences of sedimentary-exhalative origin of the shale-hosted PGE-Ag-Au-Zn-Cu occurrences of the Prades Mountains (Catalonia, Spain): trace-element abundances and Sm-Nd isotopes [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 82(1~3): 17~33.
- Dalry V D C and Wilson A H. 1997. Review of platinum-group mineralogy: Compositions and elemental associations of the PG-minerals and unidentified PGE-phases [J]. *Mineralogy and Petrology*, 60(3): 185~229.
- Economou-Eliopoulos M and Eliopoulos D G. 2000. Palladium, platinum and gold concentration in porphyry copper systems of Greece and their genetic significance [J]. *Ore Geology Reviews*, 16(1~2): 59~70.
- Economou-Eliopoulos M and Eliopoulos D G. 2005a. Contribution of magmas and mafic rocks to Pd and Pt contents in porphyry Cu deposit: evidence from the Skouries deposit, Greece [A]. Timmen T O and Alapieti T T. *Platinum-Group Elements—from Genesis to Beneficiation and Environmental Impacts-10th International Platinum Symposium* [C]. Finland: Ecological Survey of Finland, 326~329.
- Economou-Eliopoulos M and Eliopoulos D G. 2005b. Mineralogical and geochemical characteristics of the Skouries porphyry-Cu-Au-Pd-Pt deposit (Greece): Evidence for the precious metal [A]. Mao J W and Bierlein F P. *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge* [C]. Beijing: Springer, 935~938.
- Economou-Eliopoulos M, Eliopoulos D G and Perantonis G. 2001. Factors controlling the Pd and Pt potential of the Skouries porphyry-Cu deposit, Chalkidiki Peninsula, N. Greece [A]. Piestrzynski A. *Mineral Deposits at the Beginning of the 21st century* [C]. America: Taylor & Francis, 731~734.
- Eliopoulos D, Economou-Eliopoulos M, Strashimirov S, *et al.* 1995. Gold, platinum and palladium content in Cu deposits from Bulgaria: a study in progress. [J]. *Geol. Soc. Greece, Spec Pub* (4): 712~716.
- Eliopoulos D G, Economou-Eliopoulos M, Economou-Eliopoulos M, *et al.* 1991. Platinum-group element and gold contents in the Skouries porphyry copper deposit, Chalkidiki Peninsula, northern Greece [J]. *Economic Geology*, 86(4): 740~749.
- Filimonova L E. 1984. The first finding of merenskyite in ores of porphyry Cu deposits [J]. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 279(1): 200~202.

- Fleet M E and Wu T W. 1993. Volatile transport of platinum-group elements in sulfide-chloride assemblages at 1 000°C [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(15): 3 519~3 531.
- Geng Lin, Zhaiyu Sheng and Peng Runmia. 2007. Characteristics and resource potential of platinum group elements deposit in China [J]. *Geology and Prospecting*, 43(1): 1~7(in Chinese with English abstract).
- Gornostayev S S, Crocket J H, Mochalov A G, *et al.* 1999. The platinum-group minerals of the Baimka placer deposits, Aluchin Horst, Russian Far East [J]. *Canadian Mineralogist*, 37(5): 1 117~1 129.
- Gu Xiangpiang and Chen Desong. 1993. Palladium and platinum in some copper (iron) deposits of skarn type and related ore processing and smelting products in China [J]. *Mineral Resources and Geology*, 7(4): 282~285(in Chinese with English abstract).
- Gueddari K, Piboule M and Amoss J. 1996. Differentiation of platinum-group elements (PGE) and of gold during partial melting of peridotites in the lherzolitic massifs of the Betic-Rifean range (Ronda and Beni Bousera) [J]. *Chemical Geology*, 134(1~3): 181~197.
- Haughton D R, Roeder P L and Skinner B J. 1974. Solubility of Sulfur in Mafic Magmas [J]. *Economic Geology*, 69(4): 451~467.
- Holwell D and McDonald I. 2007. Distribution of platinum-group elements in the Platreef at Overysel, northern Bushveld Complex: a combined PGM and LA-ICP-MS study [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154(2): 171~190.
- Irvine T N. 1975. Crystallization sequences in the Muskox intrusion and other layered intrusions-II. Origin of chromitite layers and similar deposits of other magmatic ores [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39(6~7): 991~1 008.
- Kehayov R, Bogdanov K, Fanger L, *et al.* 2003. The fluid chemical evolution of the Elatsite porphyry Cu-Au-PGE deposit, Bulgaria [J]. *Mineral Exploration and Sustainable Development, Vols 1 and 2*: 1 173~1 176, 1 272.
- Kozlov V V, Shamaev O T and Turesebekov A K. 2000. New data on PGE mineralization in porphyry copper deposits of Almalyk district (Uzbekistan) [A]. *Armstrong M. 31st International. Geological Congress [C]. Brazil: Dordrecht Boston Kluwer Academic*, 2 850.
- Leshner C M and Campbell I H. 1993. Geochemical and fluid dynamic controls on the composition of komatiite-hosted nickel sulfide ores in Western Australia [J]. *Economic Geology*, 88: 804~816.
- Liang Youbin and Li Yi. 1997. Genetic types and geological characteristics of platinum group element deposits in China [J]. *Mineral Resources and Geology*, 11(3): 145~151(in Chinese with English abstract).
- Li C, Maier W D and de Waal S A. 2001. The Role of Magma Mixing in the Genesis of PGE Mineralization in the Bushveld Complex: Thermodynamic Calculations and New Interpretations [J]. *Economic Geology*, 96(3): 653~662.
- Li Jinxiang, Qin Kezhang and Li Guangming. 2006. Basic characteristics of gold-rich porphyry copper deposits and their ore sources and evolving processes of high oxidation magma and ore-forming fluid [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 678~688(in Chinese with English abstract).
- Li Xiaofeng, Mao Jingwen and Zhang Zuoheng. 2003. Background and development of researches on platinum group elements in porphyry copper deposits [J]. *Mineral Deposits*, 22(1): 95~98(in Chinese with English abstract).
- Lorand J P. 1990. Are spinel lherzolite xenoliths representative of the abundance of sulfur in the upper mantle [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54: 1 487~1 492.
- Lowell J D and Guilbert J M. 1970. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits [J]. *Economic Geology*, 65(4): 373~408.
- Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei *et al.* 2004. *Fluid Inclusions* [M]. Beijing: Science Press, 181~184(in Chinese).
- Maier W D, Barnes S J, de Klerk W J, *et al.* 1996. Cu/Pd and Cu/Pt of silicate rocks in the Bushveld Complex; implications for platinum-group element exploration [J]. *Economic Geology*, 91(6): 1 151~1 158.
- Mountain B W and Wood S A. 1988. Chemical controls on the solubility, transport and deposition of platinum and palladium in hydrothermal solutions; a thermodynamic approach [J]. *Economic Geology*, 83(3): 492~510.
- Mutschler F E, Griffen M E, Stevens D S, *et al.* 1985. Precious metal deposits related to alkaline rocks in the North American Cordillera; an interpretive review [J]. *South African Journal of Geology*, 88(2): 355~377.
- Naldrett T, Kinnaird J, Wilson A, *et al.* 2008. The concentration of PGE in the Earth's crust with special reference to the Bushveld Complex [J]. *Earth Science Frontiers*, 15(5): 264~297.
- Pačova J, Vymazalová A, Petersen S, *et al.* 2004. PGE distribution in massive sulfides from the PACMANUS hydrothermal field, eastern Manus basin, Papua New Guinea: implications for PGE enrichment in some ancient volcanogenic massive sulfide deposits [J]. *Mineralium Deposita*, 39(7): 784~792.
- Petrunov R, Dragov P, Ignatov G, *et al.* 1992. Hydrothermal PGE-Mineralization in the Elacite Porphyry Copper-Deposit (the Sredna Gora Metallogenic Zone, Bulgaria) [J]. *Cr. Acad. Bulg. Sci.*, 45(4): 37~40.
- Piestrzynski A, Schmidt S and Franco H. 1994. Pd-minerals in the Santo Tomas II porphyry copper deposit, Tuba, Benguet, Philippines [J]. *Mineralogica Polonica*, 25(2): 21~31.
- Sotnikov V I, Berzina A N, Economou-Eliopoulos M, *et al.* 2001. Palladium, platinum and gold distribution in porphyry Cu +/- Mo deposits of Russia and Mongolia [J]. *Ore Geology Reviews*, 18(1~2): 95~111.
- Stribny B, Wellmer F W, Burgath K P, *et al.* 2000. Unconventional PGE occurrences and PGE mineralization in the Great Dyke: metal-

- logenic and economic aspects [J]. *Mineralium Deposita*, 35(2-3): 260~281.
- Sun X M, Wang M, Xue T *et al.* 2003. He-Ar isotopic systematics of fluid inclusions in pyrites from PGE-polymetallic deposits in lower Cambrian black rock series, Southern China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 661~666 (in Chinese with English abstract).
- Tang Dongmei, Qin Kezhang, Liu Bingguang, *et al.* 2008. The major types, metallogenesis of platinum-group element deposits and some prospect [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(3): 569~588 (in Chinese with English abstract).
- Tarkian M, Hunken U, Tokmakchieva M, *et al.* 2003. Precious-metal distribution and fluid-inclusion petrography of the Elatsite porphyry copper deposit, Bulgaria [J]. *Mineralium Deposita*, 38(3): 261~281.
- Tarkian M and Koopmann G. 1995. Platinum-group minerals in the Santo Tomas II (Philex) porphyry copper-gold deposit, Luzon Island, Philippines [J]. *Mineralium Deposita*, 30(1): 39~47.
- Tarkian M and Stribrny B. 1999. Platinum-group elements in porphyry copper deposits: a reconnaissance study [J]. *Mineralogy and Petrology*, 65(3): 161~183.
- Thompson J F H, Lang J R and Stanley C R. 2001. Platinum group elements in alkaline porphyry deposits, British Columbia [J]. *Exploration and Mining in British Columbia. Mines Branch. Part B*: 57~64.
- Tolstikh N D, Foley J Y, Sidorov E G, *et al.* 2002. Composition of the platinum-group minerals in the salmon river placer deposit, Goodnews Bay, Alaska [J]. *Canadian Mineralogist*, 40(2): 463~471.
- Vikentyev I V, Yudovskaya M A, Mokhov A V, *et al.* 2004. Gold and PGE in massive sulfide ore of the Uzelginsk deposit, southern Ural, Russia [J]. *Canadian Mineralogist*, 42(2): 651~665.
- von Quadt A, Peytcheva I and Heinrich C. 2002. Life span of a Cu (Au-PGE) porphyry deposit using high-precise U-Pb single zircon dating, example: Elatsite, Bulgaria (Bulgaria) [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(15A): A811~A811.
- Wang Min, Sun Xiaoming and Ma Mingyang. 2004. Geochemistry of ore-forming fluid and its metallogenetic significances of PGE-polymetallic deposits in lower Cambrian black rock series, Southern China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 43(5): 98~102 (in Chinese with English abstract).
- Wang Minfang, Deng Xiaodong and Bi Shijian. 2009. A study on the enrichment of Pt and Pd in the Fengshan porphyry Cu-Mo deposits, Hubei [J]. *Geology and Exploration*, 45(2): 38~43 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shengwei, Sun Xiaoming, Shi Guiyong, *et al.* 2006. Platinum group elements (PGE) geochemistry of Baimazhai Ni-Cu sulfide deposit and its constrains on the ore genesis [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1474~1486 (in Chinese with English abstract).
- Wood S A. 1987. Thermodynamic calculations of the volatility of the platinum group elements (PGE): The PGE content of fluids at magmatic temperatures [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(11): 3041~3050.
- Xiang Renjie and Ru Xianglan. 1999. Platinum metals in porphyry copper deposits in China [J]. *Guowai Dizhi Keji*, 3: 29~33 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Y and Wood S A. 2000. Experimental quantification of hydrothermal solubility of platinum-group elements with special reference to porphyry copper environments [J]. *Mineralogy and Petrology*, 68(1~3): 1~28.
- Zhu Wenfeng and Liang Youbin. 2000. Occurrence state and distribution of platinum group elements in the Jinchuan Cu-Ni sulphide deposit [J]. *Geology and Prospecting*, 36(1): 26~28 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 耿林, 翟裕生, 彭润民. 2007. 中国铂族元素矿床特征及资源潜力分析 [J]. *地质与勘探*, 43(1): 1~7.
- 谷湘平, 陈德松. 1993. 我国某些砂卡岩型矿床及有关选冶产品中的钨钼 [J]. *矿产与地质*, 7(4): 282~285.
- 梁有彬, 李艺. 1997. 中国铂族元素矿床类型和地质特征 [J]. *矿产与地质*, 11(3): 145~151.
- 李金祥, 秦克章, 李光明. 2006. 富金斑岩型铜矿床的基本特征、成矿物质来源与成矿高氧化岩浆-流体演化 [J]. *岩石学报*, 22(3): 678~688.
- 李晓峰, 毛景文, 张作衡. 2003. 斑岩铜矿中铂族元素的研究现状及展望 [J]. *矿床地质*, 22(1): 95~98.
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 2004. 流体包裹体 [M]. 北京: 科学出版社.
- 孙晓明, 王敏, 薛婷, 等. 2003. 华南下寒武统黑色岩系铂多金属矿中黄铁矿流体包裹体的 He-Ar 同位素体系 [J]. *高校地质学报*, 9(4): 661~666.
- 唐冬梅, 秦克章, 刘秉光, 等. 2008. 铂族元素矿床的主要类型、成矿作用及研究展望 [J]. *岩石学报*, 24(3): 569~588.
- 王敏, 孙晓明, 马名扬. 2004. 华南黑色岩系铂多金属矿成矿流体地球化学及其矿床成因意义 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 43(5): 98~102.
- 王敏芳, 邓晓东, 毕诗健. 2009. 丰山斑岩型铜(钼)矿床中铂、钯的富集特征研究 [J]. *地质与勘探*, 45(2): 38~43.
- 王生伟, 孙晓明, 石贵勇, 等. 2006. 云南白马寨铜镍硫化物矿床铂族元素地球化学及其对矿床成因的制约 [J]. *地质学报*, 80(9): 1474~1486.
- 项仁杰, 茹湘兰. 1999. 中国斑岩铜矿中的铂族金属 [J]. *国外地质科技*, 3: 29~33.
- 朱文凤, 梁有彬. 2000. 金川铜镍硫化物矿床铂族元素的赋存状态及分布规律 [J]. *地质与勘探*, 36(1): 26~28.