

# 陕西太白金矿含金角砾岩中铂族元素特征

邱士东<sup>1</sup> 徐九华<sup>1</sup> 谢玉玲<sup>1</sup> 朱和平<sup>2</sup> 林龙华<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学土木与环境工程, 北京 100083;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029)

**摘要:**采用硫镍火法试金(NiS-FA)结合电感耦合等离子质谱(ICP-MS)分析了太白金矿硫化物和含金角砾岩中铂族元素的含量,结果显示,与秦岭地区八卦庙相比铂族元素含量较高,而低于原始地幔,其中铂(Pt)、钯(Pd)、钌(Ru)富集,并结合前人研究资料对铂族元素的来源和迁移机制进行探讨。铂族元素可能受深源的影响,IPGE(Ir、Os、Ru)可能主要以硫化物形式存在而PPGE(Rh、Pt、Pd)可能主要以单质存在。

**关键词:**铂族元素;深源;迁移方式

**中图分类号:** P595 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2007)01-0117-06

铂族元素(PGE)包括铂(Pt)、钯(Pd)、铑(Rh)、铱(Ir)、锇(Os)、钌(Ru)。铂族金属因其具有瑰丽的外表和其他金属不可比拟的物理化学特性、持久的使用寿命和稳定的储存价值、独特的生物活性和催化活性,成为一类其他金属和物质不可替代的特殊金属。20世纪中期,铂、钯被称为现代工业“维生素”,由于其在材料、能源、信息、环保这4个国际社会公认的高新技术产业中的重要作用被赞誉为“第一重要的高技术金属”。但是由于铂族元素总量少、品位低、分布不均匀,铂族元素长期被少数国家垄断着,多数国家供需矛盾突出。全球的铂族金属年产量只有400 t左右,其中锇、铱、铑、钌的年产量更少,只有几十吨。中国陆域已发现的铂、钯金属储量还不到全球储量的0.5%,在中国铂族元素产品主要依赖进口。因此,加快寻找铂族金属矿产是十分必要的。

目前国内外对铂族元素的研究主要集中在与镁铁质—超镁铁质岩体有关的矿床和铜镍硫化物矿床上。而这些被研究的矿床都是大型—超大型的,比如布什维尔德杂岩体,金川铜镍硫化物矿,以目前对铂族元素的认识状况找这种大矿是很困难的,也没有普遍意义。近年来在南方黑色岩系发现有铂族元素伴生,对黑色岩系中铂族元素矿床的研究也取得了一系列重要进展<sup>[1-4]</sup>。南秦岭泥盆系典型金矿床陕西双王金矿、八卦庙金矿、甘肃礼坝金矿等矿床,产出大地构造环境相似,矿体赋围岩均为含碳、泥质的浅变质细碎屑岩和含金角砾岩。这些特征与南方黑色页岩极为相似,铂族元素可能

成矿,值得进一步研究。

## 1 地质背景

太白金矿所在的凤太矿田位于秦岭泥盆系金矿带中部,区域上矿田处于凤镇—山阳深断裂南侧。矿区出露地层为一套浅海相碎屑岩—碳酸盐岩组成的浅变质岩系,即泥盆系王家楞组、古道岭组和星红铺组。矿体赋存于呈北西向西贯穿该区的含铁白云石胶结角砾岩。含金角砾岩带长1 115 km,总体延伸方向290°~310°(图1),由大小不等的5个主角砾岩体(I—V)组成,角砾岩体长550~3 600 m。该矿田内还有著名的八卦庙金矿等。含金角砾岩角砾的分选极差。大的的可达几米,甚至几十米,小的仅达毫米级。角砾的组成简单,为米黄色钠长岩,其矿物组合、含量、粒度和结构及变质程度与角砾的原岩基本一致。胶结物为多阶段热液活动的产物,以铁白云石为主,其次为方解石、石英、黄铁矿、钠长石等。角砾与胶结物之间的界限十分明显,且二者成分不一致。胶结物以脉状、网脉状充填于角砾间的空隙或围岩的裂隙中,更反映出流体的多期活动性。

## 2 样品特征和分析方法

样品取自太白金矿主矿体8号矿体1 290 m中段到1 350 m中段,样品为角砾状钠长石岩,主要矿物有钠长石、

收稿日期:2006-07-31;改回日期:2006-10-09

基金项目:高等学校博士点专项科研项目(20030008018)资助。

作者简介:邱士东,男,1975年生,博士生,主要从事矿产资源综合利用研究;E-mail:qiushidong@126.com。



表 2 太白金矿样品中铂族元素含量(ng/g)  
Table 2 PGE content (ng/g) of samples in the  
Taibai gold deposit

样品原号	T001	T009	T500A	T500B	T700	华夏陆壳	原始地幔
Os	0.29	0.11	1.47	1.77	0.42	1.62	3.40
Ir	0.19	0.05	0.48	0.42	0.23	0.74	3.20
Ru	0.59	0.36	8.21	5.66	2.89	3.29	5.00
Rh	0.11	0.05	0.21	0.13	0.06	0.75	0.90
Pt	1.42	0.50	2.63	1.49	1.45	5.22	7.10
Pd	3.78	1.52	4.98	5.63	2.10	4.51	3.90
Pd/Ir	19.89	30.40	10.38	13.40	9.13	8.24	1.22
Pd/Pt	2.67	3.04	1.89	3.78	1.45	0.86	0.55
Pt/Ru	2.40	1.39	0.32	0.26	0.50	1.58	1.42
IPGE/PPGE	0.20	0.25	1.30	1.08	0.98	0.54	0.97

注:由国家地质测试中心韩慧明等测试。

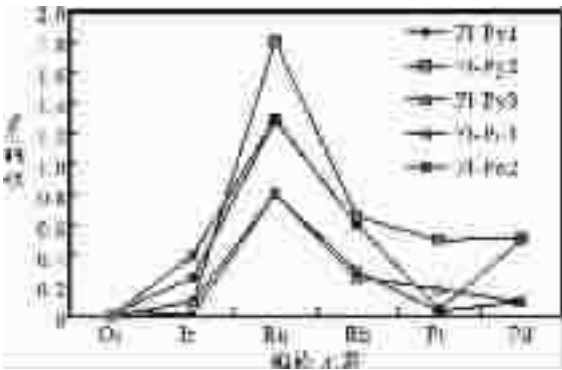


图 3 八卦庙金矿硫化物矿物电子探针分析的 PGE 含量分布图

FI-Py-黄铁矿;FI-Po-磁黄铁矿<sup>[9]</sup>

Fig.3 Microprobe analysis of the PGE content in pyrite and pyrrhotite from the Baguamiao gold deposit

FI-Py-pyrite;FI-Po-pyrrhotite<sup>[9]</sup>

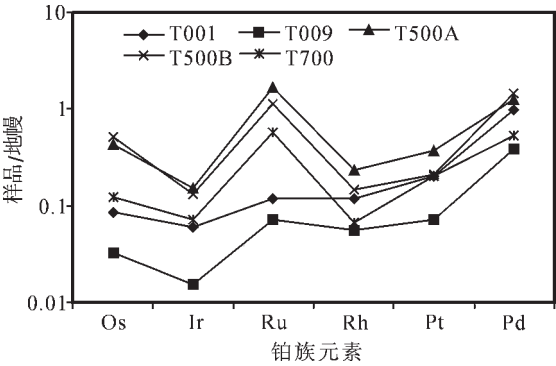


图 2 太白金矿含金角砾岩全岩和黄铁矿中 PGE 含量分布图(经地幔标准化<sup>[5]</sup>)

Fig.2 PGE content in pyrite and gold-bearing breccia from the Taibai gold deposit (mantle-normalized by McDonough<sup>[5]</sup>)

Ru 主要在硫化物中富集,在太白角砾岩中的含量比较低。而 Pt、Pd 不仅在硫化物中富集而且在原岩中含量也比地壳拉克要高。

3 讨论

3.1 铂族元素分布特征

太白金矿含金角砾岩的铂族元素总量为 2.59~6.37 ng/g,比秦岭地区八卦庙金矿中千枚岩和含矿千枚岩中铂族元素(1.16~4.32 ng/g)<sup>[9]</sup>含量高,而相对于原始地幔铂族元素(23.5 ng/g)亏损。而太白金矿含金角砾岩黄铁矿中铂族元素总量(7.15~17.98 ng/g)明显比八卦庙金矿中的铂族元素含量高(表 2)。在角砾岩中的 IPGE(Ir、Os、Ru)/PPGE(Rh、Pt、Pd)值为 0.2~0.25;而在黄铁矿中的值为 0.98~1.3,比在原始地幔中的 IPGE/PPGE 稍高,在黄铁矿中和原始地幔中 IPGE/

PPGE 相关性较强。

太白金矿含金角砾岩全岩和黄铁矿的 PGE 的原始地幔标准化曲线 IPGE 和 PPGE 均为正斜率(图 2),IPGE 以 Ir、Os、Ru 顺序含量增加,PPGE 以 Rh、Pt、Pd 顺序含量增加。相对于原始地幔而言<sup>[9]</sup>,黄铁矿中 Ru 明显的正异常,在铂族元素中只有 Ru 能形成 RuS<sub>2</sub><sup>[7]</sup>,因而太白金矿硫化物中铂族元素比全岩的含量要高的多。硫化物中 Rh、Pt、Os、Ir 亏损,全岩中 PGE 强烈亏损。从图 2 可以看出 IPGE 在太白金矿硅酸盐和硫化物中分异较 PPGE 明显,表明在角砾钠长岩形成的阶段经历过硫化物的分异作用,由于 PGE 在硫化物/硅酸盐熔体中的配分系数极大,PGE 与硫化物强烈相容,而随硫化物一起从熔体中分离出来,由此造成了钠长岩中 PGE 强烈亏损。

与同一构造带上的八卦庙金矿床相比<sup>[9]</sup>,太白金矿含金角砾岩 PGE 含量明显高于八卦庙金矿,但是谢玉玲等<sup>[9]</sup>在八卦庙金矿的电子探针数据(图 3)显示八卦庙金矿床硫化物中铂族元素含量较高,尤其是 Ru 最高可达 1.8%,图 3 为硫化物矿物微区的电子探针数据,而苏瑞侠等<sup>[9]</sup>测得千枚岩、含矿千枚岩和硫化物中铂族元素较低(1.16~4.32 ng/g),这种差别可能是由铂族元素在八卦庙金矿床硫化物和硅酸盐中的分布极不均匀造成的。苏瑞侠等<sup>[9]</sup>在八卦庙金矿发现了独立的钨钨矿证实八卦庙金矿确实具有高的 Ru 含量。据此铂族元素总量比八卦庙高的太白金矿更可能含有含量较高的 IPGE 矿物,然而目前还没有相关的报道,有必要进行更深入细致的研究。

3.2 铂族元素的深源性

从大地构造位置上看,太白金矿、八卦庙金矿地处华北地台与扬子地台对接消减带,靠近扬子地台一侧,其北有商县—丹凤深断裂,凤镇—山阳深断裂从矿区以北的上、下白云镇通过。沿深断裂有碰撞型花岗岩和基性、超基性岩分布,说明深断裂可切穿地壳达上地幔,成为幔源热液上升的通

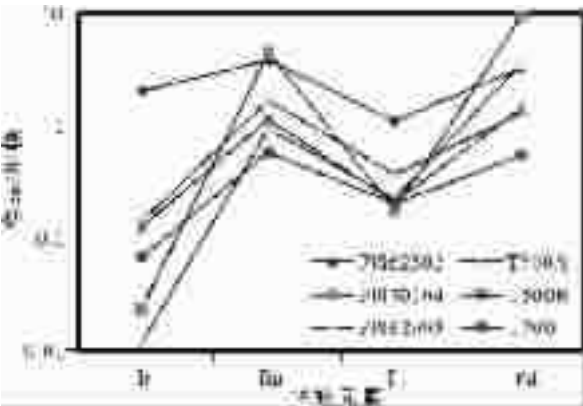


图 4 太白金矿硫化物和内蒙古大井矿石中 PGE 含量分布图(经地幔标准化<sup>[5]</sup>)

Fig.4 Content of PGE in sulfide from the Taibai gold deposit and ore in the Dajing deposit, Inner Mongolia (mantle-normalized<sup>[5]</sup>)

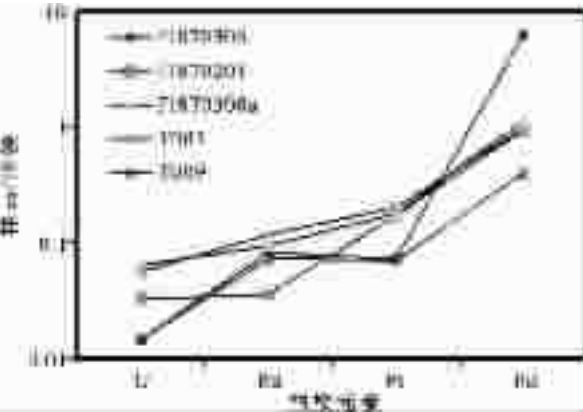


图 5 太白金矿含金角砾岩和内蒙古大井基性-超基性脉岩中铂族元素的分布(经地幔标准化<sup>[5]</sup>)

Fig.5 Content of PGE in gold-bearing breccia of the Taibai gold deposit and mafic-ultramafic dike rocks in the Dajing deposit, Inner Mongolia (mantle-normalized<sup>[5]</sup>)

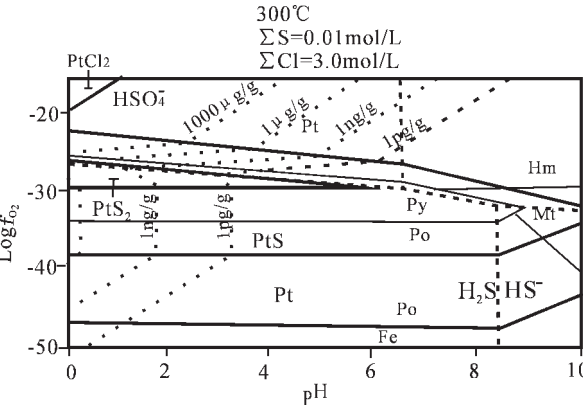


图 6 Pt-S-Cl-H<sub>2</sub>O 体系 Logf<sub>O<sub>2</sub></sub>-pH 相图<sup>[14]</sup>

Py—黄铁矿;Po—磁黄铁矿;Hm—赤铁矿;Mt—磁铁矿

Fig.6 logf<sub>O<sub>2</sub></sub>-pH diagram for the Pt-S-Cl-H<sub>2</sub>O system<sup>[14]</sup>

Py-pyrite;Po-pyrrhotite;Hm-hematite;Mt-magnetite

道。产于泥盆系细碎屑岩中的金矿床多分布于断裂的南侧,距断裂 10~30 km 范围内,如二台子金矿,凤县八卦庙金矿,太白金矿等。太白金矿含金角砾岩硫化物中的 IPGE/PPGE 与原始地幔中 IPGE/PPGE 的比值相差不大,揭示了其与深源的密切关系。谢玉玲等<sup>[9]</sup>在太白金矿首次发现了 Cu、Ni 的砷化物和硫化物(黑硫铜镍矿和辉砷镍矿)。这些与深成的基性岩和超基性岩关系密切的矿物的发现是该地区铂族元素受深源热液影响的有利证据。另外,卢武长<sup>[9]</sup>,郑作平等<sup>[10]</sup>,储雪蕾<sup>[11]</sup>,谢玉玲等<sup>[12]</sup>的碳同位素分析也揭示了深源流体在该区的成矿有重要作用,金矿床硫为地层硫和岩浆硫的混合硫。石准立<sup>[13]</sup>的稀土特征也表明太白金矿成矿受深部流体的影响。因此太白金矿的成矿很有可能受来自于深源物质的影响。

储雪蕾等<sup>[14]</sup>对内蒙古大井铜多金属矿床硫化物矿石和矿区出露的基性-超基性脉岩进行研究发现,矿石和脉岩的铂族元素特征显示具有深源性,本文就太白金矿含金角砾岩铂族元素和储雪蕾等<sup>[14]</sup>内蒙大井矿床铂族元素进行比较如(图 4~图 5),样品采自大井和官地两矿床矿井下 600 m 中段,Fl862602、Fl870104、Fl862903 为黄矿石,以黄铜矿、黄铁矿为主;Fl870306 为黑矿石,以方铅矿和闪锌矿为主;Fl870201、Fl870308a 为基性-超基性脉岩,主要矿物为蛇纹石和绿泥石。其余为太白金矿样品。太白金矿铂族元素的分布和内蒙古大井矿床的铂族元素分布相似,硫化物(矿石)中 Ru 富集,IPGE 和 PPGE 分异明显,具有深源的特点。

3.3 铂族元素的赋存状态和迁移机制

铂族元素在自然界一般以以下几种方式赋存:①纳米级单质或者合金;②独立的单质或者合金矿物,如八卦庙发现的钨钨矿;③硫化物;④以类质同象的形式存在,⑤配合物形式存在。太白金矿的成矿阶段包裹体均一温度为 200~336℃,盐度个别较高<sup>[12]</sup>,因而笔者选用 300℃ Pt-S-Cl-H<sub>2</sub>O 体系 logf<sub>O<sub>2</sub></sub>-pH 相图(图 6)<sup>[15]</sup>,本文所测得 Pt 在含金角砾岩以及其中的硫化物中的含量为 0.5~2.63 ng/g。从图 6 可以看出,在这种情况下 Pt 只可能以单质形式或 PtS<sub>2</sub> 形式赋存,而以 PtS<sub>2</sub> 形式存在 pH 值应该小于 2,显然在钠长岩不会有这么低的 pH 值,从表 2 可知 Pt 在角砾岩和硫化物中基本均匀分布,因而 Pt 可能以纳米级单质均匀分布在含金角砾岩中,PPGE 可能主要以这种方式存在,在该地区至今没有 PPGE 的单矿物发现也许就是因为 PPGE 主要以纳米级微粒存在,难以用现有手段查明。IPGE 在硫化物和钠长石中分布差异较大,IPGE 在硫化物中可能以硫化物、单质、合金或者其他化合物矿物形式存在,在产出环境相似的八卦庙金矿硫化物中发现 IPGE 的分布也是极不均匀,同时在该矿床发现的钨钨矿<sup>[6]</sup>证实了这种可能性是存在的。

4 结 论

(1) 太白金矿含金角砾岩的铂族元素比秦岭地区八卦庙金矿中千枚岩和含矿千枚岩中铂族元素含量高,相对于原始地幔而言,太白金矿角砾岩硫化物中 Ru、Pd 呈明显的正



异常,Rh、Pt、Os、Ir 亏损,全岩中 PGE 强烈亏损。

(2)太白金矿的铂族元素很有可能受来自于深源物质的影响。

(3)PPGE 主要以纳米级微粒存在,IPGE 在硫化物中可能以硫化物、合金或者其他化合物矿物形式存在。

## 参考文献(References):

- [1] 李胜荣,高振敏.华南下寒武统黑色岩系中的热水成因硅质岩[J]. 矿物学报,1996,16(4):416-422  
Li Shengrong, Gao Zhenmin. Silicalite of hydrothermal origin in the lower Cambrian black rock series of South China [J]. Acta Mineralogica Sinica, 1996,16(4):416-422(in Chinese with English abstract).
- [2] 刘家军,郑明华,刘建明.西秦岭寒武系层控金矿床中成矿元素富集规律[J]. 黄金地质,1999,5(4):43-50.  
Liu Jiajun, Zheng Minghua, Liu Jianming. Study on the enriching regularity of ore-forming element in the Cambrian stratabound gold deposits, Western Qinling [J]. Gold Geology, 1999,5(4):43-50 (in Chinese with English abstract).
- [3] 陈永清,夏庆霖,刘红光.滇东 Pt-Pd-Cu 含矿建造地球化学特征及其含矿性分析[J]. 中国地质,2003,30(3):225-234.  
Chen Yongqing, Xia Qinglin, Liu Hongguang. Geochemical characteristics of Pt-Pd-Cu ore-bearing formations in eastern Yunnan and analysis of their ore potentiality [J]. Geology in China, 2003,30(3):225-234(in Chinese with English abstract).
- [4] 肖启云,李胜荣,蔡克勤.湘黔下寒武统黑色岩系不同矿物组合中的铂族元素特征[J]. 中国地质,2006,33(5):1083-1091.  
Xiao Qiyun, Li Shengrong, Cai Keqin. Features of platinum-group elements in different mineral assemblages in the Lower Cambrian black rock series in Hunan and Guizhou [J]. Geology in China, 2006,33(5):1083-1091.
- [5] McDonough W F, Sun S S. The Composition of the earth [J]. Chemistry Geology, 1995,120:223-253.
- [6] 苏瑞侠,刘平,郭健,等.秦岭八卦庙金矿的矿化与铂族金属的富集[J].地质找矿论丛,2001,16(1):12-18.  
Su Ruixia,Liu Ping, Guo Jian, et al. The gold mineralization and PGE concentration of Baguamiao gold deposits in Qinling tectonic belt [J]. Contributions to Geology and Mineral Resource Research, 2001,16(1):12-18(in Chinese with English abstract).
- [7] Barnes S, Naldrett A J, Gorton M P. The Origin of the fractionation of platinum-group element in terrestrial magmas [J]. Chemical Geology, 1985. 53: 303-323.
- [8] 谢玉玲,徐九华,何知礼,等.太白金矿流体包裹体中黄铁矿和铁白云石矿物的发现及成因意义[J]. 矿床地质,2000,19(1):54-60.  
Xie Yuling, Xu Jiuhua, He Zhili, et al. The discovery of daughter minerals in fluid inclusions of the Taibai gold deposit and their genetic significance [J]. Mineral Deposits, 2000,19 (1):54~ 60 (in Chinese with English abstract).
- [9] 卢武长.稳定同位素地球化学[R].成都:成都地质学院出版发行组,1986.  
Lu Wuchang. Stable Isotope Geochemistry [R]. Chengdu:Chengdu Geology College Publishing Group (in Chinese),1986.
- [10] 郑作平,于学元,郭健.八卦庙金矿地质及稳定同位素研究[J]. 陕西地质,1994,12(2):22-30.  
Zheng Zuoping, Yu Xueyuan, Guo Jian. On the geology and stable isotopes of the Baguamiao gold deposit [J]. Geology of Shaanxi, 1994,12(2):22-30(in Chinese).
- [11] 储雪蕾,樊祺诚,刘若新,等.中国东部新生代玄武岩中超镁铁质的 CO<sub>2</sub> 包裹体的 C、O 同位素初步研究[J]. 科学通报,1995,40(1):62-64.  
Chu Xuelei, Fan Qicheng, Liu Ruoxin, et al. Based study on C, O isotope of CO<sub>2</sub> fluid inclusions in Cenozoic basalt, East China [J]. Chinese Science Bulletin, 1995, 40 (1):62-64(in Chinese).
- [12] 谢玉玲,徐九华,钱大益.太白金矿载金矿物标型特征 [J]. 北京科技大学学报,1997,19(3):223-227  
Xie Yuling, Xu Jiuhua, Qian Dayi. Characteristics of ore-bearing minerals and its genesis significance of Taibai gold deposit [J]. Journal of University of Science and Technology of Beijing, 1997, 19 (3):223-227( in Chinese with English abstract).
- [13] 石准立.双王—二台子型金矿矿床地质特征和成矿机制探讨[C]//中国东部金矿床地质研究文集.北京:地质出版社,1993.  
Shi Zhunli. The geological features and ore-forming mechanism of Shangwang-Ertai gold deposits [C]//Golden Deposit Geological Reseach. Beijing:Geological Publishing House,1993.
- [14] 储雪蕾,孙敏,周美夫.内蒙古林西大井多金属矿床矿石的铂族元素分布及物质来源[J]. 科学通报,2002,47(6):457-461.  
Chu Xuelei, Sun Min, Zhou Meifu. Distribution and origin of Platinum Group Element (PGE)of Dajing Cu-polymetallic deposit in Linxi County Inner Mongolia,China [J]. Chinese Science Bulletin, 2002,47(6):457-461(in Chinese).
- [15] Gammons C H, Bloom M S, YU Y. Experimental investigation of the hydrothermal geochemistry of platinum and palladium: I. Solubility of platinum and palladium sulphide minerals in NaCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions at 300°C[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, 56:3881-3894.

## Features of platinum-group elements (PGE) in gold-bearing breccia of the Taibai gold deposit, Shaanxi

QIU Shi-dong<sup>1</sup>, XU Jiu-hua<sup>1</sup>, XIE Yu-ling<sup>1</sup>, ZHU He-ping<sup>2</sup>, LIN Long-hua<sup>1</sup>

(1. Civil and Environment School, University of Science and Technology of Beijing, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The content of platinum-group elements (PGE) in samples of sulfides and gold-bearing breccia from the Taibai gold deposit was determined by the nickel sulfide fire assay and inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS). The results show that the PGE content in these samples is higher than that in the Baguamiao gold deposit, Qinling, but lower than that in the primitive mantle. Among the PGE, Pt, Pd and Ru are richer. According to the above-mentioned analysis, combined with the previous study of the sources and transport mechanism of the PGE, the authors think that the PGE may have been subjected to the deep sources, of which the IPGE (Ir, Os and Ru) might occur in the form of sulfides, while PPGE (Rh, Pt and Pd) might occur as simple substance.

**Key words:** platinum group element; deep source; transport way

---

**About the first author:** QIU Shi-dong, male, born in 1975, doctor student, mainly engages in the research on comprehensive utilization of mineral resources; E-mail: qiushidong@126.com.