

布什维尔德杂岩体 Platreef 矿床与金川铜镍硫化矿床微量元素地球化学特征对比及其意义

高 辉^{1,2} 王安建¹ 曹殿华¹ 李瑞萍¹ 王永磊¹

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 金川集团公司, 甘肃 金昌 737100)

摘要:采用 ICP-MS 方法分析了布什维尔德杂岩体 Platreef 矿床含矿岩石的主量及微量元素含量,并与金川铜镍硫化矿床进行对比研究。Platreef 矿床含矿岩石与金川二辉橄榄岩的 Σ REE 接近,球粒陨石标准化后的稀土元素(REE)均表现为轻稀土元素(LREE)富集、重稀土元素(HREE)平坦的右倾型配分曲线,但 Platreef 含矿岩石总体表现为正 Eu 异常,金川二辉橄榄岩与矿石样品则大部分表现为较强的负 Eu 异常,二者的差异实质上反映了成岩矿物斜长石与斜方辉石比率细微的变动。Platreef 矿床岩(矿)石富集和高度分异不相容元素, Nb、Ta 亏损,显示地幔柱岩浆受到地壳混染后,产生与弧苦橄岩相似的微量元素地球化学特征。金川含矿岩石富集 Fe 和 Ti 以及强不相容亲石元素,显示铁质玄武岩微量元素分布特征,虽然也可能受到地壳物质混染,但总体表现出含矿岩体母岩浆则可能来自 EMI 型富集地幔源区。Platreef 矿层原始地幔标准化后 Pt、Pd、Ru 富集, Ir、Rh 相对亏损的 PGE 配分型式以及 Cs、Rb、Th、U、LREE 等不相容元素和亲铜元素 Cu、Ni 的富集,暗示布什维尔德杂岩体岩浆源区残留地幔橄辉岩遭受含高度不相容元素的富矿流体的渗透混染即地幔交代,导致幔源岩浆发生 PGE 分异。

关键词:微量元素;地球化学;岩浆 Cu-Ni-PGE 矿床;布什维尔德杂岩体;金川

中图分类号:P595 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2009)02-0268-23

当今开采的含铂矿床一般都伴有贱金属硫化物。PGE 可以是主要产品(如布什维尔德杂岩体中 Merensky 矿层、UG2 矿层和 Platreef 矿床),也可以是开采铜-镍硫化物矿床(如金川铜镍矿)的副产品。布什维尔德杂岩体是世界上最大的层状镁铁-超镁铁岩侵入体,其中赋存最大的铂族元素、铬、铁-钛-钒矿床和低品位铜-镍硫化矿床。金川镁铁-超镁铁岩体出露面积仅 1.3 km²,而岩体矿化率高达 60%,其中赋存的金川硫化铜镍矿床以其巨大的 Cu-Ni-PGE 储量而著称于世,镍金属储量达 546×10⁴ t,位居世界硫化铜镍矿床之前三列,该矿床也作为中国最重要的伴生铂族元素矿床受到国内外地质学家的广泛关注^[1]。布什维尔德杂岩体 Platreef 型矿床产于层状镁铁-超镁铁杂岩体基底及围岩接触带,作为完全不同于 Merensky Reef 和 UG2 Reef

矿层的铂族金属和低品位铜-镍硫化矿床勘探和开采目标区,与金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床具有一定的相似性,二者均属典型的“岩浆 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床”。应用微量元素地球化学体系作为岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床成矿作用有效的示踪剂,示踪超镁铁质和镁铁质岩石演化与矿床成因,结合两类岩体中典型含铂岩浆矿床对比研究,有助于厘清镁铁-超镁铁杂岩体中不同矿化类型之间的成因联系以及贵(PGE、Au)贱金属(Cr、Ni-Cu)随着岩浆房中硅酸盐岩浆熔离和结晶分异、富集规律,并尝试分析总结成矿流体形成、演化、迁移、富集成矿及就位机制与成矿模式,对进一步指导“岩浆 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床”找矿实践具有重要意义。

前人对这两个矿床的微量元素地球化学特别是铂族元素地球化学进行过不少研究^[2-11]。但从比较矿

床学角度对各自微量元素地球化学特征进行对比研究相对欠缺。笔者通过对采自布什维尔德杂岩体 Platreef 型矿床的矿石样品主量元素、微量元素测试、分析, 在对前人有关金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床岩石样品分析测试数据重新整理的基础上进行对比分析, 结合两类矿床不同的构造环境、不同性质超镁铁质岩石的成矿作用进行研究, 这将有助于进一步认识这两类矿床的成因, 指导勘查找矿。

1 两种主要的铂族元素矿床类型及典型矿床对比

铂族金属矿床可根据铂族金属赋存的岩体特征、地球化学及铂族金属矿物特征, 划分为: (1) 镁铁质-超镁铁质层状岩体铂族金属矿床; (2) 镁铁质-超镁铁质 Cu-Ni 硫化物矿床伴生的铂族金属矿床; (3) Urals 杂岩体型铂族金属矿床; (4) 与蛇绿岩相关的铂族金属矿床; (5) 与热液相关的铂族金属矿床; (6) 外生型铂族金属矿床^[12-13]。其中前两类 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床占世界镍、铂开采量的一半以上, 占世界铜储量的 5.5%^[10,14-15], 是赋存 Cu-Ni-

PGE 的重要矿床类型^[16]。笔者仅将前两类与镁铁质-超镁铁质岩浆成矿作用有关的以硫化物为主的矿床^[17]作为重点, 以布什维尔德杂岩体 Platreef 矿床和金川硫化铜镍矿为例, 进行对比。

1.1 南非布什维尔德杂岩体及其 Platreef 矿床

南非布什维尔德 (Bushveld) 地区有超过 65000 km² 的火成岩出露, 火成岩活动时间为 2054~2057 Ma。整个火成岩组合从早到晚依次为: 早期 Rooiberg 群酸性熔岩流, 包括流纹岩、英安岩、安山岩和 Rashedoop 花岗斑岩等, 厚度达 5 km, 分布范围可达 1000 km; 中期吕斯滕堡 (Rustenburg) 镁铁质-超镁铁质层状侵入体岩套, 最厚可达 7000 m; 晚期 Lebowa 花岗岩套, 为 A 型花岗岩。

南非布什维尔德杂岩体——吕斯滕堡层状岩套, 是地球上面积最大也是最古老的杂岩体, 由粒状火山岩、镁铁和超镁铁堆晶岩组成, 成岩年龄为 2.06 Ga, 侵入到与 2.5~2.3 Ga 的 Transvaal 超群沉积地层接近平行的 Kaapvaal 克拉通中^[18-20]。杂岩体出露范围界定为三个弓形的支翼, 从目前钻探所知, 还存在第四翼 (图 1)。东侧翼和西侧翼可能连接在一起^[21]。

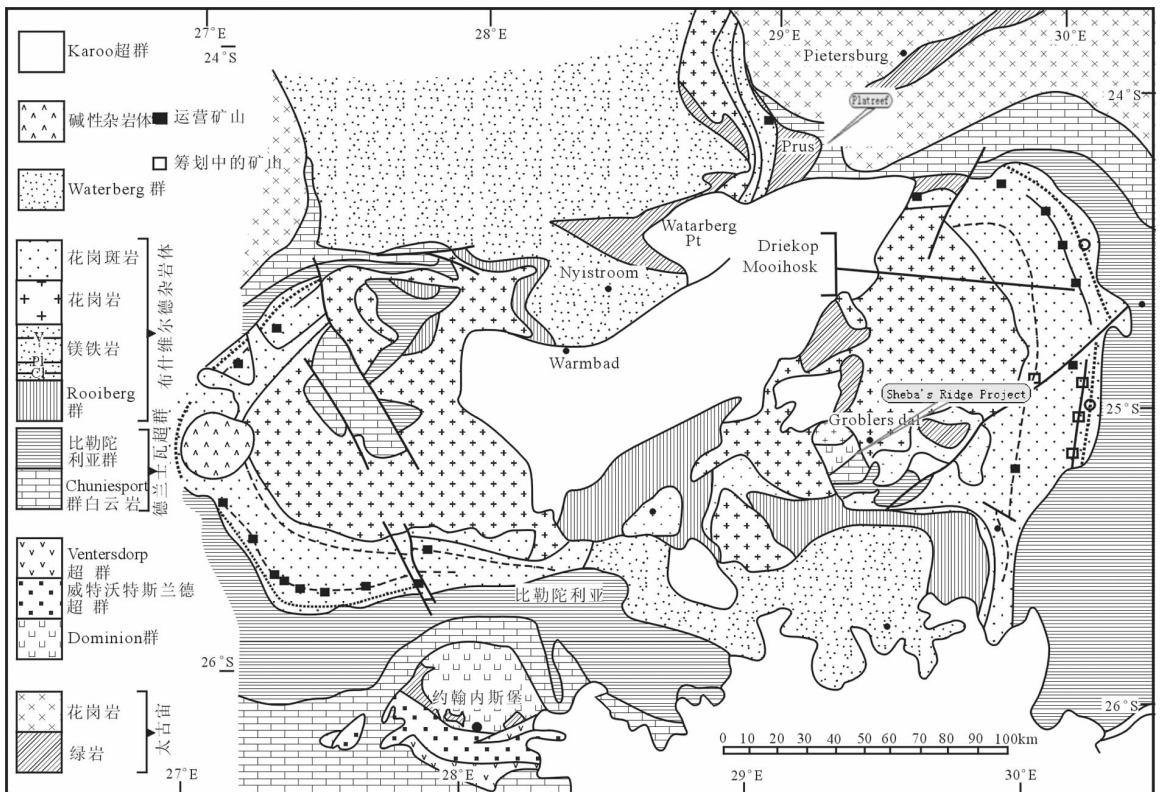


图 1 布什维尔德杂岩体及邻近地层综合地质图^[20]

Fig.1 Generalized geological map of the Bushveld Complex and adjacent strata^[20]

侵入体根据矿物组合(图2)自下而上分为如下几个岩带:(1)厚度较小的边缘带,主要由微晶苏长岩构成;(2)下带,主要由方辉橄榄岩、古铜辉岩和少量纯橄岩组成(矿物成分以斜方辉石为主,多于橄榄石),在富橄榄石地段,含有富铬贫铁尖晶石层;(3)层理发育良好的关键带,由古铜辉岩、方辉橄榄岩、苏长岩、斜长岩和含铂铬铁矿层组成(矿物成分为不同比例的斜方辉石、斜长石和铬铁矿);该带下部亚带古铜辉岩中含有LG1~LG6 铬铁矿层;上部亚带方辉橄榄岩、辉岩中含有UG1 和UG2 铬铁矿层,UG2 层中含有丰富的铂族金属;顶部辉岩、苏长岩中含梅林斯基层含铂硫化物矿层;(4)主带,主要由辉长岩、苏长岩和斜长岩组成(矿物成分为斜方辉石、单斜辉石和斜长石,有隐层理);(5)间歇成层的上带,由含磁铁矿辉长岩、橄榄岩、橄长岩组成(矿物成分为斜长石、辉石、磁铁矿、橄榄石以及多相磷灰

石),含3层磁铁矿层。下带和关键带在东、西两侧翼往南尖灭^[21],在北侧翼向北也趋于尖灭^[22]。

在矿物成分方面,橄榄石和辉石的镁比值——定义为 $Mg/(Mg+Fe^{2+})$,在下带高达0.90,而在上带顶部则趋近于0;斜长石中钙长石(An)含量范围则从关键带的An80 变动为上带的An30^[22]。矿物成分几乎反映了一个完整的分异作用产物的范围。

布什维尔杂岩体中的铬铁矿、铂族金属以及低品位镍铜储量都非常巨大。铂族金属矿化主要发育在4个不同部位:UG2 (Upper Group 2) 铬铁矿层、梅林斯基(Merensky Reef)层、Potgietersrus 区的Platreef 以及 Onverwacht、Mooihoek 和 Driekopde 的纯橄岩岩筒中。布什维尔杂岩体每一层铬铁矿层都异常富集PGE,但UG2 是连续性最好并且最富铂族金属的铬铁矿层,PGE 含量为 $4 \times 10^{-6} \sim 19 \times 10^{-6}$,包含了布什维尔杂岩体50%以上的铂族金属资源,成为目前世界上最大的铂族金属资源产地。UG2 矿层中铂族矿物与铬铁矿共生,UG2 矿层和 Merensky Reef 矿层铂族金属矿物也与硫化物及硅酸盐矿物共生。与其他几个铂族金属矿层(带)相比,UG2 铜和镍值非常低($<0.05\%$),硫含量也低(0.02%),Pt、Pd、Cu、Ni 含量和S 均呈正相关关系^[23]。梅林斯基矿层和 Platreef 矿层的铂族金属都与Ni、Cu 硫化物伴生,这两个层位和地段既是巨大的铂族金属矿化层位,也是巨大的低品位镍铜储量主要产出层位。

典型的 Merensky Reef 矿层中含有大约3%的硫化物(磁黄铁矿>黄铜矿>镍黄铁矿),Ni、Cu 品位分别为0.3% 和0.15%^[24-25],PGE 含量为 $5 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$ 。Barnes^[3] 描述了 Merensky 矿层中所有PGE 与Ni、Cu 和S 的相关性。

Platreef 矿层代表完全不同于 Merensky 矿层和UG2 矿层的勘探和开采目标区^[24]。该矿层位于布什维尔杂岩体的北支翼,通常把从 Potgietersrus 南面往北超过60 km 的地段出现的下带也可能关键带岩层中形成的厚度10~400 m 的矿化带,称 Platreef 矿层,由含PGE 和贱金属硫化物(BMS)矿化的辉岩序列组成^[2]。Platreef 矿层南侧被 Transvaal 超群沉积岩所覆盖,北侧往深部切穿石英岩、条带状铁矿石建造以及白云岩,最终侵位于太古宙花岗片麻岩基底之上。苏长岩和辉长苏长岩上覆于 Platreef 矿层,这与杂岩体另外两个主要支翼具有相似性(图1,图3)。

Platreef 矿层岩石组合以长石质辉岩为主,在南

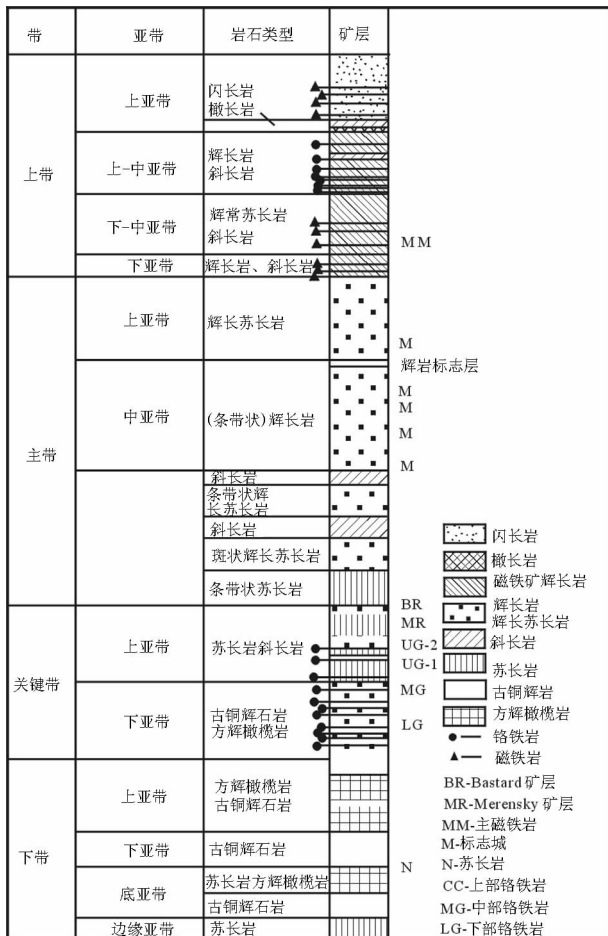


图2 南非 Bushveld Rustenburg 层状岩体柱状剖面^[13]

Fig.2 Bushveld Rustenburg layered suite section in South Africa^[13]

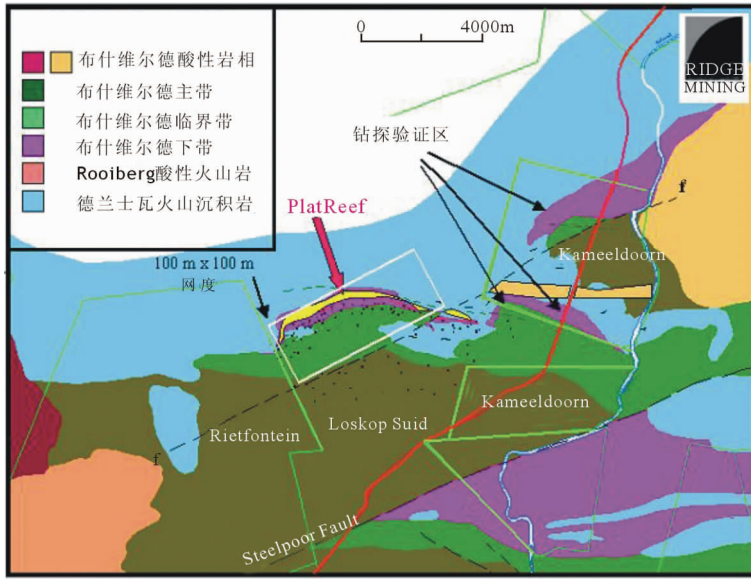


图 3 Sheba's Ridge 项目 Platreef 矿床地质简图^[29]
Fig.3 Geological setting of the Sheba's Ridge project^[29]

部也存在苏长岩以及橄长岩。总体由中粒至粗粒的辉岩、暗色苏长岩和苏长岩序列组成,局部呈似伟晶状并遭受蛇纹石化,含大量的变质沉积物捕虏体(图 4)。南部矿层较厚地段,层理发育较弱。岩石组合不同程度存在含硫化物铂族元素矿化, Pt+Pd+Rh+Au 合计平均品位可能超过 3g/t。通常以矿层相对较薄、品位更低、垂向上品位分布不规则更为典型^[23]。在一些矿床案例中,比如 Sandsloot 露天矿,基底品位更高,而到北部如 Overysel 矿床,矿层中可能产出

高品位矿化。铜、镍含量比 Merensky 矿层高,与硫含量呈正相关,但铂族金属元素不一定与硫含量正相关。硫化物(伴生有铂族元素)不均一地分布于 Platreef 中,很少达到岩石的 5%。它们或呈斑点状和浸染状沿底盘分布,或作为无经济意义的浸染体产于未蚀变的火成岩中,或作为富集体产于白云岩捕虏体接触变质带中,或在蛇纹岩化带中呈品位较高的富集体。厚度由数十厘米到 2 m 的块状硫化物富集体罕见于紧靠基底接触带和角砾岩化接触带中。

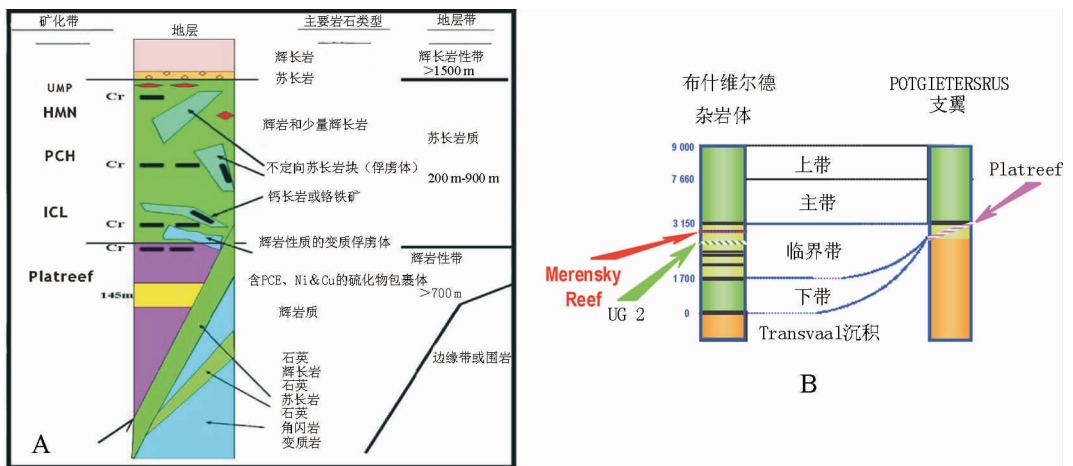


图 4 Platreef 地层剖面(A)及其与布什维尔德杂岩体层序对应关系(B)^[29]
Fig.4 Stratigraphic sections of the Platreef deposit at Potgietersrus (A) and corresponding relationship with stratigraphic sequence of the Bushveld Complex (B)^[29]

有时矿层上部出现最高品位。主要贱金属硫化物依次为磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿，局部还有黄铁矿以及少量方黄铜矿、闪锌矿、斑铜矿、针镍矿、赤铜矿、方铅矿、硫锰矿等。铂族元素硫化物趋于产在 Platreef 底部附近，而银金矿和等轴铁铂矿，如存在的话，趋于产在顶部。铂族金属矿物以 PtFe, Pt₃Sn 合金和各种各样 Pd 或 Pt 的碲化物、铋化物、砷化物、锑化物，以及更复杂的铋碲化物形式存在，Pt/Pd 值约为 1，大量的钯呈固溶体产于镍黄铁矿中^[27]。

除杂岩体北分支外，广义上与 Platreef 中发现的类似的基底 PGE 矿化最近在矿物系列 (Mineral Range) 中也有描述^[26,28]。Ridge Mining 矿业公司所属 Sheba's Ridge 铂镍矿项目地处南非 Mpumalanga 省 Groblersdal 镇西南方向以南 20 km (图 1)，是南非布什维尔德杂岩体最早发现铂族元素矿化的地

区。该地区产出的 Platreef 型矿化位于构成 Groblersdal 群核心部分的 Dennilton 穹隆南部边缘，Transvaal 超群侧伏于其北面 (图 3)。目前钻孔查明和验证该矿床虽然不完全等同，但也类似于 Potgietersrus 的 PlatReef 矿床，或者类似于 Sudbury 式的岩浆贱金属硫化物矿床和 Stillwater 杂岩体的下部带^[29]。基于 Platreef 矿层是布什维尔德杂岩体中典型的含 PGE 和贱金属硫化物 (BMS) 矿化的辉岩-辉长岩型岩浆 Cu-Ni-PGE 矿床^[16]，故选择其与金川铜镍硫化矿床进行对比。

1.2 金川 Cu-Ni-PGE 矿床

中国金川 Cu-Ni-PGE 矿床的含矿镁铁-超镁铁岩体侵位于华北古陆阿拉善陆块西南缘龙首山隆起中，属于龙首山镁铁质-超镁铁质岩带的一部分 (图 5-a、b)。龙首山地区岩浆活动以花岗岩类为主，

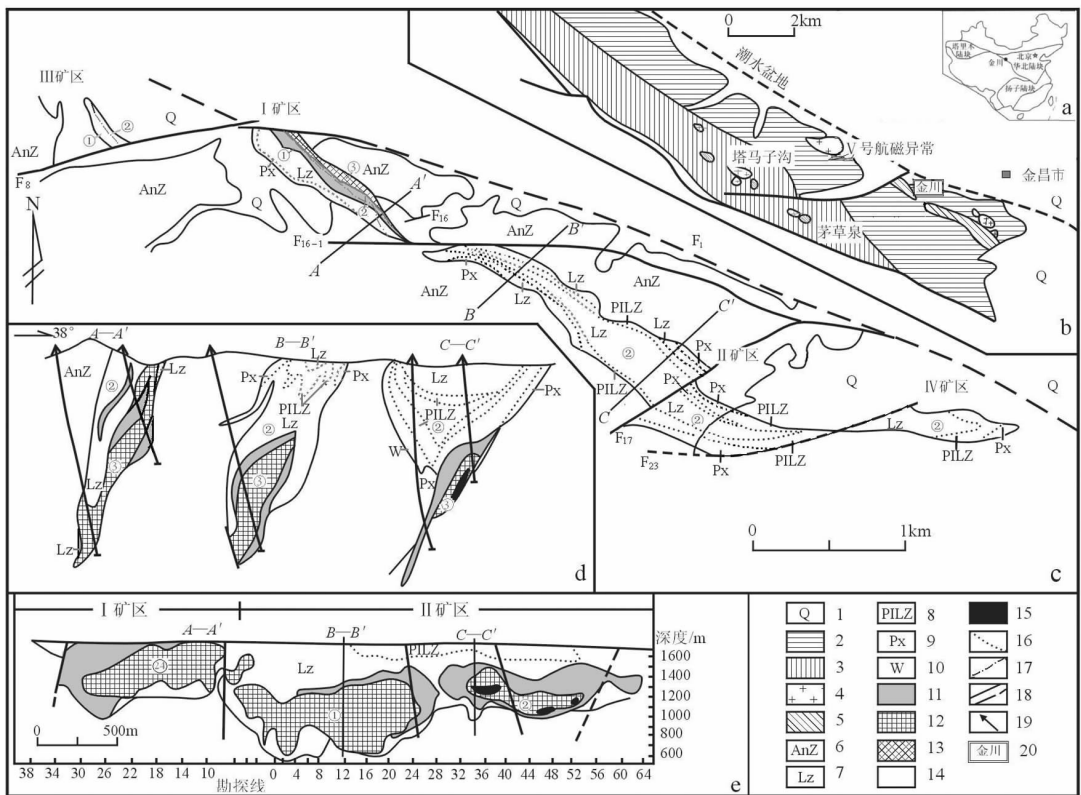


图 5 金川铜镍矿地理位置(a,b)、地质平面图(c)剖面(d)、矿床剖面图(据文献[5,6,10]修编)

- 1—第四系；2—龙首山群白家嘴子组；3—龙首山群塔马子沟组；4—花岗岩；5—镁铁超镁铁侵入体；6—前寒武系
- 7—二辉橄榄岩；8—斜长二辉橄榄岩；9—橄榄二辉岩；10—二辉岩；11—浸染状矿体；12—网脉状结构富矿；13—氧化矿；
- 14—接触交代型矿体；15—块状硫化矿；16—岩浆岩相接触；17—分期接触带；18—实测和推测断层；19—钻孔；20—金川铜镍矿

Fig. 5 Location (a, b), geological plan (c), section (d) and vertical projection (e) of the Jinchuan ore deposit

- 1—Quarternary; 2—Baijiazuizi Formation of Longshoushan Group; 3—Tamazigou Formation of Longshoushan Group; 4—Granite;
- 5—Mafic-uitramafic intrusion; 6—Precambrian; 7—Lherzolite; 8—Plagioclase lherzolite; 9—Olivine websterite; 10—Websterite;
- 11—Disseminated ore; 12—Stockwork rich ore; 13—Oxidized ore; 14—Contact metasomatic ore body; 15—Massive sulfide ore;
- 16—Magmatic facies contact; 17—Stage contact; 18—Measured and inferred faults; 19—Drill hole; 20—Jinchuan Ni-Cu(PGE)deposit

古元古代花岗岩分布面积大,多呈岩基出现;镁铁质-超镁铁岩体主要发育于中、新元古代,岩体呈北西西向带状展布,以岩墙状、脉状及岩株状断续散布于龙首山地区,构成一个重要的镁铁质-超镁铁质岩带,由百余个岩体组成,其成岩构造环境为大陆裂陷盆地,主要岩石组合为橄榄岩-辉石岩-辉长岩,成矿类型为 Ni-Cu-PGE,以辉石岩-单辉橄榄岩、单辉或二辉橄榄岩-辉石岩型岩体为主^[5,6]。金川 Cu-Ni-PGE 矿床含矿岩体基岩出露面积约 1.34 km²,长约 6500 m,宽 20~527 m,走向北西 300~330°,沿走向中间较宽,两端较窄,延深数百米至 1000 m 左右,东段平缓,中、西段陡倾,呈不规则状岩墙状侵入于龙首山隆起结晶基底古元古代龙首山群中(图 5-c)。古元古界龙首山群以混合岩、片麻岩、片岩和大理岩为主构成一个向南东倾斜的单斜层序,在西南部被新元古界的砾岩、砂岩、灰岩和片岩覆盖^[5,6,10]。金川岩体是由含硫化物纯橄榄岩、二辉橄榄岩、斜长二辉橄榄岩及橄榄辉石岩组成的多岩相岩体(图 5-d),前两个岩相带为主要含矿岩相。岩石普遍具堆积结构,堆积矿物以橄榄石(Ol)为主,还有铬尖晶石(Sp)和单斜辉石(CPX)。据 Chai 等研究,铬尖晶石多呈橄榄石包裹体产出,系橄榄石铬铁矿堆积结构,铬铁矿结晶早于橄榄石或与其同时;亏损 Ni、Co,富集 Al、Ti。填隙矿物包括单斜辉石(CPX)、斜方辉石(OPX)、斜长石(Pl)、硫化物和少量 Sp 等^[2]。探明 3 个有巨大工业储量的 Cu-Ni-PGE 硫化物矿体,自西向东分别为 24 号、1 号和 2 号矿体。3 个矿体互不相连(图 5-e),产状各异。24 号矿体与 1 号矿体在横剖面上的共同特征是岩相呈对称分异(图 5-c、d);2 号矿体赋存于岩体底部,岩相具垂直分带(图 5-d、e)。Cu-Ni-PGE 硫化物呈星点状、浸染状、海绵陨铁状赋存于二辉橄榄岩和纯橄榄岩中,局部富集成块状矿石^[30]。该岩体 Cu、Ni 及贵金属平均含量较高,铜镍矿石品位 Ni 为 1.2%,Cu 为 0.7%^[2]。其各类型岩石的 CaO、Al₂O₃、NiO 含量亦较高,M/F<5.5,属铁质岩浆系列成分,MgO 含量除个别辉石岩较低外,其余皆为 20%~33.9%^[31]。

金川超基性岩体中 PGE 分布总趋势从中部向岩体的东部和西部变贫,而中部最富。Cu-Ni-PGE 矿床铂族金属主要富集于 24 号矿体和 1 号矿体的铂钯富集体中。铂族元素总量(Σ PGE)为 239.0 $\times 10^{-9}$ ~1019.0 $\times 10^{-9}$,平均 538.8 $\times 10^{-9}$,铂钯富集体中

Σ PGE 最高可达 10 $\times 10^{-6}$,一般为 3 $\times 10^{-6}$ ~4 $\times 10^{-6}$ ^[32]。含硫化物岩石 PGE 含量比不含硫化物的岩石高,铜镍富矿石又比铜镍贫矿石高,Pt、Pd 富集度比 Os、Ir、Ru、Rh 高,全矿床整体上相对富集 Pt、Pd^[32]。矿床主要铂族矿物是砷铂矿和铋铈钨矿物,其他含铂矿物还包括铂的自然元素及金属互化物、铋化物、碲化物等。Chai 和 Naldrett^[2]认为,金川岩体的原始岩浆并非超基性的而是镁质玄武岩,其 MgO 和 FeO 含量分别为 12%和 11.5%,Ni/Cu 值约为 1.5,辉长岩型铂族元素矿化,(Pt+Pd)/(Ru+Ir+Os)值高。

2 样品采集、测试及分析结果

两组钻孔岩心取自 Ridge 矿业公司在南非布什维尔德杂岩体东翼希巴斯岭(Sheba's Ridge)的 platreef 型矿层。钻孔岩心为相对厚度较大并包含一些俘虏体和侵入苏长岩以及薄层片麻岩的一整套辉岩标本。岩矿标本均未发生蚀变,共 6 件,岩石中的金属矿物以肉眼可见的硫化物为主,包括磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿等。部分测试在核工业地质测试研究中心进行,依据 GB/T14506.28-93 硅酸盐岩石化学分析方法用飞利浦 PW2404 X 射线荧光光谱仪测定主、次元素量,并采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)方法,使用 Finnigan MAT 生产的 ELEMENT 型等离子质谱仪分析检测了 47 项微量元素,分辨率 300,RF 功率 1.25 kW,检出限可达(0.000x~0.00x) $\times 10^{-6}$ 。本次研究铂族金属由国家地质实验测试中心采用新的高精度 ICP-MS 测试方法,分析了矿石样品中的 PGE 含量。具体分析流程为:将待测样品与碳酸钠、硼酸钠、硼砂、玻璃粉、硫磺及面粉混合,倒入坩埚中,加入适量钨稀释剂在 1150 °C 高温炉内熔融,将熔体倒入铁模中冷却取出钨扣,用 HCL 溶解镍扣滤出不溶物,接着在封闭溶样器中用王水溶解滤渣,最后在 ICP-MS 上测定 Pt、Pd、Os、Ir、Ru 和 Rh。该方法分析精度为 RSD $\leq 10\%$ 。样品所有测试数据根据对比研究工作需要统一分类整理见表 1。

3 微量元素地球化学特征及对比

3.1 稀土元素

从 Sheba's Ridge 两组钻孔岩心中切取的 Platreef 矿层样品中稀土元素分析结果(表 1)及特征值(表 2)可以看出:所有样品的稀土元素质量分

表 1 布什维尔德杂岩体 Platreef 矿层全岩分析结果
Table 1 Whole rock analyses of the Platreef deposit in Bushveld Complex

样号	岩性	结构	主量元素/%														稀土元素/ 10^{-6}	
			Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	烧失量	FeO	La	Ce		
P1	辉岩	中细粒	18.06	47.94	9.61	0.61	0.24	10.03	8.58	3.12	0.14	0.053	0.76	6.56	7.19	12.9		
P2	长石质辉岩	斑杂/变晶结构	16.38	49.5	9.14	0.59	0.26	11.03	8.14	2.47	0.14	0.045	1.25	7.68	7.69	14.2		
P3	长石质辉岩	斑杂/变晶结构	17.68	48.96	9.53	0.65	0.37	9.9	7.45	3.45	0.14	0.079	0.89	6.64	12	21.3		
P4	辉岩	中细粒	15.25	45.94	9.55	0.49	0.39	13.24	7.35	2.52	0.11	0.088	2.01	8.4	10.4	18.9		
P5	长石质辉岩	斑杂/变晶结构	18.51	46.18	10.46	0.59	0.24	9.89	7.3	3.59	0.13	0.053	1.35	7.24	6.99	13.2		
P6	辉岩	细粒/浸染矿化	7	41.41	4.78	0.33	0.27	19.51	21.05	0.5	0.2	0.035	3.01	9.92	4.66	8.7		
样号	岩性	结构	稀土元素/ 10^{-6}															
P1	辉岩	中细粒	1.67	6.28	1.27	0.672	1.26	0.244	1.33	0.275	0.876	0.123	0.992	0.12	1.39	212		
P2	长石质辉岩	斑杂/变晶结构	1.87	7.19	1.57	0.677	1.53	0.288	1.63	0.354	1.05	0.162	1.16	0.157	1.27	207		
P3	长石质辉岩	斑杂/变晶结构	2.71	10.3	2.06	0.806	1.95	0.357	2.01	0.397	1.22	0.176	1.28	0.161	1.33	230		
P4	辉岩	中细粒	2.44	9.59	1.83	0.667	1.84	0.32	1.86	0.392	1.11	0.156	1.34	0.147	1.07	162		
P5	长石质辉岩	斑杂/变晶结构	1.76	7.08	1.62	0.711	1.61	0.297	1.61	0.326	1.03	0.15	1.15	0.14	1.27	212		
P6	辉岩	细粒/浸染矿化	1.08	4.34	0.809	0.334	0.921	0.167	1.06	0.224	0.696	0.105	0.845	0.101	0.78	83.7		
样号	岩性	结构	不相容微量元素/ 10^{-6}															
P1	辉岩	中细粒	Rb	Th	Nb	Ta	Sr	Zr	Hf	U	Re	Sc	V	Cr	Co	Ni		
P2	长石质辉岩	斑杂/变晶结构	21.4	1.14	1.5	0.099	257	40.2	1.08	0.292	3	29.3	145	474	77.9	1097		
P3	长石质辉岩	斑杂/变晶结构	19.6	1.17	1.58	0.11	242	59.3	1.56	0.303	8	30.4	142	311	106	2498		
P4	辉岩	中细粒	22.7	1.81	2.82	0.186	264	83.9	2.07	0.405	4	30.6	146	359	66.5	784		
P5	长石质辉岩	斑杂/变晶结构	18	1.99	2.83	0.199	228	114	2.8	0.512	44	29.6	151	1064	306	11020		
P6	辉岩	细粒/浸染矿化	19.4	1.13	1.29	0.084	251	65.1	1.65	0.273	14	34.1	178	1400	121	3236		
			9.12	0.708	0.974	0.062	74.3	34.3	1.03	0.176	19	23.4	149	3244	218	6204		
样号	岩性	结构	铂族金属/ 10^{-9}															
P1	辉岩	中细粒	Cu	Zn	Ga	As	Se	Bi	Sb	Pb	Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd		
P2	长石质辉岩	斑杂/变晶结构	778	71.3	15.7	4.29	0.607	0.317	0.125	7.06	0.81	1.14	4.29	7.4	86.1	284		
P3	长石质辉岩	斑杂/变晶结构	1467	81.2	14.9	3.38	0.441	0.945	0.219	13.6	1.5	3.17	10.7	25.1	289	978		
P4	辉岩	中细粒	689	76.8	16.2	5.63	0.311	0.535	1.68	14.7	0.73	0.49	3.72	5.13	15	173		
P5	长石质辉岩	斑杂/变晶结构	4577	100	14.3	7.02	1.28	2.34	0.484	26.3	10.7	18.6	72.5	130	498	4230		
P6	辉岩	细粒/浸染矿化	1608	75	15.3	6.46	0.502	1.5	0.415	17.2	3.98	5.72	20.2	35.1	250	1220		
			2566	104	7.9	4.36	0.862	1.57	4.91	7.85	5.49	10.8	34.5	66.8	681	2390		

表 2 布什维尔德杂岩体 Platreef 矿层稀土元素特征值
Table 2 REE contents of rocks from the Platreef deposit of Bushveld Complex

岩石类型	辉岩	长石质辉岩	辉岩	长石质辉岩	长石质辉岩	辉岩
样品编号	P1	P2	P3	P4	P5	P6
\sum REE	35.202	39.528	56.727	50.992	37.674	24.042
LREE	29.982	33.197	49.176	43.827	31.361	19.923
HREE	5.22	6.331	7.551	7.165	6.313	4.119
LREE/HREE	5.744	5.244	6.513	6.117	4.978	4.837
δ Eu	1.607	1.320	1.212	1.101	1.332	1.180
δ Ce	0.866	0.876	0.865	0.874	0.884	0.902
(La/Lu) _N	6.224	5.088	7.742	7.349	5.186	4.792
(La/Sm) _N	3.561	3.081	3.664	3.575	2.714	3.623
(Gd/Yb) _N	1.025	1.064	1.229	1.108	1.130	0.880
(La/Yb) _N	4.887	4.469	6.321	5.233	4.098	3.718

数为 $24.042 \times 10^{-6} \sim 56.727 \times 10^{-6}$, 是球粒陨石的 8~19 倍。LREE/HREE 值为 $4.837 \sim 6.513$, 明显富集轻稀土元素; (La/Sm)_N 值均大于 1, 为 $2.714 \sim 3.664$; 轻稀土元素分馏明显, 属中等分馏程度; 重稀土元素亏损, (Gd/Yb)_N 值大部分 >1 而 <2, 反映出重稀土元素分馏不明显; δ Eu 均大于 1, 为 $1.101 \sim 1.607$, 表现为不明显到明显的正铕异常, 说明斜长石或钾长石结晶作用的存在; δ Ce 值的变化范围为 $0.865 \sim 0.902$, 基本未显示铈异常。

球粒陨石标准化后的稀土元素(REE)配分模式(图 6)显示: 相对更容易分馏的轻稀土元素(LREE)较重稀土元素(HREE)强烈富集, LREE 与 HREE 相对分异, 总体呈右倾斜的槽形, 重稀土元素中从 Ho 到 Lu 逐渐正倾斜。

王瑞廷^[1]对金川含矿超基性岩体及其矿石的稀土元素地球化学已进行过一些研究表明金川岩体橄榄二辉岩、橄榄辉石岩及辉岩岩相 \sum REE 总量较高, 为 $42.43 \times 10^{-6} \sim 63.9 \times 10^{-6}$, 含矿二辉橄榄岩 \sum REE 为 $16.71 \times 10^{-6} \sim 43.80 \times 10^{-6}$, 轻重稀土分异明显, (La/Yb)_N 变化范围为 $2.8 \sim 12.69$, δ Eu 为 $0.75 \sim 1.03$, δ Ce 为 $0.93 \sim 1.05$, 表现出 LREE 富集, 大多为负 Eu 异常的特征。负 Eu 异常反映存在富 Eu 斜长石的分离结晶作用, 部分样品正 Eu 异常可能是角闪石、单斜辉石、斜方辉石引起的。

矿石的 \sum REE 为 $4.13 \times 10^{-6} \sim 43.07 \times 10^{-6}$, (La/Yb)_N 变化范围为 $2.46 \sim 49.21$, δ Eu 为 $0.55 \sim 1.54$, δ Ce 为 $0.94 \sim 1.51$, 总体与二辉橄榄岩的特征

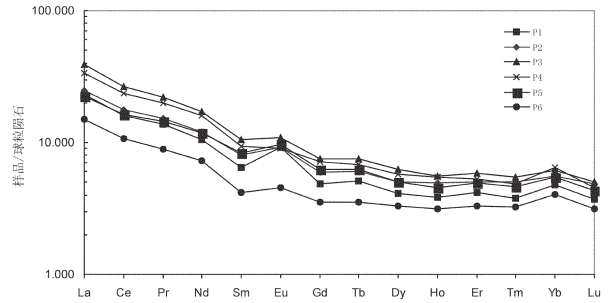


图 6 布什维尔德杂岩体 Platreef 矿层球粒陨石标准化的稀土元素配分模式

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns of rocks from the Platreef deposit of Bushveld Complex

相似, 但各项特征值较二辉橄榄岩有更大的变化范围, 并且同一岩相内随着从局部海绵陨铁状—海绵陨铁状—块状矿石构造的改变和品位的变富, LREE/HREE 值逐渐变大($3.52 \sim 7.36 \sim 11.13$), 反映了含矿岩体从母岩浆熔离分异过程中硫化物 REE 分馏程度逐渐增加, 也表明早期熔离的铜镍硫化物矿石的 REE 分馏程度低于晚期。另外, 二辉橄榄岩与矿石中出现的 Gd 异常也可能反映成岩成矿过程中有地壳物质的混入。金川岩体矿化纯橄岩(89J2-15)有 Ce 正异常, δ Ce 高达 11.57, 个别二辉橄榄岩样品存在 Ce 负异常, 说明铜镍含矿岩体中存在与后期热液作用有关的蚀变, Ce 负异常有可能是后期热液流体改造作用的结果。

金川铜镍矿含矿岩石与矿石稀土元素(REE)配分模式(图 7)为一组基本相似近于平行的右倾曲线。LREE 相对于 HREE 的分馏可能是由于橄榄石、斜方辉石和单斜辉石的存在引起的。

从图中可以看出, Platreef 矿层样品和金川二辉橄榄岩与矿石样品标准化的稀土元素配分模式总体相似, 均表现为 LREE 相对于 HREE 分馏的右倾曲线型式。但二者最大的差别在于: Platreef 矿层样品总体表现为正 Eu 异常, 而金川二辉橄榄岩与矿石样品则大部分表现为较强的负 Eu 异常, 只有个别表现为正 Eu 异常。这一差异实质上反映了斜长石与斜方辉石比率细微的变动。Eu 异常受控于富 Eu 斜长石的分离结晶, 通常引起熔浆中 Eu 的负异常, 而斜方辉石的作用刚好相反, 是造成正 Eu 异常的主要原因。在超镁铁堆晶体中, 斜方辉石含量较单斜辉石含量更丰富, 并且从晶出顺序上也先于斜长

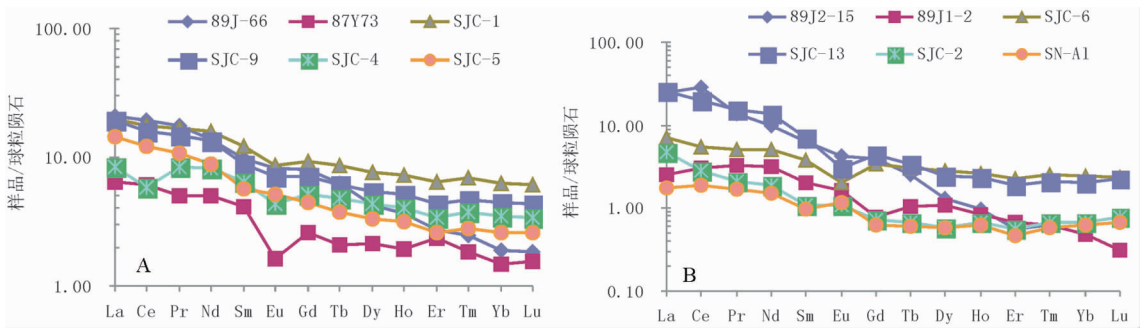


图7 金川铜镍矿岩石(A)、矿石(B)稀土元素配分模式(据文献[31]数据绘制)

89J-66—斜长二辉橄榄岩;87Y73—纯橄岩;SJC-1、SJC1-9、SJC-4、SJC-5—二辉橄榄岩;
89J2-15、89J1-2—海绵陨铁状矿石;SJC-6、SJC-13、SJC-2、SN-A1—矿石

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns of rocks(A)and ores (B) from the Jinchuan Cu-Ni-PGE deposit
Note:89J-66-Plagioclase lherzolite; 87Y73-Dunite; SJC-1, SJC1-9, SJC-4, SJC-5-lherzolite; 89J2-15, 89J1-2-Spongy meteoritic iron; SJC-6, SJC-13, SJC-2, SN-A1 -Ore

石。金川二辉橄榄岩和矿石样品与 Platereef 矿层样品标准化的稀土元素配分模式对比说明岩浆熔离及结晶分异作用中, Eu 的载体矿物斜长石的结晶析出对硫化物分馏和矿质富集有利。此外,不同成因矿石与岩石具有相似的稀土配分模式,说明成岩成矿过程中具有相似的分异作用。

3.2 过渡金属及其他不相容微量元素

从布什维尔德杂岩体 Platereef 矿层 6 件样品过渡金属元素及其他不相容微量元素分析结果(表 1)以及微量元素蛛网图(图 8)来看,Platereef 具有较高的不相容元素 Rb、Th、Sr、Zr、Hf、Sc、V 以及亲铜元素 Cu 和 Ni 含量,尤其以 Rb、Th、Sr 和 Ba 比较典型,相容元素 Cr 和 Zn 含量较低,同时具明显的 Nb、Ta 负异常。Harris 等^[54]也注意到 Platereef 矿层往上 Cr 集中度显示普遍增加,不相容微量元素 Y 和

Zr 随高度增加递减。由上述微量元素化学数据暗示的情况,证明 Platereef 矿层发育相对更早。

王瑞廷^[31]对金川矿区不同类型岩、矿石的过渡族元素与不相容元素的测试研究及其各自原始地幔标准化配分模式图(表 3~4,图 9~10)显示,金川铜镍矿岩、矿石均出现 Ti、Cu 的高峰、Ni 的低谷,表现出铁质超基性岩的微量元素分布特征。与球粒陨石平均组成相比,金川岩体中的 Ni、Co、Cu 均有一定的富集,但 Cr 则显著亏损。骆华宝等^[31]认为 Cr 的亏损表明其部分熔融程度尚不足以形成含 Cr 岩浆。由于金川含矿岩体是在地壳较薄的大陆构造环境由上地幔部分熔融程度较高的熔浆形成,其过渡族元素丰度及分配型式与地幔有较大差异,显示出由准玄武质岩浆分熔形成的一些特征,其二辉橄榄岩具有较高的 Cr、Ni 值,与原始地幔的过渡金属元素含

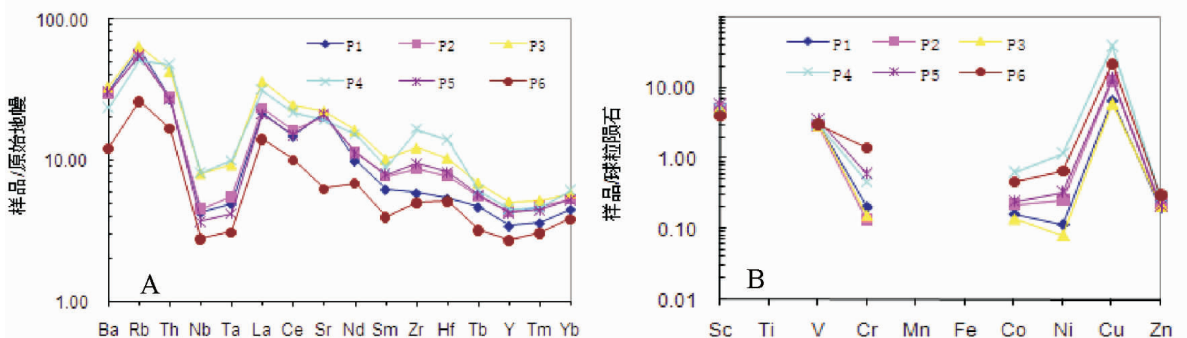


图8 布什维尔德杂岩体 Platereef 矿石原始地幔标准化的不相容元素(A)和过渡金属元素(B)图解

Fig.8 Mantle-normalized immiscible trace elements (A) and transition metals (B) spider diagrams of rocks from the Platereef deposit of Bushveld Complex

表 3 金川矿区不同类型岩、矿石过渡金属元素含量/ 10^{-6}

Table 3 Transition metal contents of various rock types in the Jinchuan ore district

样品编号	岩(矿)石性质	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
SJC-1	二辉橄榄岩	23.36	3948.57	161.58	4137	1316.90	112318.89	250.05	5266.77	3574.14	115.95
SJC-4	二辉橄榄岩	14.57	2880	91.12	4067	1316.90	99563.33	131.32	775.35	65.65	125.67
P2	岩体组合样		727	71	3060	2215	62300	412	3780	91	218
SJC-6	块状矿石	8.60	1508.57	67.77	5475	929.58	15928.11	544.43	15831.51	14879.39	176.75
	原始地幔	17	1300	77	3140	1010	60800	105	2110	28	50

注:SJC-数据出自王瑞廷^[31];原始地幔据 Jagoutz,et al(1979)。

表 4 金川矿床岩、矿石不相容元素含量/ 10^{-6}

Table 4 Immiscible trace element contents of various rock types in the Jinchuan deposit

样品编号	II -W -16	II -W -7	II -W -10	SJC -1	SJC -4	SJC -6	原始地幔
岩性	Lz	OLPx	OLPx	Lz	Lz	Ore	
Cs/ 10^{-6}	2.06	1.96	1.77	0.66	0.94	0.61	0.023
Rb	22.5	20.6	20.3	5.37	8.41	3.64	0.635
Th	0.33	0.75	0.78	0.914	0.598	0.337	0.084
U	0.04	0.17	0.2	0.188	0.119	0.077	0.021
K	4231.91	4148.94	4065.96	1161.7	1493.62	580.85	240
Nb	2.7	4.4	4.6	3.27	1.99	1.52	0.713
La	2.15	3.72	3.94	6.228	2.615	2.194	0.708
Ce	5.57	12.84	12.58	14.036	6.459	4.602	1.883
Sr	56.4	90.7	92.4	147.48	57.99	28.58	21.1
Nd	3.36	5.86	7.28	9.626	4.91	3.103	1.336
P	130.99	261.97	261.97	305.63	218.31	261.97	
Hf	0.4	1.43	1.27	3.055	1.609	0.945	0.309
Zr	19.1	48.3	47.3	69.07	40.31	28.33	11.2
Sm	0.68	1.68	1.67	2.344	1.262	0.748	0.444
Ti	1260	3120	3120	3948.57	2880	1508.57	1280
Tb	0.16	0.28	0.24	0.408	0.226	0.145	0.108
Y	4.7	10.5	10.3	13.55	7.91	5.36	4.55
Yb	0.41	0.79	0.86	1.297	0.729	0.508	
Lu	0.08	0.12	0.14	0.197	0.11	0.076	

注:SJC-数据出自王瑞廷^[31];II -W-数据据 Chai Gang,et al(1992);原始地幔据 McDonough et al(1992);

Lz—二辉橄榄岩,OLPx—橄榄辉石岩。

量相比,表现出明显富集特征。

由金川铜镍矿岩矿石不相容元素的原始地幔标准化蛛网图(图 10)可知,二辉橄榄岩和矿石相对于原始地幔的平均成分亏损 Sr,其原因有待于进一步研究,而 Nb 负异常的出现,可能指示了地壳物质的混染。岩石 La/ Nb 值为 0.22~1.42, Zr/Nb 值为 2.43~10.98,均小于原始地幔的 Zr/Nb 值(Zr/Nb =

18),大多落在 EMI 型富集地幔范围内(La/Nb = 0.78~1.32, Zr/Nb=3.5~13.1)^[31],可能指示其源区为 EMI 型富集地幔。

地幔二辉橄榄岩是大多数镁铁-超镁铁岩浆的起源。尽管关于地幔的成因和组分以及它如何演变仍然有相当大的争议,但目前研究发现大多数科马提岩、拉斑玄武岩和洋中脊玄武岩相对于中等不相

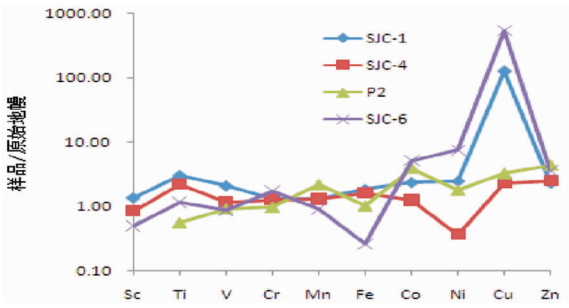


图9 金川矿床岩矿石原始地幔标准化过渡金属元素图解
Fig.9 Mantle-normalized transition metals spider diagrams for rocks from the Jinchuan deposit

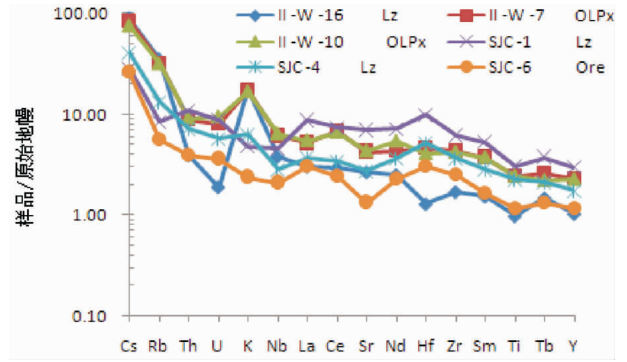


图10 金川矿床岩矿石原始地幔标准化不相容元素图解
Fig.10 Mantle-normalized immiscible trace elements spider diagrams of rocks from the Jinchuan deposit

容元素 Zr、Hf、Ti 和 HREE 而言，都高度亏损不相容亲石元素 Cs、Rb、U、Th、Nb 和 LREE，并且具有正的 ϵNd 值，表明他们来源于长期亏损这些元素的源区；而另一方面，铁质玄武岩和许多碱性玄武岩则富集 Fe 和 Ti 以及强不相容亲石元素，被认为岩浆相应地起源于富集地幔区^[33]。Compbell^[34]总结地幔柱岩浆与岛弧玄武岩和洋中脊玄武岩的地球化学差异时，认识到地幔柱来源的玄武岩类富集强不相容元素，无 Nb、Ta、Ti 异常；而洋中脊玄武岩(N-MORB) 则亏损强不相容元素，弧苦橄岩(Arc Picrite) 虽然也富集强不相容元素，但亏损 Nb、Ta、Ti。当地幔柱岩浆受到次大陆岩石圈和地壳混染时，可产生与弧苦橄岩相似的 Nb、Ta、Ti 的微量元素分布型式。

以上不同岩浆源区微量元素地球化学特征的认识，反映出许多大陆溢流玄武岩起源于地幔柱，在岩浆上侵过程中受到地壳混染，有明显的地壳成分，表现为富集同位素成分(较高初始锶比值，较低 $\epsilon Nd(t)$ 值)，富集和强烈分异不相容稀土元素以及负的 Nb、Ta 异常，显示地幔柱岩浆受到地壳混染后，产生与弧苦橄岩相似的 Nb、Ta 亏损的微量元素地球化学特征。就南非布什维尔德杂岩体而言，其源岩可以追溯到 Kaapvaal 溢流玄武岩。而金川铜镍矿含矿岩体母岩浆则可能来自 EMI 型富集地幔源区，虽然也可能受到地壳物质混染，但岩浆演化最终形成典型的铁质超基性岩。

3.3 铂族金属元素

将 Platreef 钻孔岩心截取的 6 件矿石样品铂族元素检测结果及 Ni、Cu 含量单独列于表 5，同时将 Platreef 钻孔岩心铂族元素含量分别相对于球粒陨石

和原始地幔的富集进行标准化并按照熔点递减的顺序投图(图 11)，并展出布什维尔德杂岩体 UG2 和 Merensky Reef 矿层以原始地幔标准化后的铂族元素配分模式(图 12)做对比。总体来说，Sheba's Ridge 的 Platreef 矿层铂族元素较 UG2 和 Merensky Reef 含量偏低， $\sum PGE$ 为 $387.74 \times 10^{-9} \sim 4959.80 \times 10^{-9}$ ，平均 1928.78×10^{-9} ，除 P4 和 P6 样品之外，其余 4 个样品 $\sum PGE$ 甚至低于球粒陨石 (3509.00×10^{-9})，但高于原始地幔； $\sum IPGE$ 为 $6.24 \times 10^{-9} \sim 101.80 \times 10^{-9}$ ，平均 34.84×10^{-9} ，远低于球粒陨石 $\sum IPGE$ 值 (1744.0×10^{-9})； $\sum PPGE$ 为 $193.13 \times 10^{-9} \sim 4858.0 \times 10^{-9}$ ，平均 1893.94×10^{-9} ，与球粒陨石的值 (1765×10^{-9}) 相当。Sheba's Ridge 的 Platreef 矿层总体表现为富 PPGEs、贫 IPGEs，并且明显以富 Pd、Pt 为特征。Platreef 矿层与布什维尔德杂岩体 B1 和 B3 母岩浆相比，都富集贵金属。以 P4 样品为代表的 Platreef 中间层位 PGE 含量最高。Platreef 矿层所有的辉石样品原始地幔标准化的铂族金属配分模式从 Ni 到 Ir，呈大体平坦的配分模式，从 Ir 到 Pd 递增，显示适度的正斜率，紧接着从 Pd 到 Cu 含量递减，并且以典型的 Pd 的峰值为特征，这与前人的认识一致^[327]。

从布什维尔德杂岩体 Merensky Reef 矿层、UG2 铬铁岩与 Platreef 原始地幔标准化的金属配分模式对比图(图 12)也能反映出，Platreef 较前两者更富集 Pt、Pd、Au，而 IPGEs 较 UG2 低，PPGEs 变化幅度比 Merensky reef 窄等特点。Iain McDonald 等^[27,35]对 Anglo Platinum 的 Sandsloot 露天矿 Platreef 钻孔岩心铂族金属元素的研究结果显示少数钻孔岩心含铬

表 5 布什维尔德杂岩体 Platreef 矿层铂族元素含量(ng/g)及特征值
Table 5 PGE contents of rocks from the Platreef deposit of Bushveld Complex

样品编号	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	1*	2*	3*
岩石类型	辉岩	长石质 辉岩	辉岩	长石质 辉岩	长石质 辉岩	辉岩	球粒陨石参考值		原始地幔
Ni	1097000	2498000	784000	11020000	3236000	6204000			2110000
Cu	778000	1467000	689000	4577000	1608000	2566000			28000
Os	0.81	1.50	0.73	10.7	3.98	5.49	514	700	3.3
Ir	1.14	3.17	0.49	18.6	5.72	10.8	540	500	3.6
Ru	4.29	10.7	3.72	72.5	20.2	34.5	690	1000	4.3
Rh	7.40	25.1	5.13	130	35.1	66.8	200		7.0*
Pt	86.1	289	15.0	498	250	681	1020	1500	4
Pd	284	978	173	4230	1220	2390	545	1200	1
Cu/(Ni+Cu)	0.41	0.37	0.47	0.29	0.33	0.29			0.01
IPGEs	6.24	15.37	4.94	101.80	29.90	50.79	1744.00	2200.00	11.20
PPGEs	377.50	1292.10	193.13	4858.00	1505.10	3137.80	1765.00	2700.00	5.00
∑PGE	383.74	1307.47	198.07	4959.80	1535.00	3188.59	3509.00	4900.00	16.20
PPGEs/IPGEs	60.50	84.07	39.10	47.72	50.34	61.78	1.01	1.23	0.45
Pt/(Pt+Pd)	0.23	0.23	0.08	0.11	0.17	0.22	0.65	0.56	0.80
(Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru)	59.31	82.43	38.06	46.44	49.16	60.46	0.90	1.23	0.45
Pt/Pd	0.30	0.30	0.09	0.12	0.20	0.28	1.87	1.25	4.00
Pt/Ir	75.53	91.17	30.61	26.77	43.71	63.06	1.89	3.00	1.11
Cu/Pd	2739.44	1500.00	3982.66	1082.03	1318.03	1073.64	0.00	0.00	28000.00

注:1* -Naldrett 等(1980);2* -Cochetie 等(1989);3* -Brugmann 等(1987);7.0* -Jagoutz 等(1979)。

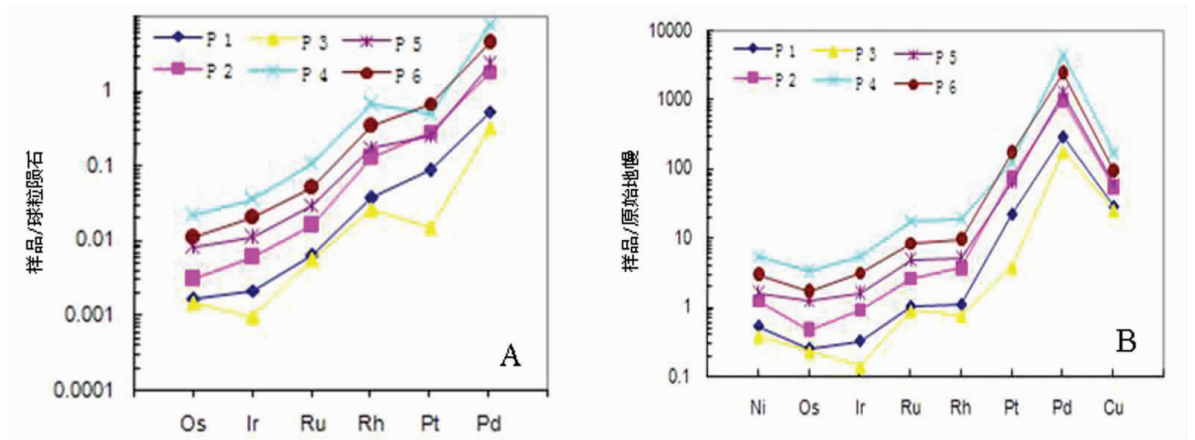


图 11 布什维尔德杂岩体 Platreef 矿石球粒陨石(A)和原始地幔(B)标准化后铂族元素配分模式
Fig.11 Chondrite-normalized (A) and mantle-normalized (B) PGE spider diagrams for Platreef rocks from Sheba's Ridge Project of Bushveld Complex

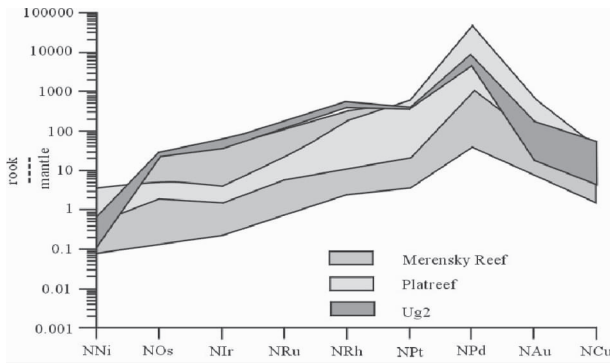


图 12 Merensky Reef, UG2 铬铁岩和 Platreef 原始地幔标准化的金属配分模式^[29]

Fig.12 Mantle-normalized metal patterns of the Merensky Reef, UG2 chromitite and Platreef

岩石原始地幔标准化铂族元素配分模式类似于 UG2, 具有 Pt 负异常和斜率较低的类型, 并且硫化物含量较低。造成这种异常的原因可能与铬铁岩结晶分异引起 Rh, Ru 和 Ir 相对富集有关。另外, 从表 5 及图 12 基本平行的配分模式折线可以看出, Platreef 矿层铂族元素含量 Σ PGE 与 Ni、Cu 含量呈正相关关系, 反映了铂族元素受结晶分异的硫化物控制。

王瑞廷^[15]和朱文凤等^[32]对金川矿床铂族金属富集及地球化学特征研究表明, 金川矿区铂钯富集体中铂族金属含量最高可达 10×10^{-6} , 一般为 $3 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-6}$, 赋矿岩石或矿石铂族金属含量较低, 一般小于 100×10^{-9} 。二辉橄榄岩中的 Σ PGE 为 $9.3 \times 10^{-9} \sim 30.2 \times 10^{-9}$, 平均 16.7×10^{-9} , 远小于矿石的平均值。矿石中 Σ PGE 在 $239.0 \times 10^{-9} \sim 1019.0 \times 10^{-9}$, 平均 538.8×10^{-9} ; 铂钯富集体中, 随着 Ir 的增加, S、Rh、Ru 含量

亦增加, Ir 与 Rh、Ru 呈很好的线性关系; 但 Ir 与 Cu、Pt 及 Pd 总体上呈负相关关系。矿石的 PGE 球粒陨石标准化分布模式属于 Pt-Pd 配分型, 为向左陡倾的曲线, 含 Pt、Pd 较高, 具有 Pt 的高峰。但据前人^[7,8,31]数据整理结果(表 6)和铂族元素配分模式图(图 13)可以看出, 金川矿床不同类型的含矿岩石和矿石具有大体相似的铂族元素配分模式, 球粒陨石标准化 PGE 分布模式 IPGEs 相对平缓, 从 Rh 到 Pd 递增, 亦显示适度的正斜率, 总体以明显富 Pt 为特征, 略显 Rh 负异常; 原始地幔标准化的 PGE 分布模式类似于球粒陨石标准化 PGE 分布模式, 但 Rh 亏损异常强烈, Pt 富集更为明显。

从上述几个矿床铂族金属元素地球化学特征对比来看, Sheba's Ridge 的 Platreef 矿层较 UG2 和 Merensky Reef 的铂族元素总量低 (Σ PGE 为 $198.07 \times 10^{-9} \sim 4959.80 \times 10^{-9}$), 与金川铜镍矿石相当, 但比金川矿区铂钯富集体低, 而且 Cu、Ni 含量也较金川铜镍矿更低; Platreef 矿层以 Pt 和 Pd 含量较高为特征, 尤其是 Pd 含量, 亏损 Os、Ir、Ru、Rh; 金川铜镍矿床也富集 Pt、Pd 等铂族元素。但 Pt/Pd 值 (0.71~5.81) 一般大于 Platreef (Pt/Pd=0.09~0.30)。二者 Σ IPGE 及 Pd/Ir 值明显不同。Platreef 矿层与金川铜镍矿矿石球粒陨石标准化的 PGE 配分模式也有较大差异。Platreef 矿石球粒陨石标准化的铂族元素配分曲线从 Os、Ir、Ru 到 Rh、Pt、Pd 向左陡倾, 具有 Pd 的高峰, 略显 Pt 负异常; 金川矿床的岩石、矿石球粒陨石标准化后的铂族元素配分曲线从 Os 到 Rh, 大体平坦, 从 Rh 到 Pt、Pd、Au 递增, 矿石具有 Pt 的高峰。Platreef 矿石原始地幔标准化 PGE 配分模式显示 IPGEs 相对平缓, 总体左倾型配分曲线,

表 6 金川超大型 Cu-Ni-PGE 硫化矿床岩石、矿石中铂族元素及金含量/ 10^{-9}
Table 6 PGE and Au contents of rocks and ores from the Jinchuan superlarge Cu-Ni-PGE sulfide deposit

组分	海棉陨铁镍矿石				块状镍矿石		浸染状镍矿石		二辉橄榄岩			超基性岩平均	球粒陨石			原始地幔
	SJ C-2	SJ C-3	T1	T2	T3	SJC-13	T4	T5	T6	SJC-1	SJ C-4	SJC-5	TJ1	1*	2*	3*
Os	37	40	18	29	29	124	45	150	13.5	2	0.6	0.7	1.5	514	700	3.3
Ir	33	35	17	34.6	23	78	17	16.2	15.1	1.7	0.5	0.6	0.8	540	500	3.6
Ru	24	29	16	30	40	138	29	16	14.5	4	2	2	0.6	690	1000	4.3
Rh	18	19	8	12.6	11	32	6	6.7	5.9	0.9	0.2	0.2	0.3	200		7.0*
Pt	110	610	640	300	140	133	30	180	120	6	6	4	17	1020	1500	4
Pd	156	105	320	200	140	155	130	100	70	21	1.3	1.8	12	545	1200	1
Au	140	8.4	380	130	280	11.2	800	60	30	36.5	5.2	9.2	30			

注: 1* -Naldrett 等(1980); 2* -Cochetie 等(1989); 3* -Brugmann 等(1987); 7.0* -Jagoutz 等(1979); SJC-数据出自王瑞廷(2002,2005); 其余据杨轩柱(1989) 和杨合群(1991)。

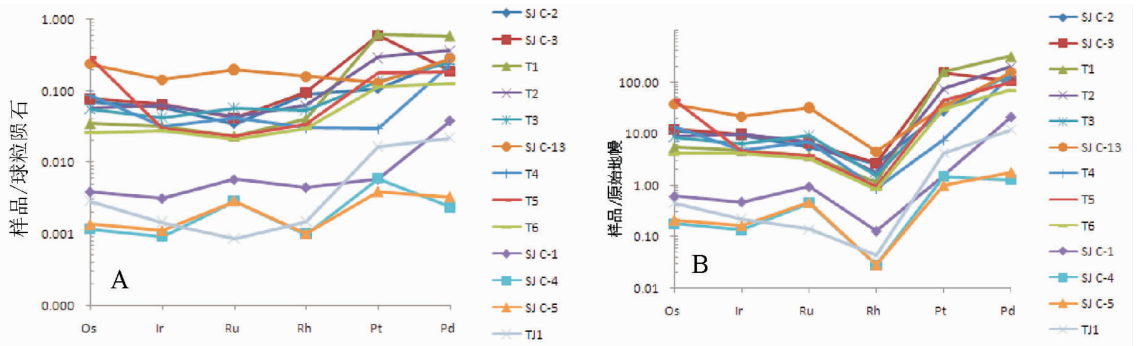


图 13 金川铜镍矿岩、矿石球粒陨石(A)和原始地幔(B)标准化后铂族元素配分模式图
 Fig.13 Chondrite-normalized (A) and mantle-normalized (B) PGE spider diagrams for rocks and ores from the Jinchuan Cu-Ni-PGE deposit

具 Pd 的峰值;而金川矿床则显示 Rh 强烈亏损的槽型折线,Pt 正异常明显。

对铂族元素相关性的研究表明 Pt、Pd 与 Cu 密切相关,而 Os、Ir、Ru、Rh 与 Ni 密切相关,且 Ni、Cu 和 PGE 与 Cr₂O₃ 有一定的成因联系^[4]。金川矿床的镍铜铂(族)富矿石 Cu/Ni 比值为 0.75,镍铜铂(族)贫矿石 Cu/Ni 比值 0.68^[7,11],该矿床晚期贯入块状富矿石的 Pd > Pt, Pt/Pd = 0.5,相对富集 Os、Ir、Ru、Rh, (Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru+Rh)=2,除此以外,其他不同成因类型的矿石均为 Pt > Pd, Pt/Pd=2~4, Os、Ir、Ru、Rh 的含量相对较低, (Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru+Rh)为 5~300。与金川矿床不同的是,Platreef 矿床矿体中的 Pd 含量大于 Pt、Ru 含量, Pd、Rh 含量大于 Os 或 Ir 或 Ru 的含量,这可能与岩浆期后热液作用有关。

据 Naldrett 等^[6]研究, Pt/(Pt+Pd) 值和 (Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru) 值是母岩浆分异程度的函数。Pt/(Pt+Pd) 比值在 Platreef 矿床为 0.08~0.23, 金川矿床为 0.19~0.85。Platreef 矿床 (Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru) 值为 38.06~82.43, 而金川矿床的该比值为 1.54~11.88, 平均值 7.54^[10]。说明 Platreef 矿床母岩浆分异程度较金川铜镍矿更高。

金川矿床的 Cu/Pd 值远大于原始地幔的相应比值,说明了金川矿床的母岩浆经历了硫的饱和,发生了硫化物的熔离。在硫饱和条件下,在硫化物熔体结晶分异过程中, Os、Ir、Ru、Rh 优先进入单硫化物固溶体(固相)中, Pt、Pd 优先保留于残余硫化物熔体中。如果单硫化物固溶体从硫化物熔体的结晶分异作用控制 PGE 的富集,那么,在残留的硫化物熔

体中具有高的 PPGE 和低的 IPGE。24 号矿体及 1 号矿体中铂钯富集体具有这一特征。因此,认为金川矿床 24 号矿体及 1 号矿体中铂钯富集体是单硫化物固溶体从硫化物熔体结晶分异后,残余熔浆结晶而成^[15]。

Platreef 铂族金属相对于原始地幔的富集进行标准化后的配分模式反映了所有 PGE 相对于 Ni 和 Cu 的强富集, Pd 的峰值反映低的 Pt/Pd 比率。但与金川铜镍矿相比,大多数 Platreef 矿层 PGE 相对于 Ni 和 Cu 缺乏强烈富集,可能暗示硫化物是在比金川铜镍矿相对高的 R 因子(硅酸盐熔体与硫化物熔体比率)条件下熔离形成的。金川铜镍硫化矿床只在铜镍矿体中才有 PGE 的矿化和富集,在成岩成矿过程中,明显地形成了 Ni-Co-As-Os-Ir-Ru-Rh 组合和 Cu-Pt-Pd-Sb-Te-Bi-Au-Ag 组合,也反映了铂族金属在岩浆熔离分异过程中,由硫化物和合金共同控制的特点。

4 分析与讨论

4.1 岩浆 Cu-Ni-PGE 矿床不同矿化之间的成因联系与控制因素

岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的形成是液相硫化物从镁铁-超镁铁岩浆中凝并聚集而成的^[12]。公认的岩浆富集模型是基于从硅酸盐岩浆中分离出来的不混溶贱金属硫化物熔融体捕获 PGE 而建立的。从混染作用的范围来看,硫化物可以是岩浆成因的或地壳成因的。根据该假说,在镁铁-超镁铁杂岩体中发生的不同矿化之间没有成因联系,这显然是因为,贱金属硫化物熔融体的捕获作用与 PGE 在不

含大量贱金属硫化物的铬铁岩或硅酸盐岩石中富集是相矛盾的。

Maier 等^[26]提出被角页岩夹层隔断的 Platreef 岩体表现为板状矿体, 是以充满辉石和硫化物的堆晶晶粥形式贯入形成的, 而不是熔离物形式或者说熔离分异产物可能已经被挤出去。这种解释似乎也隐含着有可能与金川矿床深部熔离-多期贯入成因类型相同或相似, 但已有数据显示在 Platreef 矿层有一个与关键带相反的分异趋势, 岩层越往顶部, 原岩富 Cr、MgO, 并亏损不相容微量元素。Barton 等^[37]基于与其他基底岩石也同样相对进化并且不相容微量元素集中度提高的侵入体的对比分析, 认为是原始岩浆大量涌入地壳造成同化混染作用增强。不相容元素集中度相对提高可能暗示相对大比例的捕集熔离过程, 这一论点不能解释观察到的微量元素变化情况。Platreef 矿层 Y/Zr 比例明显地高于布什维尔德杂岩体 UG2 矿层和 B1 母岩浆(图 14)。这意味着 Platreef 岩体比 UG2 矿层和 B1 岩浆含相当大数量的地壳岩石成分。Maier 等^[38]研究表明 Platreef 层岩石具有较高的 (Ce/Sm)_N 值, (Ce/Sm)_N 值分别为 10~20 和 11~25(图 15), 说明他们与 Platreef 岩石母岩浆相比, 是从一种更强烈富集 LREE 的母岩浆结晶分异形成。如果 Platreef 岩浆受上部地壳岩石的严重污染, 那么, 预计这个过程会影响 REE 的比例。

Platreef 矿层 PGE 分布形式也不同于部分熔融残留成因地幔岩中所观察到的负斜率型或平坦型。Pt、Pd、Ru 相对富集, Ir、Rh 相对亏损, 呈“槽型”, Pt 和 Pd 以及 Cs、Rb、Th、U、LREE 等不相容元素和亲铜元素 Cu、Ni 的富集暗示本区残留地幔橄

岩遭受含高度不相容元素的熔体流体的渗透混合作用, 实际上为地幔交代模式。地幔源区内外来富矿流体的渗透混染作用导致幔源岩石发生 PGE 分异。

布什维尔德杂岩体 platreef 矿层, 硫化物比金川铜镍矿含量低得多, PGE 似乎主要由铂族金属矿物 (PGM) 控制。而金川铜镍矿铂族金属矿化起初在分异的硫化物熔体中富集。那么, Sheba's Ridge 的 Platreef 矿层大量的硫是否由于岩浆/岩体与底板岩石相互作用过程中丧失, 需要从 Sheba's Ridge 的 Platreef 矿层获取详细的硫同位素数据证实这个假设。值得注意的是, Sheba's Ridge 的 Platreef 矿层相对于硫化物和岩体的 Pt/Pd 值(<1) 比布什维尔德杂岩体其他地方 (Pt/Pd = 1.8 ~ 2.9) 低^[39]。吕斯滕堡层状岩套 (RLS) Reef 类矿体 Pt/Pd 值一般为 1~10, B1 到 B3 母岩浆 Pt/Pd 比值为 1.2^[39]。已经有一些模型提出来解释天然岩浆和矿石中的 Pt/Pd 分异: (1) Pt 可能在岩浆分异期间从与 Pd 的混合物中分馏出来。在吕斯滕堡层状岩套 (RLS) 中, Merensky 矿层 Pt/Pd 值随高度升高而增加, 与杂岩体基底相关的硫化物 Pt/Pd 值低, 或许关于硫化物熔离时 Pd 的 D 值比 Pt 有点高, 而且, 早先形成的硫化物中萃取出来的 Pd 比 Pt 多^[40]。(2) Pd 通过热液作用机制富集, 这种可能性由 Platreef 中间层较低的 Pt/Pd 和较低的 Ni/Cu 值之间的相互关系来支持; (3) Pt 和 Pd 的 D 值可能被到现在为止仍然未知的因素影响, 比如易变的不安定因素或者如 Sb、As 和 Te 等元素, 有可

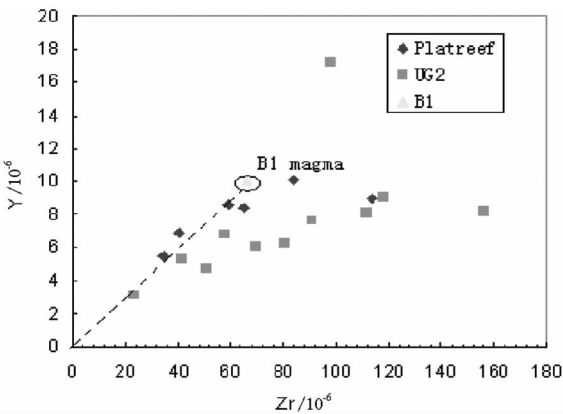


图 14 Platreef 矿层 Y 对 Zr 含量投点图
Fig.14 Plot of Y versus Zr in Platreef ore bed

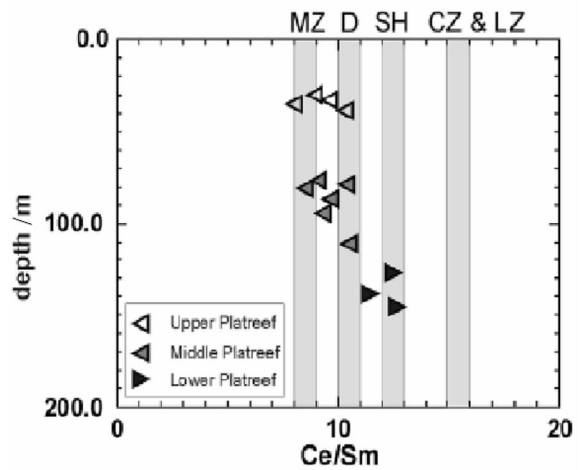


图 15 不同深度下下带、临界带、主带 Ce/Sm 平均比率对比^[38]
Fig.15 Ce/Sm ratios of the lower zone, critic zone and main zone at different depths

能存在于 Platreef 和金川矿石结晶的母岩岩浆中不同的富集阶段。

目前的研究是建立在单个铂族金属元素之间以及铂族金属与贱金属之间较强的正相关关系之上,这暗示着 PGE 很大程度上由贱金属硫化物控制,这个结果可能对不同成矿背景下,岩浆 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的 PGE 矿化的起源有重要含义。

4.2 岩浆 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床成矿模型讨论

岩浆 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床是当幔源镁铁-超镁铁岩浆部分熔融过程中在硫化物饱和时,分离出不相容的硫化物液体而形成的,通常伴随有与地壳岩石的相互作用。尽管原始岩浆中的金属含量影响矿石成分,但他们并不控制矿床的生成,因为金属强烈分异进入硫化物液体中,而且因为大部分能分异出硫化物的岩浆含足够的成矿金属的丰度。PGE 在硅酸盐和硫化物液体之间比 Ni 和 Cu 有更高的分异系数,所以第一次从岩浆中分异出来的硫化物富集 PGE,并且如果相对于地幔中 PGE 的丰度值标准化后,将会有标准化后的 Ni 值大概与 Os 和 Ir 保持一致,而标准化后的 Pd 值与 Cu 值一致的铂族元素配分模式。硅酸盐熔体因硫化物从中分异出去,将会亏损 PGE,并且后续形成的硫化物液体也同样有亏损 PGE 的配分模式。

PGE 在地幔中丰度与陨石相比非常低^[41,33],可能以离散的铂族金属矿物(PGM)或者以硫化物相存在。地幔硫化物熔融有时可能不太一致,表现为一部分 S 溶解到硅酸盐熔体中,留下液态硫化物、固态单硫化物相(MSS)以及可能恢复原状的离散铂族金属矿物(PGM),这取决于它们在岩浆中的溶解度^[45,48]。这些 PGM 会不会完全溶解或者残留下来成为非常细小的固体微粒,可能由 IPGE 主导^[43]或者以纳米离子或者甚至是 PGE 原子束^[44]等形式存在。不管哪种形式,他们可能经过岩浆物理搬运,但其后续的特性可能会不同于已溶解的类型所具有的特性。这种地球化学行为可能有助于部分解释 PGE 化学性质异常的复杂性。在熔融程度高达大约 30%的情况下,富铜液体结晶成为中间硫化物液体中的硫会饱和,并且部分硫化物会保留在残留地幔中,硫化物可能要么以固相或以不相容硫化物液滴,或者两种形式存在或共存^[41]。多期熔融事件进一步使这样的预期复杂化。

在岩浆岩温度达 1000~1199°C 时^[45]贱金属硫化物从硅酸盐岩浆中结晶分异产品的有关实验表明,

从硫化物液体中第一期结晶出来的是富 Fe 的单硫化物固溶体(MSS),而残余的硫化物液体富集 Ni 和 Cu^[45,47](图 16-A)。当温度大幅下降后(<900°C),富铜液体结晶成为中间硫化物固溶体(ISS)。Ni 进入单硫化物固溶体(MSS)的分异系数取决于系统的温度和 f_{S_2} ^[41,48],但大多数情况下分异系数在 0.5~1.5。所以,Ni 既存在于富 Fe 矿石中又存在于富 Cu 矿石中(图 16-B)。在温度<600°C 的条件下,MSS 和 ISS 也不再稳定,在 MSS 富硫一侧,MSS 分解为黄铁矿和富 S 的硫化物固溶体,在贫硫一侧,MSS 分解为镍黄铁矿和贫硫的单硫化物固溶体(图 16-C)。当温度下降至<250°C,单硫化物固溶体也不再稳定,磁黄铁矿和镍黄铁矿取代了单硫化物固溶体。中间硫化物固溶体也分解形成黄铜矿和磁黄铁矿(±黄铁矿、方黄铜矿、硫铜铁矿(Cu₉Fe₃S₁₆))(图 16-D)。在分解过程中,最初存在于 MSS 和 ISS 中的微量元素,如 PGE、As、Sb、和 Bi 等,都分解和迁移到晶粒边缘位置,这些元素形成在硫化物晶粒内部和晶粒之间形成铂族金属矿物(PGM)^[45,48],因此,在地壳条件下岩浆硫化物中观察到的矿物主要是磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿(±黄铁矿或方黄铜矿)以及各种各样的含 PGE 的锑化物、铋化物、砷化物和碲化物。

PGE 在原始地幔起源的岩浆中丰度变化范围为 $0.2 \times 10^{-9} \sim 50 \times 10^{-9}$ 。原始岩浆通过某种途径侵入于地壳浅部过程中的分异可能影响 PGE 的丰度。PGE 在岩浆熔融结晶过程以及次液相温度条件下从地幔上升、侵位等过程和期间,经历了各种各样的富集和亏损过程,上述所有因素都能影响一个矿床中 PGE 最终总成分和相对成分。岩浆体最终固化后 PGE 的再活化可能受到严格限制,但也产生矿化。有人认为布什维尔德杂岩体之所以产出一系列世界级的铂族金属矿床,可能是布什维尔德类型的矿化侵入体的母岩浆会相对富集 PGE,例如,布什维尔德杂岩体母岩浆有 30×10^{-9} 的 PGE^[49],但这种解释不足以成为相对于贫矿床来说形成高品位矿化的单一理由。相对于那些岩浆 Ni-Cu 主导的矿床来说,要产出像布什维尔德这样高品位的矿体,必须有一个岩浆房的过程。

在所有的层状 PGE 矿床中,除了有争议的一些富集 PGE 的铬铁岩矿床以外,PGE 富集都与浸染状岩浆硫化物有密切联系,很典型的是发现 Ni、Cu 和 S 比率类似于正常的 Ni-Cu 岩浆硫化物矿床^[50]。所以,

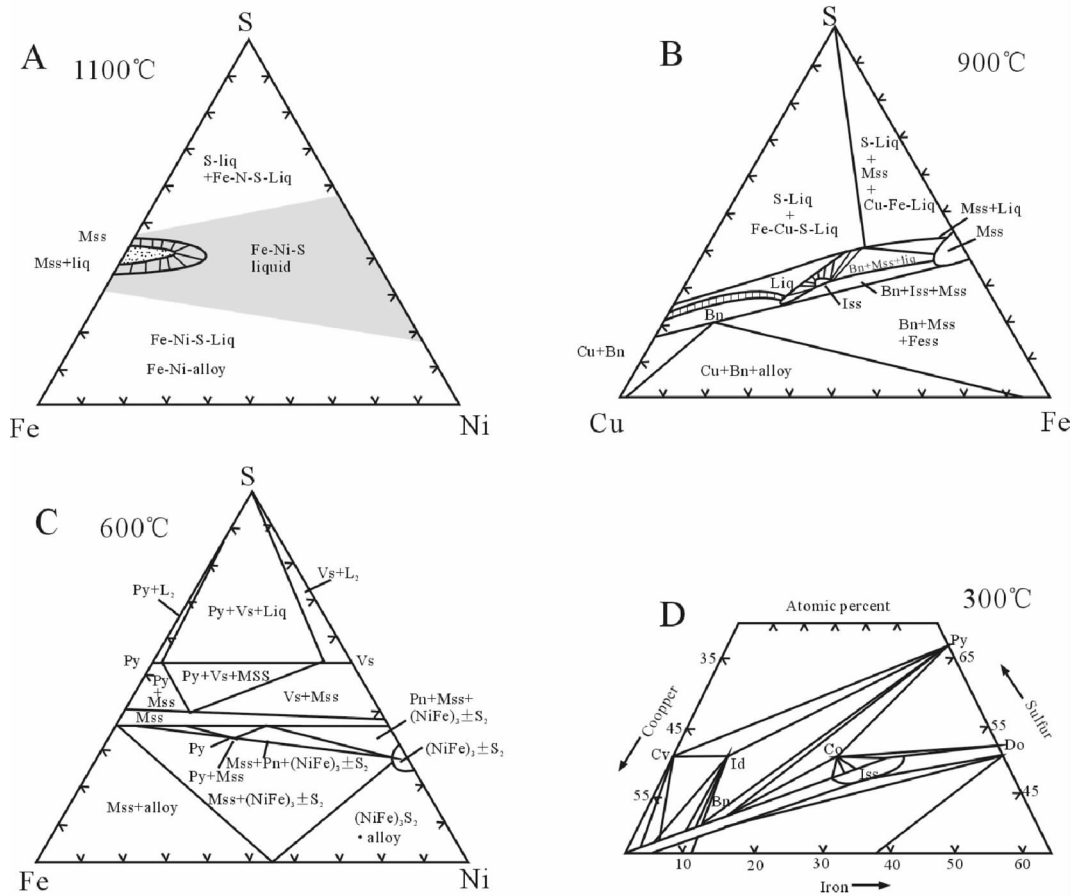


图 16 S-Fe-Ni 和 S-Fe-Cu 系统相变图解^[45]
 Fig.16 Phase diagrams for the S-Fe-Ni and S-Fe-Cu system^[45]

各种成矿模型都围绕矿化从包含不相容硫化物液滴的基本岩浆中形成，然后演进到 PGE 强烈富集的岩浆。这种不相容性经常被归因于岩浆混合^[51]。Campbell 等^[41]争论认为岩浆硫化物矿床中 PGE 丰度变化大部分原因可以由批式均衡熔离过程中较高的分异系数和硅酸盐对硫化物液滴体积比“R”因数较广的变化范围来解释。从很大体积的岩浆中形成的硫化物(大的 R 值将会有较低的 Cu/Pd 比值)，反映了 Pd 分异到硫化物中较高的分异系数效应。

贱金属富集的矿床和 PGE 矿床之间存在一些本质的差异,前者通常局部和不连续地靠近侵入体底部分布。PGE 被硫化物液滴捕集的模式暗示,在单个矿床采集的一套样品中,PGE 和 Cu 以及 Ni 丰度之间应该会有很强的联系。这种情形不仅在布什维尔德杂岩体 Merensky Reef 中已被观察到,也在 Platreef 中观察到同样的情形。但与金川铜镍铂族金属硫化物矿床相

比更加复杂。布什维尔德杂岩体两个 Reef 矿层 (Merensky Reef 和 UG2) 中都有一个与 Platreef 相对较低的含硫化物的范围。Merensky Reef 的 PGE、Cu、Ni 和 S 都相关,被称之为重合层(图 17)。UG2 垂向上不同的金属其含量有较大差异(图 18),称之为补偿矿层。重合的硫化物被解释为在大的岩浆混合事件中硫化物液滴批式均衡熔离形成。抵消和补偿的硫化物层则是通过从停滞和混杂的熔体中熔离分异和重力分异作用凝固硫化物液体形成^[52]。

Barnes^[41]提出扩散控制模型,用于解释补偿型矿化,该模型认为如果硫化物与硅酸盐接触的时间足够长以至于达成平衡状态,才可以引用真正的分异系数。然而,如果未达成平衡状态,PGE 表面上分异进入硫化物的程度取决于它们的扩散系数,扩散率被模式化为以 IPGE—PPGE—Cu—Ni 递减的顺序。Mungall^[48]进一步发展了该模型并指出岩浆体的大

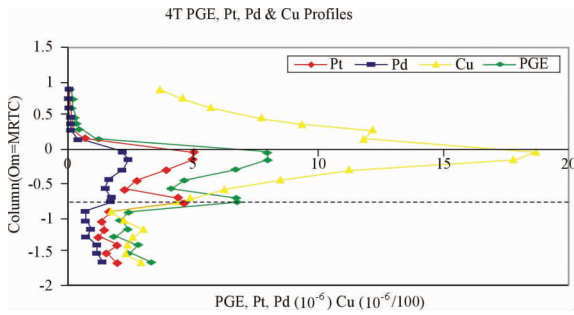


图 17 Brakfontein Merensky 层序平均 4 种总含量和 Pt, Pd 以及 Pt/Pd 剖面^[52]

Fig.17 Average 4T PGE, Pt, Pd and Cu profiles through the Brakfontein Merensky succession^[52]

小(以及因此其冷却的速率)会影响这种控制效应是否会变得明显起来的程度。在像布什维尔德这样的大岩体中扩散控制会具有最小的效应。而对象金川这样的小岩体扩散效应会变得更加重要。Kerr 等^[42]提出一个可替代的方法揭示硫化物液滴中较高的 PGE 含量。他们指出最初的不相容硫化物液滴形成时 PGE 含量被减弱,然后发生硫化物局部重新溶解 PGE 仍然保留在未溶解的硫化物之中,导致 PGE 品位增加。也有证据表明不仅在早期有高温岩浆矿化作用,晚期也伴随通过含水流体进行 Pd 再分配有关的低温热液矿化作用。

4.3 两类矿床铂族元素(PGE)的矿化及富集

4.3.1 Platreef 矿层铂族元素(PGE)的矿化及富集

根据以上分析,笔者认为 Platreef 矿层铂族元素(PGE)的矿化由贱金属硫化物(BMS)的存在控制。Sheba's Ridge 底板岩石是太古宙基底片麻岩,沿 Platreef 矿层走向其他地方底板是由 Transvaal 超群沉积岩,下盘岩石当中 PGE 与 BMS 保持强相关的密切关系,铂族元素 PGE 与贱金属硫化物(BMS)不耦合的情况微乎其微。并且 Platreef 中贱金属硫化物与铂族金属矿物组合几乎完全一样,因此,Sheba's Ridge 的矿化模式可能代表沿 Platreef 矿层走向任何地方 Platreef 矿化最初级的方式。球粒陨石标准化的 PGE 分布型式显示向底盘方向往下随深度增加 PGE 不断进化的分馏, Ir, Ru 和 Rh 相对于 Pt, Pd 和 Au 随深度显著亏损。REE 丰度和数量则证明接近 Platreef 辉岩底部遭受来自片麻岩底盘部分熔融形成的长英质熔体的污染。Platreef 铂族元素硫化物趋于产在 Platreef 底部,并且一些矿床案例(如 Sandsloot)中基底矿化,并且品位更高。从透岩浆流体成矿作用角度

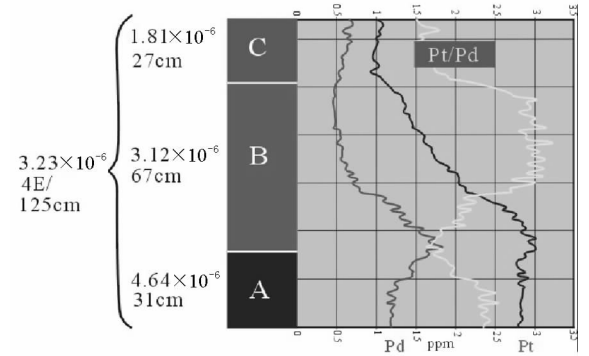


图 18 Blue Ridge UG2 层序平均 4 种 PGE 总含量和 Pt, Pd 以及 Cu 剖面^[52]

Fig.18 Average 4T PGE, Pt, Pd and Pt/Pd profiles through the Blue Ridge UG2 succession

分析,都可以作为证据,暗示硫化物液滴通过可渗透的晶粒间网状系统渗透到底盘,这种网状系统产生于 Platreef 岩浆侵入体引起的片麻岩内沿晶界部分熔融, PGE 起初在 Platreef 岩浆内硫化物液体中富集,单硫化物固溶体从硫化物液滴中的结晶作用除去大部分 IPGE 和 Rh, 同时仍然保留在铁镁质的 Platreef 矿层, PGE 向下运移到片麻岩中,通过残余硫化物液相迁移,分馏出其余的 IPGE 和 Rh 到片麻岩上部,在片麻岩中留下浸染状的硫化物圆滴^[53]。而残余液滴中这些元素相对于 Pt, Pd 和 Au 更加亏损,由于下盘围岩渗透性差异,在硫化物液滴蓄积的地方形成高度富集硫化物的块状硫化物富集带。在下盘围岩是沉积物的地方,与变质作用、同化作用以及后期蛇纹石化相关的流体活动又从贱金属硫化物中就地提取 PGE, 将 PGE 通过热液流体运移到底盘。所有这些岩石类型提供了一个曾经重熔和/或者重新活化了的底板,使基性岩浆和底板岩石之间产生复杂的相互作用^[53,54]。白云岩俘虏体和角页岩同时也出现在 Platreef 矿层中。相比之下,底板是由无水片麻岩构成区域,只有有限的流体活动, PGE 的行为受硫化物液体的行为控制,因此产生 PGE-BMS 之间的密切关系。Platreef 中的俘虏体和不规则的条带状铬铁矿富集 IPGE 和 Rh, 从铈(Rh)包含物的证据表明他们一定已经从 PGE 饱和的岩浆中晶出。铬铁矿扰动和俘虏体性质或许暗示他们是撕成碎片的碎屑岩,可能被多期上侵过程中 Platreef 岩浆后期脉动打断,或者从深部岩浆房或管道中预先存在的岩浆源运移到 Platreef 中^[55]。

布什维尔德杂岩体临界带 UG2 和 Merensky

reef 矿层的形成,则与 Platreef 有较大差异。随着层理侵入体岩浆的分异作用,在岩浆中斜长石晶出之前,该岩浆与新鲜注入的初始未分异岩浆的混合可能造成铬铁矿的饱和,但不会导致硫化物的饱和,以此方式产生富含硫化物,并且富含铂和钯的层位^[56]。目前为止,岩浆混合模型是各种假说中解释布什维尔杂岩体中铬铁矿和含硫化物“矿层”中 Pt 和 Pd 的分布最为认可的模型。该含硫化物矿层被解释为“分批分凝”的结果,而这种硫化物批料被认为是由湍流热液中的含矿岩浆产生的,随后被湍流对流作用悬浮在岩浆中,为硫化物和岩浆之间达到彻底的平衡提供了机会。

像布什维尔杂岩体这样大的层状侵入体通常出现在构造稳定区域^[18]。层理沿水平面延展非常广阔,与侵入体总面积相当,并且层理垂向通常有矿物相变化,相变表现为有规律可循、重复出现的层序,亦称之为韵律层。在大部分侵入体中,可辨识出矿物结晶的顺序,基底岩石基性程度高,上部则为富铁岩石,垂直剖面出现矿物成分的系统变化称为隐层理。铬铁矿典型出现在基底岩层,PGE 矿床居中间位置,富含钒的磁铁矿趋于上部产出,有镁质母岩浆的侵入体,可能有发育良好的超镁铁岩剖面。

4.3.2 金川矿床铂族元素的富集机理

金川铜镍铂族金属矿床 6500 m 长的含矿超基性岩岩体中绝大部分铂族元素富集在早期熔离形成的 1 和 24 矿体之中,并显示岩体中部富集铂族元素,而岩体东西两端铂族元素含量低等特征。早期熔离形成的 1 和 24 矿体较晚期熔离形成的 2 矿体铂族金属含量更高。熔离和深熔-贯入型岩体中,铂族元素含量从非含矿岩石→铜镍表外矿石→铜镍贫矿石→铜镍富矿石依次变富,显示与金属硫化物含量具正消长关系^[30]。浸染状、网脉状矿石较块状矿石铂族金属含量更高,热液叠加形成的斑杂状矿石富 Cu、Pd,且 PGE 品位最高。在含矿岩相中的铜镍富矿体内出现 Pt (Pd) $>1 \times 10^{-6}$ 而且 Cu $>$ Ni 和 Ni $>$ Cu 的两种 Pt (Pd)富集体,二者的矿物组合和铂族元素含量有一定差异,并且不同矿石球粒陨石标准化的稀土元素与铂族元素配分模式呈现不同特点。上述特点是由幔源岩浆部分熔融和硫化物结晶分异过程中微量元素地球化学行为及一系列控制因素所决定的。由于金川含矿超镁铁岩体是产自富集地幔区的铁质超基性岩,相对于地幔柱成因的溢流玄武岩在

较高的熔融温度和部分熔融程度下演化而成的南非布什维尔杂岩体,总体富集 PGE,并相对富集熔点低的铂和钯,同时富硫及亲硫阴离子,故与镁质超基性岩富集高熔点的钨、铌、钽、铪有明显差异。当岩浆发生熔离时,产生硅酸盐熔浆和含有混溶硫化物熔滴的熔浆,而铂族元素便高度聚集于含硫化物熔滴的熔浆中^[40]。金川铜镍矿母岩浆经历了硫的饱和,发生了硫化物的熔离,在硫饱和条件下,在硫化物熔体结晶分异过程中,Os、Ir、Ru、Rh 与 Ni 一起优先进入 MSS(固相)中,Pt、Pd 和 Cu 优先保留在残余硫化物熔体中,生成 ISS。随着温度进一步下降,MSS 和 ISS 都不再稳定,分解形成磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿以及铂族金属矿化包括铂族矿物、合金、自然元素及金属互化物。如果单硫化物固溶体从硫化物熔体的结晶分异作用控制 PGE 的富集,那么在残留的硫化物熔体中具有高的 PPGE 和低的 IPGE。24 矿体及 1 矿体中铂钯富集体具有这一特征。同时在岩浆期后热液作用过程中,硫化物熔体中 Cu、Pt、Pd 进一步活化富集,形成富铜矿体。贯入型块状富矿则是富含镍与 Os、Ir、Ru、Rh 等铂族金属,是由单硫化物固溶体分解演化而来。上述成矿机制表现出金川铜镍矿床铂族元素的富集与世界其他 Cu-Ni-PGE 岩浆硫化矿床成矿的一致性。

从金川铜镍矿床岩石、矿石的 PGE 球粒陨石和原始地幔标准化分布模式也可以看出,岩浆早期熔离形成的浸染状矿石和网脉(海绵)状矿石与块状矿石、热液叠加形成的斑杂状矿石不同的铂族金属配分模式及富集特点。这不但反映了岩浆熔离分异同时成岩成矿的特征,而且还佐证了金川岩体为玄武质岩浆分异的铁质超镁铁质岩,因而相对富集熔点较低的 Pt、Pd,亏损熔点较高的 Os、Ir、Ru、Rh,并且与上地幔岩熔融时 Pt、Pd (Au) 优先于 Os、Ir、Ru、Rh 进入液相,而在结晶期间则易于保留在液相中的铂族元素地球化学性质也是一致的。

金川超镁铁-镁铁侵入体可能侵位于构造比较活跃的地区,不具有规则的形状,岩体内部不同的岩石类型杂乱分布,多次侵入和纵横交错的关系占主导地位。

5 结 论

通过采用 ICP-MS 方法分析布什维尔杂岩体 Platreef 矿床含矿岩石的主量及微量元素含量,并

与金川铜镍硫化矿床进行微量元素地球化学对比分析。笔者得出如下结论:

(1) Platreef 矿层含矿岩石与金川二辉橄橄榄岩的 Σ REE 接近, REE 配分模式均表现为 LREE 富集、HREE 平坦的右倾型配分曲线, 但 Platreef 含矿岩石总体表现为正 Eu 异常, 金川二辉橄橄榄岩与矿石样品则大部分表现为较强的负 Eu 异常, 二者的差异实质上反映了斜长石与斜方辉石比率细微的变动。

(2) Platreef 矿床岩矿石显示地幔柱岩浆受到地壳混染后, 产生与弧苦橄岩相似的富集和强烈分异不相容元素并亏损 Nb、Ta 的微量元素地球化学特征。金川含矿岩石则表现为铁质玄武岩微量元素地球化学特征, 富集 Fe 和 Ti 以及强不相容亲石元素, 暗示虽然也可能受到地壳物质混染, 含矿岩体母岩浆则可能来自 EMI 型富集地幔源区。Platreef 矿层 Pt、Pd、Ru 相对富集, Ir、Rh 相对亏损的 PGE 配分型式, 以及 Cs、Rb、Th、U、LREE 等不相容元素和亲铜元素 Cu、Ni 的富集, 暗示布什维尔德杂岩体岩浆源区残留地幔橄橄榄岩遭受了含高度不相容元素的熔体流体的渗透混合作用即地幔交代, 地幔源区内外来富矿流体的渗透混染作用导致幔源岩石发生 PGE 分异。

(3) Platreef 矿层铂族元素(PGE)的矿化由贱金属硫化物(BMS)的存在控制, Platreef 矿层含矿岩浆在上升过程中被陆壳混染, 特别是富 FeO 和 SiO₂ 成分及外源 S 的加入, 对贱金属硫化物和 PGE 矿化富集则具有特殊的意义。PGE 起初在 Platreef 岩浆内硫化物液体中富集, 单硫化物固溶体从硫化物液滴中的结晶作用除去大部分 IPGE 和 Rh, 并通过透岩浆流体成矿作用, PGE 通过残余硫化物液相下向迁移, 分馏出其余的 IPGE 和 Rh 到片麻岩上部, 留下浸染状的硫化物圆滴。相对于 Pt、Pd 和 Au 更加亏损 IPGE 和 Rh 的残余液滴蓄积形成高度富集硫化物的块状硫化物富集带。在下盘围岩是沉积物的地方, 与变质作用、同化作用以及后期蛇纹石化相关的流体活动又从贱金属硫化物中就地提取 PGE, 将 PGE 通过热液流体运移到底盘, 形成一系列贫 IPGE、富 Cu、Pd 的 PGE-BMS 矿化。布什维尔德杂岩体关键带 UG2 和 Merenskyreef 层状侵入体的形成, 则与 Platreef 有较大差异。随着层理侵入体岩浆的分异作用, 在岩浆中斜长石晶出之前, 该岩浆与新鲜注入的初始未分异岩浆的混合可能造成铬铁矿的

饱和, 但不会导致硫化物的饱和, 就可以以此方式产生富含硫化物, 并且富含铂和钯的层位。

(4) 金川铜镍矿母岩浆经历了硫的饱和, 发生了硫化物的熔离, 在硫饱和条件下, 在硫化物熔体结晶分异过程中, Os、Ir、Ru、Rh 与 Ni 一起优先进入单硫化物固溶体(MSS, 固相)中, Pt、Pd 和 Cu 优先保留在残余硫化物熔体中, 生成中间硫化物固溶体(ISS)。随着温度进一步下降, MSS 和 ISS 都不再稳定, 分解形成磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿以及铂族金属矿化包括铂族矿物、合金、自然元素及金属互化物。如果单硫化物固溶体从硫化物熔体的结晶分异作用控制 PGE 的富集, 那么在残留的硫化物熔体中具有高的 PPGE 和低的 IPGE。24 矿体及 1 矿体中铂钯富集体具有这一特征。同时在岩浆期后热液作用过程中, 硫化物熔体中 Cu、Pt、Pd 进一步活化富集, 形成富铜矿体。贯入型块状特富矿则是富含镍与 Os、Ir、Ru、Rh 等铂族金属, 是由单硫化物固溶体分解演化而来。上述成矿机制表现出金川铜镍矿床铂族元素富集与世界其他 Cu-Ni-PGE 岩浆硫化矿床成矿的一致性。

(5) 布什维尔德大型层状侵入体出现在构造稳定区域, 这种镁质母岩浆的侵入体才可能形成发育良好的称之为韵律层的超镁铁岩剖面, 层理水平延展广阔, 层序重复出现, 并在不同层位产出铬铁岩、PGE 矿床和富含钒的磁铁矿等一系列完整的由布什维尔德地幔柱形成的矿床成矿系列。金川超镁铁-镁铁侵入体可能侵位于构造比较活跃的地区, 不具有规则的形状, 岩体内部不同的岩石类型杂乱分布, 多次侵入和纵横交错的关系占主导位置。

致谢: 感谢英国 Ridge 矿业公司给笔者提供在南非布什维尔德杂岩体 Blue Ridge 和 Sheba's Ridge 铂族金属矿山短期工作机会, 使笔者能够在金川铜镍矿工作期间与澳大利亚 WMC 公司合作进行铜镍硫化矿找矿勘探项目研究的基础上, 继续从事该领域研究。同时, 也感谢核工业地质研究院修群业博士在本项研究及样品测试方面提供的帮助。

参考文献(References):

- [1] 范育新, 张铭杰. 超大型铜镍硫化物矿床研究进展 [J]. 甘肃地质学报, 1999, 8 (2): 47-52.
Fan Yuxin, Zhang Mingjie. Progress on the study of super-large Cu-Ni sulfide deposit [J]. Acta Geologica Gansu, 1999, 8(2): 47-52(in Chinese with English abstract).

- [2] Chai G, Naldrett A J. Characteristics of Ni-Cu-PGE mineralization and genesis of the Jinchuan deposit, Northwest China [J]. *Econ. Geol.*, 1992, 87:1475-1495.
- [3] Barnes S J, Maier W D. Platinum-group element distributions in the Rustenburg Layered Suite of the Bushveld Complex, South Africa [C]//Cabri L J (ed.). *The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-Group Elements*. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Montreal, 2002a, special volume 54: 553-580
- [4] David A. Holwell, Iain McDonald. Petrology, geochemistry and the mechanisms determining the distribution of platinum-group element and base metal sulphide mineralisation in the Platreef at Overysel, northern Bushveld Complex, South Africa[J]. *Mineralium Deposita*. 2006, 41(6):575-598.
- [5] 甘肃省地质矿产局第六地质队. 白家咀子硫化铜镍矿床地质[M]. 北京:地质出版社, 1984:1-225.
No 6 Geological Team of Geological & Mineral Bureau, Gansu. Baijiazui Cu-Ni Sulphide Ore Deposit Geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984:1-225(in Chinese).
- [6] 贾恩环. 金川硫化铜镍矿床地质特征 [J]. *矿床地质*, 1986, 5 (1) : 27-38.
Jia Enhuan. Jinchuan Cu-Ni Sulphide ore deposit geological characteristics [J]. *Mineral Deposit*, 1986, 5 (1):27-38 (in Chinese with English abstract).
- [7] 杨轩柱. 金川硫化铜镍矿床铂族元素和金的地球化学 [J]. *中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊*, 1989, 第 26 号:59-68.
Yang Xuanzhu. Platinum and gold geochemistry in the Cu-Ni sulfide deposit at Jinchuan, Gansu Province, China [J]. *Bull. Xi'an Inst. Geol. Min. Res., Chinese Acad. Geo. Sci.*, 1989, No.26:59-68 (in Chinese with English abstract).
- [8] 杨合群. 论金川硫化铜镍矿床成因 [J]. *中国地质科学院院报*, 1991, 第 22 号:117-135.
Yang Hequn. On the genesis of jinchuan copper-nickel sulfide deposit[J]. *Bulletin of The Chinese Academy of Geological Sciences*, 1991, No 22:117-135(in Chinese with English abstract).
- [9] 杨合群. 论金川硫化铜镍矿床中贵金属元素的分带机制 [J]. *西北地质科学*, 1992, 13 (1):75-80.
Yang Hequn. On the zoning mechanism of noble metal elements in Jinchuan copper-nickel sulfide deposit, Gansu [J]. *Northwest Geoscience*, 1992, 13(1):75-80(in Chinese with English abstract).
- [10] 汤中立, 李文渊. 金川铜镍硫化物矿床模式及地质特征对比[M]. 北京:地质出版社, 1995:14-209.
Tang Zhongli, Li wenyuan. Contrast on the Genesis Model and Geological Characteristic of Jinchuan Copper-Nickel Sulfide Deposit [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995:14-209 (in Chinese).
- [11] 梁有彬, 刘同有, 宋国仁. 中国铂族元素矿床[M]. 北京:冶金工业出版社, 1998, 1-18.
Liang Youbin, Liu Tongyou, Song Guoren. Platinum Group Elements Deposits In China [M]. Metallurgical Industry Press, 1998: 1-18(in Chinese).
- [12] Naldrett A J. Nickel sulfides deposits: Classification, composition, and genesis[J]. *Econ. Geol.*, 1981, 6:28-85.
- [13] 苏尚国, 沈存利, 邓晋福, 等. 铂族元素的地球化学行为及全球主要铂族金属矿床类型[J]. *现代地质*, 2007, 21(2):361-370.
Su Shangguo, Shen Cunli, Deng Jinfu, et al. Geochemistry behavior of platinum group elements (PGE) and main types of PGE deposits in the world [J]. *Geoscience*, 2007, 21 (2):361-370 (in Chinese with English abstract).
- [14] 陈毓川, 赵逊, 张之一, 等. 世纪之交的地球科学——重大地质领域进展[M]. 北京:地质出版社, 2000:1-69.
Chen Yuchuan, Zhao Xun, Zhang Zhiyi, et al. *Geoscience On Crosscut of the Centuries ——Significant Geological Field Evolvement*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000:1-69 (in Chinese).
- [15] 王瑞廷, 毛景文, 赫英, 等. 金川超大型铜镍硫化物矿床的铂族元素地球化学特征[J]. *大地构造与成矿学*, 2004, 28 (3):279-286.
Wang Ruiting, Mao Jingwen, He Ying, et al. Geochemical characteristics of platinum group elements in Jinchuan super-large sulfide copper-nickel deposit, Jinchuan City, Gansu Province, China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2004, 28(3): 279-286.
- [16] 汤中立. 超大型 Ni-Cu (Pt) 岩浆矿床的划分与找矿[J]. *地质与勘探*, 2002, 38 (3):1-7.
Tang Zhongli. Dividing and prospecting for super-large scale Ni-Cu (Pt) magmatic sulfide deposits [J]. *Geology and Prospecting*, 2002, 38(3): 1-7(in Chinese with English abstract).
- [17] 汤中立. 超大型岩浆硫化物矿床的类型及地质对比意义[J]. *甘肃地质学报*, 1992, 1 (1):24-47.
Tang Zhongli. Classification and geological contrastable significance of super large magmatic sulfide deposits [J]. *Acta Geologica Gansu*, 1992, 1(1): 24-47(in Chinese with English abstract).
- [18] Wager L R, Brown G M. *Layered Igneous Intrusions*[M]. Oliver & Boyd, Edinburgh & London, 1968, 588.
- [19] Eales H V, Botha W J, Hattingh P J, et al. The mafic rocks of the Bushveld complex: a review of emplacement and crystallisation history, and mineralisation, in the light of recent data [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 1993, 16(1/2):121-142.
- [20] Eales H V, Cawthorn R G. The bushveld complex[C]//Cawthorn R G. (ed.). *Develop. Petrol. Layered Intrusions*, 1996, 15:531.
- [21] Cawthorn R G, Webb S J. Connectivity between the western and eastern limbs of the Bushveld Complex [J]. *Tectonophysics*, 2001, 330:195-209.
- [22] M J van der Merwe. The layered sequence of the Potgietersrus Limb of the Bushveld Complex [J]. *Economic Geology*, 1976, 71 (7),1337-1351.
- [23] Barnes S J, Maier W D. Platinum-group elements and microstructures of normal Merensky Reef from Impala Platinum Mines, Bushveld Complex [J]. *J. Petrol.*, 2002, 43:103-128.
- [24] Vermaak C F. The platinum-group metals. A global perspective [M]. First edition. Mintek, South Africa, 1995:19.

- [25] Lee C A. A review of mineralisation in the Bushveld Complex and some other layered mafic intrusions [C]//Cawthorn RG (ed.). Layered Intrusions. Elsevier, 1996:103-146.
- [26] Manyeruke T D, Maier W D, Barnes S J. Major and trace element geochemistry of the Platreef on the farm Townlands, northern Bushveld Complex [J]. S. Afr. J. Geol., 2005, 108:381-396.
- [27] Armitage P E B, McDonald I, Edwards S J, et al. Platinum-group element mineralisation in the Platreef and calcisilicate footwall at Sandsloot, Potgietersrus District, South Africa [J]. Appl. Earth Sci. (Trans Inst Min Metall B), 2002, 111:B36-B45.
- [28] Kinnaird J A, McDonald I. An introduction to the mineralization in the northern limb of the Bushveld Complex [J]. Appl Earth Science (Trans Inst Min Metall B), 2005, 114:B194-B198.
- [29] Eric Roodt, Geological Report on Sheba's Ridge Project Goblersdal, Mapumalanga, South Africa(unpublished). 2004:15-18.
- [30] 解广轰, 汪云亮, 范彩云, 等. 金川超镁铁岩侵入体及超大型硫化物矿床的成岩成矿机制[J]. 中国科学(D 辑), 1998, 28 (增刊): 31-36.
Xie Guanhong, Wang Yunliang, Fan Caiyun, et al. The forming mechanisms of Jinchuan ultramafic intrusive bodies and super large sulfide deposits [J]. Science in China (Series D), 1998, 28 (Supplement):31-36(in Chinese).
- [31] 王瑞廷. 煎茶岭与金川镍矿床成矿作用比较研究 [博士论文] [D]. 西安:西北大学, 2002:1-143.
Wang Ruiting. Comparison on ore forming process between Jianchaling and Jinchuan nickel deposits (Ph D. Thesis) [D]. Xi'an: Northwest University, 2002:1-143.
- [32] 朱文凤, 梁有彬. 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, 2000, 36 (1):26-28.
Zhu Wenfeng, Liang Youbin. Occurrence state and distribution of Platinum Group Elements in The Jinchuan Cu-Ni sulphide deposit [J].Geology and Prospecting, 2000, 36 (1):26-28 (in Chinese with English abstract).
- [33] Arndt N T, Leshner C M, Czanske G K. Mantle-Derived Magmas and Magmatic Ni-Cu-(PGE) Deposits. Society of Economic Geologists. Inc[M]. Economic Geology 100th Anniversary Volume, 2005:5-23.
- [34] Lan H. Compbell. Identification of ancient mantle plumes [C]// Richard E Ernst, Kenneth L, Buchan (eds.). Mantle Plumes: Their Identification Through Time. Geological Society of America, 2001:352.
- [35] McDonald I, Holwell D A, Armitage P E B. Geochemistry and mineralogy of the Platreef and "Critical Zone" cumulates of the Northern limb of the Bushveld Complex, South Africa; implications for Bushveld stratigraphy and the development of PGE mineralisation[J]. Miner Depos., 2005, 40:526-549.
- [36] Naldrett A J, Barnes S J. The behavior of platinum group elements during fractional crystallization and partial melting with special reference to the composition of magmatic sulfide ores [J]. Fortschr Mineral, 1986, 64 (2):113-133.
- [37] Barton Jr JM, Cawthorn R G, White J. The role of contamination in the evolution of the Platreef of the Bushveld Complex [J]. Econ. Geol., 1986, 81:1096-1104.
- [38] Maier W D, Barnes S J. Concentrations of rare earth elements in silicate rocks of the Lower, Critical and Main Zones of the Bushveld Complex [J]. Chemical Geology, 1998, 150:85-103.
- [39] Maier W D, Barnes S J, Teigler B, et al. Cu/Pd and Cu/Pt of silicate rocks in the Bushveld complex; Impications for platinumgroup element exploration [J]. Econ. Geol., 1996, 91: 1151-1158.
- [40] Barnes S J, Maier W D. The fractionation of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulphide liquids[C]//Keays R R, Leshner C M, Lightfoot P C, et al. Dynamic processes in magmatic ore deposits and their application to mineral exploration. Geological Association of Canada, 1999, Short Course Notes 13:69-106.
- [41] Barnes S J, Lightfoot P C. Formation of Magmatic Nickel Sulfide Deposits and Processes Affecting Their Copper and Platinum Group Element Contents[M]. Society of Economic Geologists. Inc. Economic Geology 100th Anniversary Volume, 2005:179-213.
- [42] R Grant Cawthorn, Stephen J Barnes, Christian Ballhaus, et al. Platinum Group Element, Chromium, and Vanadium Deposits in Mafic and Ultramafic Rocks [M]. Society of Economic Geologists Inc.;Economic Geology 100th Anniversary Volume. 2005:215-249.
- [43] Andrews D R A, Brenan J M. Phase-equilibrium constraints on the magmatic origin of laurite + Ru-Os-Ir alloy [J]. Canadian Mineralogist, 2002, 40:1705-1716.
- [44] Tredoux M, Lindsay N M, Davies G, et al. The fractionation of platinum-group elements in magmatic systems, with the suggestion of a novel causal mechanism [J]. S Afr J Geol, 1995, 98:157-167.
- [45] Kullerud G, Yund R A, Moh G H. Phase relations in the Cu-Fe-S, Cu-Ni-S and Fe-Ni-S system [C]//Wilson H D B. (ed.) Magmatic Ore Deposits. Economic Geology Monograph, 1969, 4: 232-243.
- [46] Naldrett A J. An overview of Ni-Cu mineralization with conclusions guide in exploration [C]//International Geological Correlation Programme 479 short course notes, 2004a:154-164.
- [47] Naldrett A J. Magmatic sulphide deposits [M]. U.K.:Oxford University Press, 1989:186.
- [48] Mungall J E, Andrews D R A, Cabri L J, et al. Partitioning of Cu, Ni, Au, and platinum-group elements between monosulfide solid solution and sulfide melt under oxygen and sulfur fugacities [J]. Geochim Cosmochim Acta, 2005, 69:4349-4360.
- [49] Davies G, Tredoux M. The platinum-group element and gold contents of the marginal rocks and sills of the Bushveld complex [J]. Economic Geology, 1985, 80:838-848.
- [50] Naldrett A J. Nickel sulfides deposits: Classification, composition, and genesis[J]. Econ. Geol., 1981, 6:28-85.
- [51] Campbell I H, Barnes S J. A model for the origin of the platinum-rich sulphide horizons in the Bushveld and Stillwater Complexes[J]. J. Petrol., 1983, 24:133-165.

- [52] Ray Brown. The PGE Reef of the Bushveld Complex and Great Dyke. Anglo Platinum Exploration Geological Report. (unpublished), 2005:28.
- [53] Cawthorn R G, Barton Jr J M, Viljoen M J. Interaction of floor rocks with the Platreef on Overysel, Potgietersrus, Northern Transvaal [J]. Econ Geol., 1985, 80:988–1006.
- [54] Harris C, Chaumba J B. Crustal contamination and fluid–rock interaction during the formation of the Platreef, Northern Limb of the Bushveld Complex, South Africa [J]. J. Petrol, 2001, 42:1321–1347.
- [55] Kinnaird J A. Geochemical evidence of multiphase emplacement in the southern Platreef [J]. Appl Earth Science (Trans Inst Min Metall B), 2005, 114:B225–B242.
- [56] Mc Donald I, Armitage P E B. The Platreef of the Northern Bushveld, South Africa — is it equivalent to the Merensky Reef? [J]. Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy, 2003, 112(2): B212–213.

A comparison of trace element geochemical characteristics between the Platreef deposit of Bushveld Complex and the Jinchuan Cu–Ni–PGE sulfide deposit and its significance

GAO Hui^{1,2}, WANG An–jian¹, CAO Dian–hua¹, LI Rui–ping¹, WANG Yong–lei¹

(1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. Jinchuan Group Co. Ltd, Jinchang 737100, Gansu, China)

Abstract: Major and trace element geochemistry of rocks and ores from the Platreef deposit of the Bushveld Complex was systemically studied in this paper by using new ICP–MS analytic method for the purpose of making a comparison with geochemistry of the Jinchuan Cu–Ni–PGE sulfide deposit and probing into the genesis of this type of deposits so as to guide their prospecting work. It is concluded that Σ REE values of the Platreef rocks are close to values of lherzolite from the Jinchuan Cu–Ni–PGE sulfide deposit, with very similar REE patterns. Chondrite–normalized REE patterns of the ore–bearing rocks from both deposits assuming right–inclined fractionation, with enrichment of LREE and smoothness of HREE; nevertheless, Platreef rocks have a positive Eu anomaly, whereas Eu negative anomalies are evident for most lherzolite and ores from the Jinchuan deposit. This might be a reflection of insignificantly varying plagioclase/orthopyroxene ratios during the crystallisation of the rocks. It is evident that, relative to the Jinchuan deposit, the Platreef deposit has higher contents of strongly fractionated incompatible elements but shows a trough–shaped profile with pronounced depletion of Nb and Ta, suggesting a model of crustal contamination during mantle plume magma emplacement, evolution and ore formation that resulted in the geochemical features of trace elements similar to arc picrite. Jinchuan ore–bearing magma is enriched in Fe, Ti and highly incompatible lithophile elements, exhibiting geochemical features of Ferropicrites trace elements; and hence it is thought to have been derived from correspondingly enriched mantle (EMI) sources even if there probably also existed some crustal substance contamination during the rock–forming and ore–forming process. The primitive mantle–normalized PGE patterns of platreef rocks are arch–shaped with the enrichment of Pt, Pd and Ru relative to Os, Ir and Rh, and incompatible elements Cs, Rb, Th, U and LREE as well as chalcophile elements Cu and Ni, suggesting that the residual mantle peridotite from which the Bushveld Complex derived has undergone infiltration and contamination–mantle metasomatism by external mineral–enriched fluids containing highly incompatible elements, which may be responsible for the fractionation of PGE from mantle–derived magma.

Key words: trace elements; geochemistry; magmatic Cu–Ni–PGE sulfide deposit; Bushveld Complex; Jinchuan

About the first author: GAO Hui, male, born in 1969, engages in geological and mineral resources exploration and evaluation, and research on mineral resource strategy; E–mail: gao.wayne@gmail.com.