

金宝山铂钯矿与国外大型层状岩体中的铂钯矿床对比

段星星,董会,曹佰迪,杜辉,李文明,刘拓,王立社

(中国地质调查局西安地质调查中心,陕西 西安 710054)

摘要:金宝山铂钯矿床是我国目前发现的最大的独立铂钯矿床,而世界上著名的铂族元素矿床主要有 Bushveld 和 Stillwater 等矿床。笔者总结了金宝山与 Bushveld 和 Stillwater 矿床在构造背景、岩体类型、岩石组合、地球化学等方面的异同:金宝山矿床(260Ma)的产出构造背景是峨眉山大火成岩省,Bushveld 产于克拉通区(2.06Ga),Stillwater(2.70)产于陆内裂谷,总体而言,均产于较稳定的构造环境。但金宝山矿床形成时代新,构造环境的稳定程度较二者差一些,这种差异在岩体规模上反映出来,虽然三者的岩体类型都属层状岩体,但金宝山岩体出露面积不到 3km^2 ,远小于 Bushveld($65\,000\text{km}^2$)和 Stillwater(376km^2)岩体。金宝山岩体的岩石类型较为简单,岩石类型主要为单辉橄榄岩,以及少量橄榄辉石岩和辉石岩,而形成 Bushveld 和 Stillwater 岩体母岩浆的种类多,分异彻底,岩石类型十分丰富。与 Bushveld 和 Stillwater 岩体相比,金宝山岩体的橄榄石、辉石成分变化较小;地球化学以贫 Si、富 Mg 为特征。金宝山矿床的赋矿层位和含矿岩性与 Bushveld 的 Platreef 层相似,金宝山矿床 PGE 最高品位为 1.5×10^{-6} ,低于 Stillwater 的 J-M 层(20×10^{-6})、Bushveld 的 Platreef(5×10^{-6})和 Merensky($5 \times 10^{-6} \sim 7 \times 10^{-6}$)。岩体规模、岩浆分异程度、熔离作用等的差异致使金宝山矿床的规模远不及 Bushveld 和 Stillwater 矿床。

关键词:金宝山;铂钯矿;构造背景;岩石组合;地球化学

中图分类号:P618.53

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2016)01-0185-12

Comparison of Jinbaoshan PGE Deposit and other Foreign PGE Deposits in Large Layered Intrusion

DUAN Xingxing, DONG Hui, CAO Baidi, DU Hui, LI Wenming, LIU Tuo, WANG Lishe

(Xi'an Center of China Geological Survey. Key Laboratory for the Study of Focused
Magmatism and Giant Ore Deposits, MLR Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: The Jinbaoshan Pt-Pd deposit is the largest independent Pt-Pd deposits in China at present, and the world famous PGE deposits are mainly Bushveld and Stillwater deposits. In this paper, the similarities and differences of tectonic setting, intrusion type, rock assemblages, geochemistry among Jin Baoshan, Bushveld and Stillwater deposits have been summarized. The results show that the Jinbaoshan deposit (260Ma) was occurred in the Emeishan Large Igneous Province, which is located at relatively stable tectonic environment, but its stable degree of tectonic environment is less than Bushveld (2.06Ga) that developed from craton and Stillwater (2.70Ga) from intracontinental rift, and these differences have been reflected in the scale of intrusion. Although these three intrusions are layered intrusion, the exposed area of the Jinbaoshan intusion is less than 3km^2 , far less than the Bushveld ($65\,000\text{km}^2$) and Stillwater (376km^2). The rock types of the Jinbaoshan intusion is relatively simple, are mainly wehrlite

收稿日期:2015-05-14;**修回日期:**2015-09-16

基金项目:中国地质调查“东天山卡拉塔格一带浅覆盖区1:5万化探(12120115021801)”项目资助

作者简介:段星星(1983-),男,工程师,主要从事矿床勘查与勘查地球化学。E-mail:duanxx@foxmail.com

and a small amount of olive pyroxenite and pyroxenite, while Bushveld and Stillwater are derived from a variety of primary magmas with thoroughly differentiation and have many rock types from ultramafic rock to mafic rocks. Compared with the Bushveld and Stillwater, the compositions of olivine and pyroxene in the Jinbaoshan vary small; On geochemistry, the rocks of the Jinbaoshan are characterized by silicon-poor and magnesium-rich. The occurrence and rock lithology of ores in the Jinbaoshan deposit are similar to the Platreef layers in Bushveld. The highest contents of PGE in the Jinbaoshan deposit is 1. 5 ppm, lower than the J-M layer in Stillwater (20×10^{-6}), the Platreef (5×10^{-6}) and Merensky ($5\times10^{-6}\sim7\times10^{-6}$) in Bushveld. Affected by the differences in the scale of the intrusion, the degree of magmatic differentiation and liquation, the size of the Jin Baoshan deposits is far less than the Bushveld and Stillwater.

Keywords: Jinbaoshan; Pt – Pd deposit; tectonic setting; rock assemblages; geochemistry

铂族元素(PGE)位于元素周期表第八副族,包括铂(Pt)、钯(Pd)、锇(Os)、铱(Ir)、钌(Ru)、铑(Rh)6种金属元素。铂族元素矿床的成因类型有多种,岩浆型铂族元素矿床在全球范围内无论在储量、产量上都占据最重要的地位(HULBERT,1988;杨星,1993;梁有彬等,1997;唐冬梅等,2009)。岩浆型铂族元素矿床主要与镁铁质-超镁铁质岩石有关,又可分为铜镍硫化物型、铬铁矿型和磁铁矿型。与岩浆铜镍硫化物有关的铂族元素矿床可分为铜-镍-(铂族)型和铂族-铜-镍型,前一类铜-镍作为主要的矿产,而铂族作为副产品;后一类铂族是主要的矿产,而铜-镍作为副产品。

位于中国西南部的峨眉山大火成岩省(ELIP)发育了大量规模不等的岩浆型铜-镍-铂族硫化物矿床,金宝山为区域内唯一的大型铂-钯矿床,也是中

国目前发现的最大的独立铂钯矿床,而国外有名的铂钯矿主要赋存于大型层状岩体中,如南非的Bushveld杂岩体的UG-2和Merensky层,美国的Stillwater杂岩体的J-M层等。笔者拟综合前人的研究成果,通过构造背景、矿床地质特征、地球化学等的对比,分析金宝山矿床和国外典型矿床的异同,为区域找矿和国内寻找同类矿床提供思路。

1 矿床地质特征

1.1 金宝山铂钯矿床地质特征

金宝山是中国目前发现的最大的独立铂钯矿床,该矿床位于扬子板块和印度板块之间的红河-哀牢山深大断裂的北东侧(图1)。矿区内出露地层主

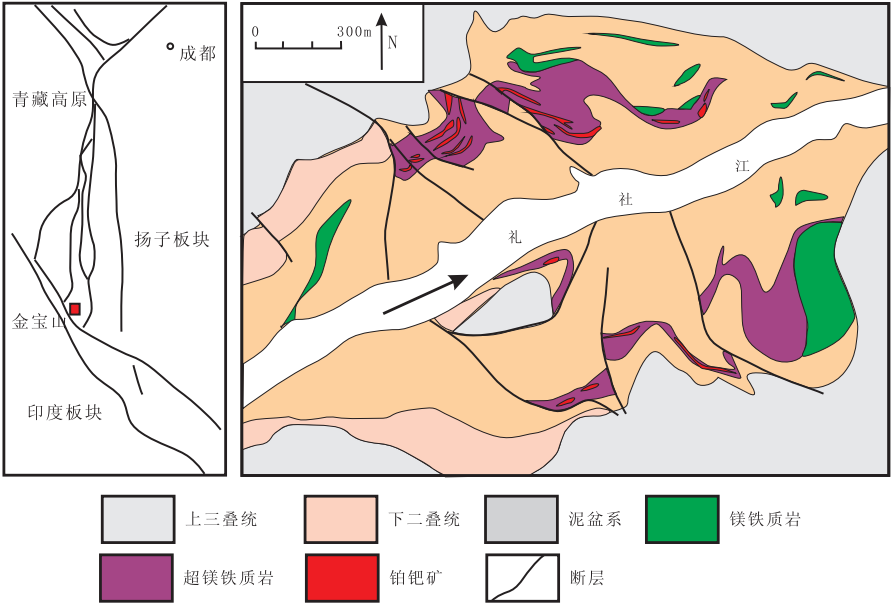


图1 金宝山岩体地质图(据 WANG et al. ,2008)

Fig.1 Geological map of the Jinbaoshan intrusion, Yunnan Province, SW China

要有泥盆系金宝山组第三段互层的板岩、变质砂岩、结晶灰岩。金宝山岩体空间展布呈两翼平缓的短轴背斜形态,北段发育较好。北段北西向延伸,已控制长 2 560m,宽 760~1 240m,岩体厚度 25~109m,最大垂厚为 170m。岩石类型较单一,主要为单辉橄榄岩(92%),岩体底部及边部可见一些小的橄榄辉石岩和辉石岩。

金宝山铂钯矿体产于超基性岩体内(图 1),呈似层状多层产出,主矿体赋存于超基性岩体的底部、中上部和顶部,围岩主要为单辉橄榄岩,次为橄榄辉石岩和辉石岩。铂钯矿化与金属硫化物关系密切,当硫化物含量高,种类复杂时矿化较好,反之则差。经过初查及详细普查,共圈定数十个铂钯矿体,可划分为 5 个矿体群。第一矿体群位于岩体中下部及底部,在主矿层上下分布一些小矿体,主矿层有分支或分叉现象,根据夹石隔层和产出部位,可再分为 4 个小层;第二、三矿体群位于岩体中下部,由夹石隔开,可分为 2 个矿层,两者产状均较稳定;第四矿体群分布于岩体顶部,矿层较薄,稳定性较差;第五矿体群位于主岩体顶部,分布于切穿基性岩体的分支超基性岩中,呈分叉岩枝状。

矿石以稀疏浸染状、似海绵陨铁状为主,呈自形-半自形粒状结构、半自形-他形粒状结构和交代结构。脉石矿物由硅酸盐矿物和碳酸盐矿物构成,矿石矿物主要有磁黄铁矿、黄铁矿、紫硫镍铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿与铬铁矿。矿石与超基性围岩肉眼观察没有明显区别,但显微镜下差异显著,前者可见丰富的硫化物(及其类似化合物,如砷化物、碲化物、锑化物等),硫化物主要见于早期结晶的橄榄石之间的空隙中,少量呈细脉状穿插在橄榄石、单斜辉石晶体(假相)中,其铂族元素含量也较高(陶琰等,2003)。此外,橄榄石及单斜辉石内部分布少量星点状硫化物,为后期蛇纹石化蚀变阶段析出。

铂族元素主要以独立矿物形式赋存于金属硫化物中,其矿物种类多,主要矿石矿物有碲铂矿(PtTe_2)、锡铂钯矿(Pd_3Sn)、碲钯矿(PdTe)、砷铂矿(PtAs_2)、硫砷铱矿(IrAsS)、硫铂矿(PtS)、六方锑钯矿(PdSb)及铂-铁合金等(WANG et al., 2008)。除铂、钯、金、银的自然金属外,还有少量自然铬、自然铜和自然铋等。金宝山岩体的 $w(\text{Cr})$ 含量总体偏高,平均约为 0.15%(王生伟等,2007)。铬铁矿含量丰富,一类以包裹体形式赋存在橄榄石中,为原

生成因;另一类主要分布于硅酸盐矿物粒间,具有明显的环带,受后期改造作用明显(WANG et al., 2005)。

1.2 Stillwater 矿床地质特征

Stillwater PGE 矿床位于美国蒙大拿州西南部,产于镁铁质-超镁铁质层状杂岩体中。该杂岩体系太古宙产物,年龄为 2 701Ma(CAMPBELL et al., 1983),长 48 km,最厚达 7 400 m,层理平均倾角为 65° ,划分为 5 个岩系:底部岩系、超镁铁质岩系、下部条带状岩系、中部条带状岩系、上部条带状岩系。条带状岩系由辉长岩、苏长岩、斜长岩和橄长岩组成。铂族金属矿层主要分布于下部条带状岩系的 J-M 层和中上部条带状岩系之间的 Picket Pin 矿层中。J-M 矿层一般厚度为 1~3m,延伸 40km,矿石中浸染状硫化物含量为 0.5%~1.0%,该矿层产于含橄榄石带和橄长岩-斜长岩带中,铂族元素平均品位达 22.3×10^{-6} ,其中 Pt 品位为 4.2×10^{-6} ,Pd 品位为 14.8×10^{-6} ,Rh 品位为 1.7×10^{-6} ,Ir 品位为 0.53×10^{-6} ,Ru 品位为 0.89×10^{-6} ,铂族金属含量达 6 628.0t。金属 Ni 品位为 0.24%,Cu 品位为 0.14%。

1.3 Bushveld 矿床地质特征

布什维尔德(Bushveld)岩浆矿床是世界上目前已知最大的铂矿床,位于南非太古宙 Kaapvaal 克拉通北部边缘张性构造环境,东西延伸 450km,南北延伸 250km,分布范围超过 29 450km²,与沉积岩一起大部分分布在 Transvaal 沉积盆地中,其铂族元素储量约占世界的 80%,并伴随大量的铬和钒资源。

布什维尔德杂岩体主要由 Rooiberg 群的双峰式火山岩、Rustenburg 层状岩套(RLS)以及 Lebowa 花岗岩套组成,从底部富 Mg 的超镁铁岩到顶部富 Si 的闪长岩,堆晶层厚达 8 km。围岩属于元古宙早期 Transvaal 超群,是一个厚 11 km、含 4 个火山岩夹层的沉积岩层。杂岩体位于若干构造走向的交汇处,其侵位由 Kaapvaal 克拉通的构造格架控制。布什维尔德的各种岩浆活动都集中在古元古代(约 2 106 Ga),MR 矿层中与硫化物伴生的锆石和铬铁矿中金红石包裹体的 U-Pb 年龄为 2 054Ma。布什维尔德侵入体根据矿物组合,自上而下分为:厚度较小的边缘带,主要由微晶苏长岩组成;下带,主要由方辉橄榄岩、古铜辉岩和少量纯橄岩组成;层理

较好的关键带,由古铜辉石岩、方辉橄榄岩、苏长岩、斜长岩、斜长岩和含铂铬铁矿层组成;主带,主要由辉长岩、苏长岩和斜长岩组成;上带,由间歇成层的含磁铁矿辉长岩、橄榄岩和橄长岩组成。

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大。铂族元素主要发育在 3 个不同的部位:UG2(Upper Group 2)铬铁矿层、梅林斯基(Merensky Reef)矿层和北部地区的普拉特(Platreef)矿层。其中的 UG2 和梅林斯基矿层都发育在侵入体的关键带。

Merensky Reef 是南非布什维尔(Bushveld)杂岩体上关键层中几个铂族元素富集层之一。延伸超过 280km,厚 0.04~4m,PGE 品位为 $5 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$ (BARNES et al., 2002a; CAWTHORN, 2002)。铂族元素通常与硫化物相伴出现(VILJOEN et al., 1986),赋矿岩石为粗粒-伟晶含辉石岩,由堆晶斜方辉石(70%~90%)和堆晶间隙斜长石(可达 30%)构成,云母是常见的副矿物。铬铁矿层常出现在辉石伟晶岩的顶部和底部,PGE 最富集的区域仅限于 2 个铬铁矿层附近。底盘由斜长岩、含长辉石岩或方辉橄榄岩组成。上盘围岩通常为苏长岩,逐渐向上过渡成斜长岩,PGE 品位较低。Merensky Reef 矿层的 PGE 品位与其硫化物浓度(2%~3%)有关(NALDRETT, 1986),其硫化物矿物属于铜-镍硫化物矿床的典型组合,以磁黄铁矿、黄铜矿和镍黄铁矿为主,伴有黄铁矿、方黄铜矿、四方硫铁矿以及少量硫砷化合物、闪锌矿和方铅矿。硫化物主要呈不规则的小包裹体和堆晶间隙颗粒。与整个旋回单元的其他层位相比,Merensky Reef 矿层的硫化物富 Ni 和 Pt,Pt/Cu 值比整个岩层的平均值高 10~40 倍(NALDRETT, 1986),且上盘岩石的硫化物含量常高于下盘。通常矿层越薄,PGE 品位越高。Merensky Reef 矿层的另一个显著特点是 Pt/Pd 值较高,平均为 2.7(MAIER et al., 1997)。

普拉特(Platreef)矿层完全不同于 Merensky 矿层和 UG2 矿层的勘探和开采。该矿层位于 Bushveld 杂岩体的北支翼,通常把从 Potgietersrus 南面往北超过 60km 的地段出现的下带,也可能是关键带岩层中形成的厚度为 10~40m 的矿化带称为 Platreef 矿层,VAN DER Merwe(1976)首次提出接触带的 PGE 矿化在走向上延伸约 30km,由含铂族元素和贱金属硫化物矿化的辉岩序列组成。此

类型的矿化出露范围在走向上延伸超过 110km,由含 PGE 和贱金属硫化物矿化的辉石岩序列组成。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。苏长岩和辉长岩上覆于 Platreef 矿层。北段不同矿床的 PGE 矿化特征与其多变的底盘有密切联系。北部底盘是太古宙花岗岩和花岗片麻岩,主要由粗粒斜方辉石堆晶(可达 80%)以及堆晶间隙斜长石和单斜辉石构成,副矿物为金云母、铬铁矿和钛铁矿等(HOLWELL et al., 2006b)。北部矿床矿化受到底盘地形的控制,走向和厚度复杂多变,含矿岩石为富镁和贫镁岩石交替出现的苏长岩旋回,从下到上为辉石岩、含长辉石岩、暗色苏长岩、淡色苏长岩,含大量角闪岩、白云岩和石英岩捕虏体(MCDONALD et al., 2005)。在南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。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 3×10^{-6} 。通常以矿层相对较薄,品位较低,垂向品位分布不规则,更为普遍。厚度为数十厘米到 2m 的块状硫化物富集于紧靠基底接触带和角砾岩化接触带中。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,局部还有黄铁矿及少量黄铜矿、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,而银金矿和等轴铁铂矿趋于产在顶部。铂族元素矿物以铂-铁、铂-锡合金和各种各样钯或铂的碲化物、砷化物、铋化物、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 Pd 呈固溶体产于镍黄铁矿中。Platreef 接触带的底盘也普遍发育 PGE 矿化,与 Merensky Reef 矿层之下的大量层状铬铁矿不同,北段的铬铁矿体仅在南部发育,中部零星出现;南部的矿床中侵染状铬铁矿与钛铁矿共生,偶尔有 1~2cm 的铬铁矿薄层。辉石岩的硫化物有时可达 30%,比 Merensky 矿层和杂岩体中其他层状 PGE-硫化物矿床含量更高。主要是磁黄铁矿,PGE 品位整体上与 S 含量明显相关(苏尚国等,2007)。

布什维尔的铬铁矿岩层产在 3 个地层组合

中,分为 3 组,每个地层组合含有数个铬铁矿岩层,各层从下往上排序编号。下层(LG-1—LG-7);中间层(MG-0、MG-1、MG-2a、MG-2b、MG-2c、MG-3、MG-3a、MG-4、MG-4a,有些地区出现 UMG-1&2);上层(UG-1、UG-2,有些地区出现 UG-3 和 UG-3a)。铬铁矿层在东部和西部的大部分分支都可以达 100km。通常情况下,袋状铬铁矿层比独立的铬铁矿延伸距离更长。UG-1、UG-2 和 LG-5 都发育明显的独立铬铁矿层分支,其中 UG-1 更为突出。UG-1 和 UG-2 有主层和连续的亚级层发育。

下层铬铁矿组赋存在下临界区,是一个 800m 厚,有 7 个铬铁矿岩循环单元的连续层,主要由方辉橄榄岩和辉石岩堆积而成,并伴随铬铁矿出现。由 LG1 到 LG7 的组成,个别可达 1m 厚,赋含在长石质的辉石岩中。LG1 到 LG4 分布在循环单元的底部,上面覆盖着方辉橄榄岩,然后是斜方辉石岩,其铬铁矿岩经常和橄榄石有关,以此为特征和上覆铬铁矿岩(不含橄榄石)相区别。而 LG5 到 LG7 铬铁矿层只有斜方辉石岩。围岩是含长石的辉石岩。

中间层铬铁矿组包括 4 个主要铬铁矿层,它位于上关键带和下关键带之间,并有时跨越二者的界线。其中每个主要层又有诸多次级层发育。与上关键层的分界线是 1~3m 厚的斜长岩中斜长石的出现,西部区域的东部边缘例外, MG1 和 MG2 位于第一层斜长岩的下方, MG3 和 MG4 则位于斜长岩的上方。

上层组合常常由 2 层铬铁矿岩组成(UG1 和 UG2),尽管在布什维尔东,UG3 和 UG4 层也被识别出来。UG1 是世界著名的具分叉现象的单层铬铁矿层,UG2 和 UG5 局部也发育明显的分叉现象(NEX, 2004)。在某些地区,铬铁矿层在垂向上的数量有显著的变化,如在某钻孔中,仅在 LG5 和 MG4 之间就识别出 30 个铬铁矿岩层(KINNAIRD et al., 2002)。

不同岩舌地区的铬铁矿岩层,在横向上的厚度和产状明显变化。CAWTHORN 和 WEBB (2001)认为,单个岩层可连续延伸超过 300km。尽管在东、西部岩舌地区的单一岩层可延伸超过 70km,但铬铁矿团块可以横向连续延伸更长的距离,而不是一个单独的岩层(KINNAIRD et al., 2002)。铬铁

矿岩中常发于嵌晶结构,即辉石或斜长石主晶中包裹非常细粒的铬铁矿捕虏晶;副矿物主要包括斜方辉石、黑云母/金云母、绿泥石、滑石、石英、碳酸盐矿物、硫化物和铂族元素矿物。

NALDRETT(2009)等对铬铁矿层中 465 个样品的 Ni、Cu、S、Pt、Pd、Rh、Ru、Ir、Os 的含量进行了系统分析。结果为:Pt 在 LG-1 到 LG-4 之间为 $10 \times 10^{-9} \sim 30 \times 10^{-9}$,到 LG-5 和 LG-6a 之间上升到 $500 \times 10^{-9} \sim 1\,000 \times 10^{-9}$,MG-2 到 MG-4a 为 $1\,000 \times 10^{-9} \sim 2\,000 \times 10^{-9}$,到 UMG 和 UMG 有轻微下降;S 的含量主要集中在 $70 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$;Ru 和 Rh 的含量在 LG4 到 LG5 阶段比 Pt 的变化稍缓,其他层位与 Pt 的变化趋势相同。从 LG-1 到 LG-4 铬铁矿层的(Pt+Pd)/(Rh+Ru+Ir+Os)的值较低,为 0.1~0.3,到 LG-5 升高到 0.9~1.0;Pt/Ru 和 Pd/Ru 的变化较大,而所有铬铁矿层的 Ru/Ir、Rh/Rh 和 Ru/Os 的值却很一致,说明 Pt 和 Pd 与其他铂族元素的富集机制不同,Rh、Ru、Ir 和 Os 可能是由铬铁矿本身而富集,可能以铂族元素矿物或合金的形式在铬铁矿生长的过程中存在于其中,大量的 Pt 和 Pd 与其他铂族元素一起集中在硫化物流体中。大部分铬铁矿层的硫含量都比较低。

2 与国外赋存于层状岩体中的铂钯矿床对比分析

2.1 构造背景与岩体规模

金宝山矿床产出的构造背景属大火成岩省,布什维尔东产于克拉通区,Stillwater 产于陆内裂谷,总体而言,均产于较稳定的构造环境。

相对于 Bushveld 和 Stillwater,金宝山岩体形成时代新,经历的地质事件较多。前者构造环境更稳定,后者活动;前者克拉通及上叠盆地发育,后者造山带及盆岭构造发育。这种差异在岩体规模上反映出来,虽然三者的岩体类型都属层状岩体,但金宝山岩体出露面积不到 3 km^2 ,而 Bushveld 和 Stillwater 岩体出露面积达 $65\,000\text{ km}^2$ 和 376 km^2 (表 1),而且 Bushveld 岩体为典型的层状岩体,韵律层发育,层理水平延伸稳定,层序重复出现。金宝山岩体则不具有规则的形状,岩体内部不同的岩石类型也比较杂乱。

表 1 金宝山与 Stillwater 和 Bushveld 岩体对比表
Tab. 1 Comparison with Jinbaoshan and Stillwater & Bushveld complex

矿床名称	时代	产出背景	岩体规模	含矿岩性	矿体在岩体中的位置	成矿元素	矿石品位(最高值) (10 ⁻⁶)	来源
金宝山	260Ma	大火成岩省	金宝山岩体为层状岩体,长 2560m,宽 760~1240m,岩体厚度 25~109m	单辉橄榄岩-(橄榄辉石岩-辉石岩)	下部	PGE-Cu-Ni	1.5	陶琰, 2004
Stillwater 的 J-M 层	2.70Ga	陆内裂谷	Stillwater 岩体为层状杂岩体,长度 47 km,宽度 8 km,厚度 6 000 m	纯橄岩-橄长岩-斜长岩	中部	PGE-Cu-Ni	20	ZIENTEK et al.,2002
Bushveld 的 Platreef	2.06Ga	克拉通区	Bushveld 岩体为层状杂岩体,面积 65 000km ² ,厚度 7 000~9 000m	单辉辉石岩-方辉辉石岩	底部和边部	PGE-Cu-Ni	5	ARMITAGE et al.,2002
Bushveld 的 Merensky				方辉辉石岩-铬铁岩-方辉橄榄岩	中部	PGE-Cu-Ni	5~7	BARNES et al.,2001
Bushveld 的 UG2 层				铬铁岩	中部	PGE-Cr	5~7	PENBERTHY et al.,1999

从岩石类型来讲,布什维尔德岩体可分为下部带、关键带、主带和上部带。下部带岩由辉石岩、方辉橄榄岩、纯橄岩组成;关键带由古铜辉石岩、铬铁岩、苏长岩组成;主带由苏长岩、辉长苏长岩、斜长岩组成;上部带由辉长岩、辉长苏长岩、苏长岩、磁铁辉长岩、橄长岩、橄榄辉长岩和闪长岩组成。Stillwater 岩体的岩石组合为苏长岩、古铜辉石岩、纯橄岩、方辉橄榄岩、辉长苏长岩、斜长岩。而金宝山岩体的岩石类型较为简单,主要为超镁铁质岩石,岩石类型主要为单辉橄榄岩,以及少量橄榄辉石岩和辉石岩。

2.2 矿体位置与含矿岩性

金宝山矿床矿体主要位于岩体下部,Stillwater 的 J-M 层位于岩体中部,Bushveld 的 Platreef 位于岩体的底部和边部,Bushveld 的 Merensky 位于岩体的中部,Bushveld 的 UG2 层位于岩体的中部。金宝山矿床的含矿岩性为单辉橄榄岩-(橄榄辉石岩-辉石岩),Stillwater 的 J-M 层的含矿岩性为纯橄岩-橄长岩-斜长岩,Bushveld 的 Platreef 的含矿岩

性为单辉辉石岩-方辉辉石岩,Merensky 层的含矿岩性为方辉辉石岩-铬铁岩-方辉橄榄岩,UG2 层的含矿岩性为铬铁岩。金宝山矿体的层位和含矿岩性与 Bushveld 的 Platreef 层的层位和含矿岩性具有相似。

2.3 成矿元素组合与矿石品位

金宝山、Stillwater 的 J-M 层、Bushveld 的 Platreef 和 Merensky 的成矿元素组合为 PGE-Cu-Ni,而 Bushveld 的 UG2 层成矿元素组合为 PGE-Cr。金宝山矿床 PGE 最高品位为 1.5×10⁻⁶,低于 Stillwater 的 J-M 层(20×10⁻⁶)、Bushveld 的 Platreef(5×10⁻⁶)和 Merensky(5×10⁻⁶~7×10⁻⁶)。

2.4 造岩矿物晶体化学特征

Bushveld 杂岩体的下部带中橄榄石的 Fo 值为 83~90,斜方辉石的 Mg[#] 为 81~89,斜长石的 An 为 77~86;关键带中橄榄石的 Fo 值为 35~63,斜方辉石的 Mg[#] 为 75~85,斜长石的 An 为 70~78;主带中斜方辉石的 Mg[#] 为 65~75,斜长石的 An 为 60~70;上部带中橄榄石的 Fo 值为 35~63,斜方

辉石的 $Mg^\#$ 为 30~60, 斜长石的 An 为 40~62 (IRVINE et al., 1983)。同一岩性中橄榄石 Fo 和辉石的 En 值接近。

金宝山橄榄石的 Fo 为 82~86, 斜方辉石的 $Mg^\#$ 为 84~86, 单斜辉石的 $Mg^\#$ 为 87 (陶琰等, 2002; 朱丹等, 2003)。

Stillwater 岩体橄榄石的 Fo 为 68~76, 斜方辉石的 $Mg^\#$ 为 74~80, 单斜辉石的 $Mg^\#$ 为 79~83 (WILLIAM et al., 1997)。

综上所述, 布什维尔德岩体的分异演化最彻底, 橄榄石、辉石、斜长石等矿物成分变化明显; 而金宝

山岩体的橄榄石、辉石成分变化较小; Stillwater 岩体橄榄石的 Fo 和辉石的 $Mg^\#$ 均较金宝山岩体的相应值低。

2.5 地球化学特征

从图 2 中可以看出, 金宝山岩体相对于 Bushveld 和 Stillwater 岩体, 金宝山岩体贫 Si (SiO_2 34.57%~39.63%), 富 MgO (27.4%~32.6%), FeO 含量与 Bushveld 岩体相当, m/f 值高 (4.39~6.96), 同时金宝山岩体还表现出低 Ca (CaO 0.60%~5.80%) 和 Al (Al_2O_3 1.41%~7.55%), TiO_2 含量略高 (0.40%~0.70%) 的特征。

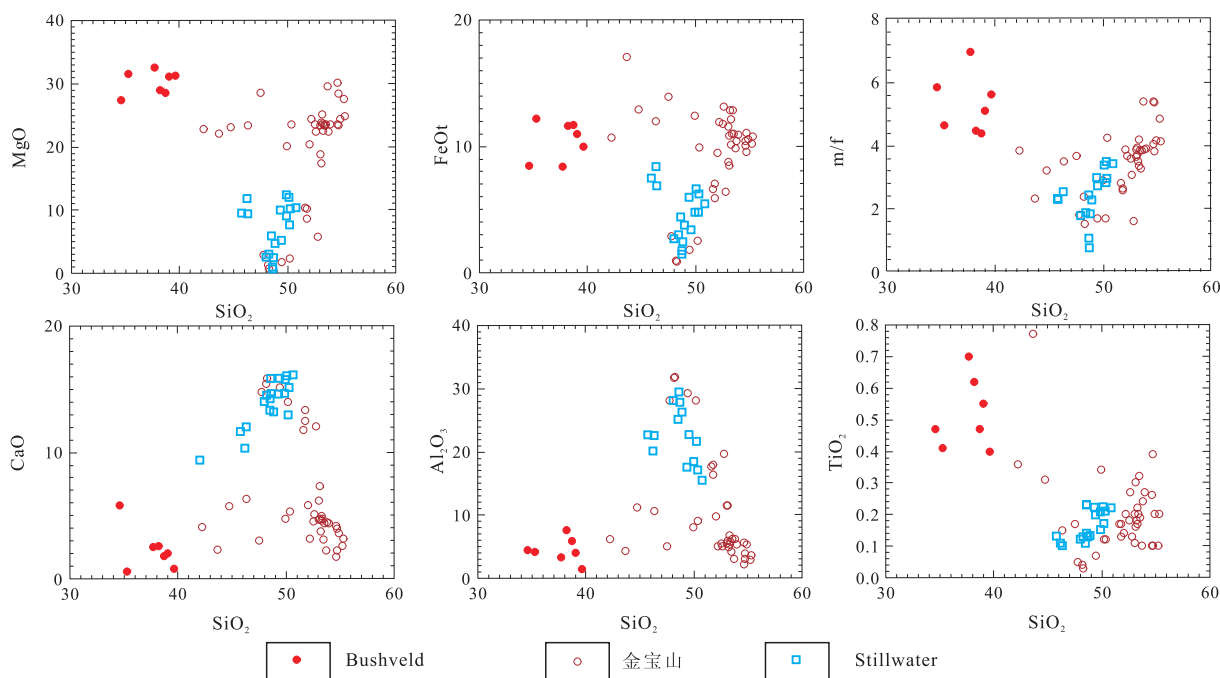


图 2 岩石化学相关图解

Fig. 2 Petrochemical-related graphic

FREY 等 (1968) 发现布什维尔德和 Stillwater 的边缘辉长岩稀土总量低, 轻稀土明显亏损, 且有很显著的正 Eu 异常, 这代表原始岩浆 (未分馏的岩浆), 其显著的正 Eu 异常表明在侵入之前岩浆中斜长石的选择富集程度是高的。说明在杂岩体的边缘部位, 出露没有经过或少有地壳物质混染的原始岩浆。在岩浆堆积分层的主岩体中心部位, 不同岩性的 REE 总量低, 但为轻稀土富集, 重稀土没有分馏, Eu 异常不是很明显。布什维尔德岩体底部带和关键带中轻稀土富集, 稀土总量为球粒陨石的 0.4~8 倍, Th 富集, 重稀土元素没有分馏, 斜长石堆积岩有

明显的 Eu 正异常, 与大陆溢流玄武岩有关。下关键带的下部 and 下部带 REE 含量比球粒陨石高 0.3~20 倍, 轻稀土和 Th 更富集, 稀土配分仍为轻稀土富集, 重稀土几乎没有分馏。岩石强烈富集 Th 和 Sm 。下部带 Eu 没有异常 ($\delta Eu = 1.01$), 关键带的下部略有 Eu 负异常, 说明轻稀土与堆积岩相不相容。主带堆积岩 REE 是球粒陨石的 1~12 倍。轻稀土和 Th 富集程度比底部带和关键带低。长石堆积岩有 Eu 异常。说明原始岩浆穿过了地壳物质, 或者在上升过程中在岩浆通道中发生了成分的变化。

金宝山岩体总体上亏损大离子亲石元素, 富集

亲铁元素。超镁铁岩的 (ΣREE) 为 $16.8 \times 10^{-6} \sim 40 \times 10^{-6}$, 平均约为 30×10^{-6} 。轻稀土元素富集且具有轻重稀土分离的特征, 但分离特征并不明显。镁铁和超镁铁岩都表现出右斜率、Nb 弱亏损的特征, 具有板块内部拉斑玄武岩的特征。同时也可看出, 超镁铁岩样品普遍有 Eu 亏损, 而镁铁质岩(辉绿岩)不显示 Eu 亏损(朱丹等, 2003)。

2.6 PGE 组成对比

金宝山铂钯矿石的 Pd/Ir 值为 15.95~26.49, 平均为 20.96; 金宝山超基性岩为 3.84~13.76, 平均为 7.98, 表明矿石和超基性岩形成时间上可能有

差异, 即岩体形成于铂钯矿石之前(王生伟等, 2007)。Bushveld 的 Merensky 矿层、UG2 矿层、Platreef 矿层的 Pd/Ir 值分别为 7.68~11.93、26.77~91.17。金宝山的 Pd/Ir 值较 Bushveld 的 Merensky 矿层和 UG2 矿层的 Pd/Ir 值高, 而低于 Platreef 矿层的相应值(表 2)。

金宝山铂钯矿石和超基性岩的 Pt/Pd 平均值为 0.61 和 1.07, 低于 Bushveld 的 Merensky 矿层(2.2)和 UG2 矿层(~ 0.99)的 Pt/Pd 值, 高于 Bushveld 的 Platreef 矿层(0.09~0.30)和 Stillwater J-M 层(0.27)的相应值。

表 2 金宝山矿床与其他矿床的 PGE 特征对比表
Tab. 2 Comparison PGE characters of Jinbaoshan and Stillwater & Bushveld deposit

序号	名称	Pt/Pd	Pd/Ir	(Pt+Pd)/ (Os+Ir+Ru)	来源
1	金宝山铂钯矿石	0.61	15.95~26.49, 平均为 20.96	20.72	陶琰等, 2004
	金宝山超基性岩	1.07	3.84~13.76, 平均为 7.98	5.87	
2	Bushveld	2.53		12.5	NALDRETT, 2004
	Bushveld 的 Merensky 矿层	2.2	7.68	6.43	BARNES et al., 1985, 1987
	Bushveld 的 Platreef 矿层	0.09~0.30	26.77~91.17	38.06~82.43	高辉等, 2009
	Bushveld 的 UG2 矿层	~ 0.99	~ 11.93		GAIN, 1980
3	Stillwater J-M 层	0.27			HARPER, 2004
4	原始地幔	1.82	1.22	0.93	MCDNOUGH et al., 1995
	原始上地幔	1.36	1.52	1.08	

金宝山铂钯矿石和超基性岩的 (Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru) 平均值为 20.72 和 5.87, 高于 Bushveld 的 Merensky 矿层的 (Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru) 值(6.43), 低于 Platreef 矿层的相应值(38.06~82.43)。

2.7 岩浆源区、原生岩浆与同化混染

在根据成岩机制概算原始岩浆微量元素含量的基础上, 通过模式计算, 原始岩浆起源于类似 OIB 源的地幔柱高程度熔融, 熔融程度为 20% 左右(陶琰等, 2005), 原生岩浆为低 Ti 拉斑玄武质岩浆, MgO 含量为 12.93%(陶琰等, 2002)。

金宝山岩体超镁铁岩石样品的 $\epsilon_{Nd} = -0.07 \sim +0.81$, 变化较小, ϵ_{Nd} 值明显不同于软流圈地幔($\epsilon_{Nd} = 7 \sim 13$), 也显著高于大陆岩石圈地幔($\epsilon_{Nd} < -5$), 而比较接近地幔柱源区的 Nd 同位素组成

($\epsilon_{Nd} = 0 \sim +7$), 其同位素组成介于地幔柱与岩石圈地幔之间, 显示出地幔柱成因, 并可能受到岩石圈地幔混染作用的影响(陶琰等, 2010)。

金宝山岩体超镁铁岩石样品的 Sr 同位素组成: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(260\text{ Ma}) = 0.705\,395 \sim 0.707\,854$ 。相对于变化较小的 Nd 同位素组成, Sr 同位素的组成有较大变化。据笔者金宝山岩体同位素造成分析的有限数据显示, 蚀变较强的含矿样品 2 号及岩浆就地分异出来的花斑岩和角闪辉石岩有相对较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, 而蚀变较弱的辉橄岩(为岩体中的早期堆晶相)有相对较低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, 可能反映岩浆就地结晶分异的晚期岩浆受更多的围岩地层混染, 特别是广泛发育的岩浆期后热液蚀变使之有更高的放射性 Sr 同位素组成(陶琰等, 2010)。金宝山岩矿石 Os 同位素组成 $\gamma\text{Os} = 20.7 \sim 60.5$, 高于任何端元类型

的地幔储集库,反映了地壳物质混染作用的影响(陶琰等,2010),金宝山矿石中浸染状磁黄铁矿、黄铜矿及细脉状黄铁矿和黄铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $0.6\text{‰} \sim 2.8\text{‰}$,主要集中在 $1\text{‰} \sim 2\text{‰}$,平均为 1.64‰ ,这些值处在正常幔源硫的范围内($0 \pm 2\text{‰}$),反映出受地壳混染弱(马言胜等,2009)。

相对而言,形成 Bushveld 和 Stillwater 岩体的岩浆复杂得多。DAVIS 和 TREDoux (1985)、HARMER 和 SHARPE(1985)认为 Bushveld 杂岩体形成过程中有 2 种硅酸盐液相参与:一种为类似于玻安岩的富 Mg 玄武安山质岩浆;另一种为类似于低 Ti 大陆溢流玄武岩的拉斑玄武质岩浆。BARNES 和 MAIER(2002)认为玄武安山质岩浆的 Th/Hf 值为 1.9,而拉斑玄武质岩浆的 Th/Hf 值为 0.4。上述研究表明,下部带和下部关键带的同位素组成及元素比值类似于玄武质安山岩,主带的成分则类似于拉斑玄武岩。上部关键带及其中富含 PGE 的 Merensky 层是以上 2 种岩浆混合的产物。而 KRUGER(2005)总结前人的研究成果并结合新的同位素及其他证据,提出可能有多达 5 种不同性质的岩浆参与了 Bushveld 岩体的形成过程,从早至晚分别为:苏长质岩浆、硅质苦橄岩浆)、苏长质岩浆、辉长苏长质岩浆、铁质辉长苏长质岩浆。BARNES 和 MAIER(2002)基于 Impala 矿区的 PGE、不相容微量元素特征,并综合前人的研究成果,认为硫化物富集 PGE 的模式可以解释成矿特征(BARNES et al., 2002)。通过分析该模式,认为新的拉斑质玄武岩浆注入岩浆房与残留的富镁的玄武安山质岩浆混合已形成的硫化物与大量岩浆发生反应,强烈亲 S 的 PGE 进入这些硫化物。同时,混合岩浆中的铬铁矿也达到饱和。这些硫化物和铬铁矿聚集在晶粥之上,形成下部铬铁矿层。硫化物液滴向下迁移进入孔隙空间,而且压实作用期间一些裂隙张开,富 PGE 的硫化物进入铬铁矿层之下的斜长岩和浅色苏长岩,最终形成富 PGE 的硫化物矿层(BARNES et al., 2002)。KINNAIRD 等(2002)和 KRUGER(2005)则认为,铬铁矿层(如 UG-2 矿层)、Merensky 矿层和 Plat reef 矿层是岩浆混合和地壳混染作用的产物(KRUGER, 2005; KIN-

NAIRD et al., 2002),母岩浆的类型更多且新岩浆更富集 PGE, PGE 主要以铂族元素矿物形式沉淀,硫化物不是主要的 PGE 捕集剂。而且,分异和堆积等岩浆过程使成矿元素进一步富集。

美国的 Stillwater 杂岩体中超镁铁质岩系和下部条带状岩系的层序自下而上为:橄榄岩→方辉橄榄岩→古铜辉石岩→苏长岩→辉长苏长岩,而在中部条带状岩系中层序自下而上为:橄长岩→橄榄辉石岩→橄榄辉长苏长岩→辉长苏长岩。IRVINE 等(1983)提出,形成前者的母岩浆为 U 型岩浆而形成后者的母岩浆为 A 型岩浆。一系列的野外、岩石学、地球化学研究表明,U 型岩浆表现出高 MgO,相对高 SiO_2 ,低碱、CaO、 Al_2O_3 、 TiO_2 的特征,而 A 型岩浆以低 MgO、高 Al_2O_3 为特征。U 型岩浆为基底岩系、超镁铁质岩系、下部条带状岩系中位于 J-M 层之下的苏长质-辉长质部分的母岩浆,A 型岩浆或 U+A 型的混合岩浆则为下部、中部、上部条带状岩系中含橄榄石带的母岩浆(IRVINE, 1983)。IRVINE 和 SHARPE(1986)确定成分不同的硅酸盐岩浆混合不仅可形成不混溶的硫化物熔体,还可形成铬铁矿堆积岩。富含 PGE 的 J-M 矿层和 B 铬铁矿层的 Os 同位素富集特征也证实上述观点。这一过程中,控制岩浆硫化物液滴中 PGE 含量的控制因素为混合岩浆中 PGE 和 S 的含量、共存的硫化物和硅酸盐熔体之间的 PGE 分配系数、硅酸盐岩浆和硫化物岩浆的质量比值(R 系数)(LAMBERT et al., 1994)。

3 成矿机制

布什维尔德矿床主要包括 UG2、MR 和 PR 3 个 Cu-Ni-PGE 矿层,并以 PGE 矿化为主。NALDRETT 等(2008)总结了布什维尔德矿床的 PGE 矿化主要有 5 种机制:一是在层状侵入体内部的特殊层位内有很高品位的 PGE 层的形成,既可与铬铁岩有关,也可与铬铁岩无关;二是富 PGE 硫化物的岩浆沿着层状侵入体的边缘就位;三是不混溶硫化物的延时分离直到层状侵入体分异的晚期为止;四是没有不混溶硫化物发育时,铬铁矿结晶;五

是热液重新分配和来自低品位浸染状硫化物的 PGE 的浓缩。UG2 矿层的成因:UG2 矿层所有的 PGE 矿化都在铬铁矿中,PGE 含量在底部最高,向上呈有规律的降低。岩浆的加入可能是引起 PGE 旋回变化的原因。MONDAL 等(2007)提出 UG2 矿层是通过新的成批岩浆伴随着成分相似的残余岩浆的贯入而形成。在 UG2 矿层中的辉石岩/夹层中发现高的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值表明与顶板岩石混合可能已经在引起铬铁岩和硫化物形成中扮演角色(NALDRETT et al., 2008)。MR 矿层的成因:MR 矿层的许多特征都可以用正岩浆模型来解释,即硅酸盐熔体-晶体平衡主导的岩浆结晶过程直接成矿。富 Pt-Pd 的硫化物矿层集中在旋回单元底部的关键层位,分布相对均一,侧向连续性好,与 Ni-Cu 硫化物伴生,这些现象都说明 PGE 源于岩浆,被硫化物流体萃取后赋存于硫化物固溶体中或冷却出溶形成独立的 PGE 矿物(BARNES et al., 2002)。MR 矿层有 2 个或多个热的含硫化物镁铁质岩浆注入口,从而产生水平层位。该层由来自 2 种岩浆类型的矿物组成,一类是富 MgO 和 Cr,贫 Al₂O₃ 岩浆,而另一类是具有典型拉斑玄武岩成分的岩浆(NALDRETT et al., 2008)。也就是说,在整体化阶段的末期,明显地有一种岩浆的补充,残余岩浆与新鲜岩浆混合,结果形成了富含 PGE 和硫化物的不相容流体,沉淀形成 MR 矿层(HULBERT et al., 1988)。相关的地球化学研究表明,如果是岩浆混合或混染作用导致了早期的硫饱和,当从深部进入布什维尔德主岩浆房时,这些富 PGE 相已经存在于岩浆中,随着硫化物的饱和析出,PGE 也一同从岩浆中分离。在运移到主岩浆房的过程中,硫化物小珠滴或团块可以与大量岩浆充分混合,进一步富集 PGE 后与斜方辉石一起堆积在主岩浆房底部形成 MR 矿层(ARNDT et al., 2005)。也就是说,梅林斯基单元的母岩浆相对富 SiO₂ (该成分促进斜方辉石的结晶),强富集不相容微量元素以及富含挥发分,这是由于布什维尔德下岩浆房中,母岩浆通过不同的含水硅酸盐质围岩(花岗岩、云母片岩或伟晶岩)部分熔融的同化混染所致。产生梅林斯基单元的岩浆是一种更污染且异乎寻常地富集不相容

元素的岩浆,当它进入布什维尔德主岩浆房时,促成具有特征意义的 MR 矿层不寻常相的形成。在下岩浆房中,这种不纯的岩浆在同化混染过程期间熔离出硫化物或富 PGE 的相,随后进入布什维尔德主岩浆房就堆积形成 MR 矿层矿床(LEE et al., 1990; ARNDT et al., 2005)。PR 接触带的成因:最新研究显示,PR 接触带的几何形态是一个被侵入的岩席状或网脉状岩体,在辉长苏长岩侵入之前已经固结,说明上覆岩石不可能提供如此大量的 PGE(MCDONALD et al., 2007)。PR 接触带 PGE 矿床的形成非常明显地受到与白云质岩石相互作用的影响,出现大量的钙硅酸盐和角闪捕虏体,矿层厚度变化大,分布不稳定,矿石矿场重晶石,颗粒粗大,品位较高,并可见石榴子石等蚀变矿物,说明是热接触带成矿,因而很多研究者都认为该矿层与岩浆热液作用有关。总之,布什维尔德母岩浆来自较深部的岩浆房,关键带母岩浆进入布什维尔德主岩浆房,同化其围岩作用日益增强,并与进入主岩浆房中的新岩浆发生反应,熔离出硫化物或富 PGE 相,从而形成了 UG2、MR 和 PR 铂族矿层,以及含很高 Pt 品位的圆柱状或带状超镁铁质岩管切穿下部的堆积岩,并被认为是热液活化转移的结果。布什维尔德岩浆房是一个开放的系统,杂岩体至少是 3 种或更多母岩浆周期性充填的结果。当来自上地幔的岩浆上升之后,又有新的岩浆进入岩浆房;新的岩浆扩散开来,覆盖在来自先前岩浆房中岩浆结晶的矿物晶体上;最后填充在地壳中的岩浆房中。

金宝山:深部硫化物熔离是金宝山铂族元素矿床成矿的主要因素,导致从一个比成矿岩体体积大得多的岩浆熔体中富集铂族元素。深部熔离硫化物熔滴向岩浆房下部沉降富集后,堆积橄榄石混合部分残余硅酸盐熔体侵位,受流动分异的影响及侵位后的再沉降作用,造成岩体中硫化物的不均匀分布,形成透镜状、似层状的硫化物富集层,富集铂族元素及铜镍构成工业矿层。多个矿群层的出现,反映侵位岩浆不是一次性就位完成,矿层群分布是侵位岩浆断续补给与岩体冷凝过程的综合体现,与不同岩浆脉冲有某种对应关系,但后续岩浆上升后可与前期未完全凝结的残余熔体混合。所以,矿群层与

岩浆脉冲的对应关系只是相对的,下部矿层群可以包含后续脉冲提供的熔离硫化物,而在整个层序上,矿层集中在中下部,上部层序只有很弱的硫化物积聚,是侵位岩浆冷凝过程中最后凝结而硫化物基本上沉降后的岩浆柱。

4 结论

通过成矿地质背景、矿床地质特征和成矿作用特征资料的综合分析,可以得出以下启示:一是这类矿床主要位于克拉通的边缘;二是这类矿床与区域性构造薄弱带毗邻,它是岩浆上升的通道;三是这类矿床具有引起达到硫化物饱和的关键要素,如围岩中壳源 S 的加入等;四是母岩浆多为高镁拉斑玄武质岩浆。

形成金宝山岩体的岩浆属高镁拉斑玄武质岩浆,但岩浆体积小、侵位浅,岩浆结晶时间短,所形成的岩石主要是单辉橄榄岩,分离结晶作用和熔离作用不彻底,后期有热液作用的叠加。岩浆体积、结晶时间、分异程度、熔离作用等的差异致使金宝山矿床的规模远不及 Bushveld 和 Stillwater。

通过上述研究,笔者得到几点区域找矿的启示:①在峨眉山大火成岩省寻找与金宝山岩体相似的岩体,进行综合评价,寻找类似矿床。②目前,国内已报道的大型层状岩体有塔里木东北部的坡北岩体,应对其进行综合的铂族元素矿床评价;此外,还应关注国内其他克拉通区是否存在层状岩体,若有也应予以重视。

参考文献(References):

陶琰,高振敏,罗泰义,等. 云南金宝山超镁铁岩原始岩浆成分反演[J]. 岩石学报, 2002,18(1):70-82.

TAO Yan, GAO Zhenmin, LUO Taiyi, et al. Inversion of primary magma composition for Jinbaoshan ultramafic intrusion, Yunnan[J]. Acta Petrologica Sinica, 2002,18(1):70-82.

陶琰,朱丹,高振敏,等. 金宝山铂族元素矿床铂族元素的热液活动研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003,22(1):32-37.

TAO Yan, ZHU Dan, GAO Zhenmin, et al. Study on PGE Remobilization in Jinbaoshan PGE Deposit[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2003, 22(1):32-37.

王生伟,孙晓明,石贵勇,等. 云南金宝山和白马寨铜镍硫化物矿床铂族元素(PGE)地球化学的差异及其成因意义[J]. 地质学报, 2007,81(1):93-108.

WANG Shengwei, SUN Xiaoming, SHI Guiyong, et al. Distinction of Platinum Group Elements (PGE) Geochemistry between the Jinbaoshan and Baimazhai Magmatic Sulfide Deposits in Yunnan Province, China, and Its Implication for Ore Genesis[J]. Acta Geologica Sinica, 2007,81(1):93-108.

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 Element~ (PGE) and Main Types of PGE Deposits in the World[J]. Geoscience, 2007, 21(2):361-370.

朱丹,陶炎,罗泰义,等. 云南金宝山镁铁-超镁铁岩的地球化学特征及成因[J]. 矿物学报, 2003,23(1):63-69.

ZHU Dan, TAO Yan, LUO Taiyi, et al. Geochemical and Petrological characteristics of mafic and ultra-mafic intrusions in Jinbaoshan, Yunnan[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2003, 23(1):63-69.

WANG C Y, ZHOU M F, ZHAO D G. Mineral chemistry of chromite from the Permian Jinbaoshan Pt - Pd sulphide-bearing ultra-mafic intrusion in SW China with petrogenetic implications[J]. Lithos, 2005,83:47-66.

WANG C Y, PRICHARD H M, ZHOU M F, et al. Platinum-Group minerals from the Jinbaoshan Pd - Pt deposit, SW China: Evidence for magmatic origin and hydrothermal alteration[J]. Mineral Deposita, 2008, 43:791-803.

CAMPBELL I H, NALDRETT A J, BARNES S J. A model for the origin of platinum-rich sulphide horizons in the Bushveld and Stillwater Complexes[J]. J Petro. 1983, 24:133-165.

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.
- 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.
- BARNES, S J, MAIER, W D. Platinum-group elements and microstructures of normal Merensky Reef from Impala Platinum Mines, Bushveld Complex[J]. *Journal of Petrology*, 2002, 43, 103-128.
- CAWTHORN R G, MERKLE R K W, VILJOEN M J. Platinum-group element deposits in the Bushveld Complex, South Africa[M]//Cabri L J. *The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-group Elements*. Montreal: CIM, 2002, 54: 389-429.
- HOLWELL D A, Jordaan A. Three-dimensional mapping of the Platreef at the Zwartfontein South mine: Implications for the timing of magmatic events in the northern limb of the Bushveld Complex South Africa [J]. *Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy*, 2006, 115: 41-48.
- MCDONALD I, HOLWELL D A, ARMITAGE PEB. Geochemistry and mineralogy of the Plat reef and "Critical Zone" of the northern lobe of the Bushveld Complex, South Africa: Implications for Bushveld Stratigraphy and the development of PGE mineralization [J]. *Mineralium Deposita*, 2005, 40: 526-549.
- KINNAIRD J A, KRUGER F J, NEX PAM, et al. Understanding chromitite formation—a key to understanding processes of platinum enrichment [J]. *Trans Inst Min Metall Sec B Appl Earth Sci*, 2002, 111B: B23-B35.
- NALDRETT, A. J., WILSON, A., KINNAIRD, J., Chunnnett, G., PGE tenor and metal ratios within and below the Merensky Reef, Bushveld Complex; implications for its genesis[J]. *Journal of Petrology* 2009, 50, 625-659.
- IRVINE T N, KEITH D W, TODD SG. The J – M platinum palladium reef of the Stillwater Complex, Montana. II. Origin by double convective magma mixing and implications for the Bushveld Complex [J]. *Econ Geol*, 1983, 78: 1287-1334.
- LAMBERT D D, WALKER R J, MORGAN J W, et al. Re – Os and Sm – Nd isotope geochemistry of the Stillwater Complex, Montana: implications for the petrogenesis of the J – M Reef [J]. *J Petrol*, 1994, 35: 1717-1753.
- IRVINE T N, SHARPE M R. Magma mixing and the origin of stratiform oxide ore zones in the Bushveld and Stillwater Complexes, in Gallagher, M. G., Ixer, R. A., Neary, C. R., and Prichard, H. M., eds., *Metallogeny of basic and ultrabasic rocks*[M]. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1986, 183-198.
- NALDRETT A J, KINNAIRD J, WILSON A, et al. Concentration of PGE in the Earth's crust with special reference to the Bushveld complex[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(5): 264-297.
- MONDAL S K, MATHEZ E A. Origin of the UG2 chromitite layer, Bushveld Complex[J]. *Journal of Petrology*, 2007, 48(3): 495-510.
- HULBERT L J, DUKE J M, ECKSTRAND OR, et al. Geological environments of the platinum group elements [J]. *Geological Survey of Canada. Open File*, 1988, 1440: 3-99.
- LEE C A, BUTCHER A R. Cyclicity in the Sr isotope stratigraphy through the Merensky and Bastard Reef units, Atok section, eastern Bushveld Complex[J]. *Econ. Geol.*, 1990, 85: 877-883.
- ARNDT N, JENNER G, OHNENSTETTER M, et al. Trace elements in the Merensky Reef and adjacent norites Bushveld Complex South Africa[J]. *Mineralium Deposita*, 2005, 40: 550-575.
- MCDONALD I, HOLWELL D A. Did lower zone magma conduits store PGE-rich sulphides that were later supplied to the Platreef [J]? *South African Journal of Geology*, 2007, 110(4): 611-616.