金宝山铂族元素矿床深部熔离作用研究*

A Study on Magmatic Segregation of Sulfide Liquids in Magma Chamber of Jinbaoshan PGE Deposit

陶 琰[1] 高振敏[1] 朱 丹[1] 罗泰义[1] 祁敬东[2] 禾英军[2]

(1 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学开放实验室，贵州 贵阳 550002；
2 云南地矿厅第三地质大队，云南 大理 671000)

Tao Yan[1], Gao Zhenmin[1], Zhu Dan[1], Luo Taiyi[1], Qi Jingdong[2] and He Yingjun[2]

(1 Open Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China; 2 The Third Geology Survey Team, Yunnan Bureau of Geology and Mineral Resources, Dali 671000, Yinnan, China)

摘 要 金宝山铂族元素矿床以成矿岩体小、储量大、品位低、贫铜镍为显著特征。研究认为，深部硫化物熔离导致了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，是金宝山铂族元素矿床成矿的主导控制因素，而主要受橄榄石结晶分异造成的熔体浓缩或温度的自然降低产生的硫化物熔离是导致矿床品位低、贫铜镍的原因。

关键词 硫化物熔离 铂族元素 矿床 金宝山 云南

云南省弥渡县金宝山铂族元素矿床产出在一个很小的岩体中，但却是我国迄今所发现的规模最大的以铂族元素为主的矿床，代表西南暗色岩中一个非常重要的成矿类型，作为认识西南暗色岩系铂族元素成矿作用的一个窗口，我们在原有地质勘查和有关研究的基础上开展了对金宝山成岩成矿作用的系统研究。“小岩体成大矿”—深部硫化物熔离是最重要的环节，金宝山就是一个典型的实例，本文旨在探求金宝山矿床成矿作用中深部熔离的地球化学证据，认识金宝山矿床深部熔离作用的特点。

1 矿床基本地质特征

含矿岩体金宝山岩体位于扬子地台西南缘的宁菠－弥渡基性-超基性岩带中，全岩 Rb-Sr 同位素年龄 304.87 Ma（杨廷祥，1998），岩体呈似层状（岩席）产出，为一小型超镁铁岩体，岩体空间展布呈两翼平缓的短轴背斜形态，侵位于泥盆系金宝山组白云岩、泥灰岩、砂板岩中，主要由橄榄岩、辉橄岩及橄辉岩组成。矿体也呈似层状产出，分为 5 个矿层群，分别位于岩体底部（Ⅰ矿层群）、中部（Ⅱ、Ⅲ矿层群）和顶部（Ⅳ、Ⅴ矿层群），矿床大部分工业储量集中在底部矿层群和中部矿层群中。各矿层以含硫化物为特征，矿床属铜镍硫化物型，但铜镍含量较低，未达到工业品位。铂族元素富集 Pt、Pd 、Pt、Pd 含量较 Rh、Ru、Or、Ir 高一个数量级左右，Pt+Pd 品位一般在 1×10^{-6} 左右，品位较高的矿层在 2×10^{-6} 以上，样品最高品位可达 17×10^{-6}。

* 中国科学院知识创新工程（KZCX2-101）资助
第一作者简介 陶 琰，男，1963 年生，博士，矿床地球化学专业。

2 矿床铂族元素特征及金宝山岩体原始岩浆成因

铂族元素在岩浆演化过程中，其相对比例往往难以发生改变，因此，能够较好的指示岩石或矿石的成因属性，特别是 Pd 和 Ir 分别是铂族元素地球化学序列上的两个极端元素，在部分熔融作用中强烈分异，其比值被广泛用来区分岩石的成因类型，研究表明，地幔捕虏体、阿尔卑斯型橄榄岩及科马提岩 Pd/Ir 比值较低，铂族元素的原始地幔标准化型式是近似于水平的曲线，金宝山岩体钯族元素较铱族元素高约一个数量级，Pd/Ir 一般在 10 以上，铂族元素的原始地幔标准化型式为显著的左倾型（图略），显示其原始岩浆为玄武质岩浆。另外，金宝山超镁铁岩微量元素表现出显著的分异特征，强不相容元素相对弱不相容元素明显富集，原始地幔标准化（PMN）型式为右倾型（图略），基本类似于洋岛玄武岩（OIB），而同强不相容元素亏损的大洋中脊玄武岩（N-MORB）显著不同，反映金宝山超镁铁岩原始岩浆源区的原始地幔属性。

3 深部硫化物熔离作用的地质地球化学证据

由于铂族元素及铜、镍等亲铜元素具有强烈的亲硫性，硫化物熔体能够从硅酸盐熔体中大量捕集铂族元素及铜、镍等亲铜元素。金宝山矿床在矿层产出特征上，矿层以含硫化物为特征，如图 1-a、图 1-b 所示，铂族元素含量与铜镍硫化物的含量高低具有良好的一致性，但与 Cr 不相关（图略）。据此认为硫化物熔离作用是金宝山铂族矿床成矿的主导控制因素。

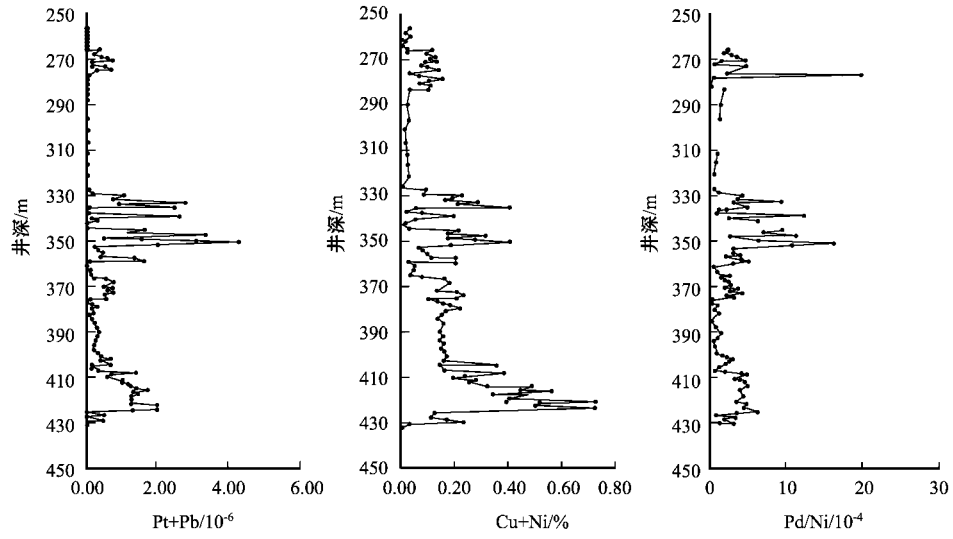


图 2 5ZK17 钻孔剖面成矿元素含量及比值变化曲线

(数据来源于云南地质三大队,1980；杨廷祥 1989)

金宝山是一个很小的岩体，但形成了较大工业储量的铂族元素矿床，（Pt+Pd）>1×10^{-6}的矿化部分占整个岩体的将近 1/4，整个岩体有非常高的铂族元素平均含量，杨廷祥（1989）根据矿区勘查资料统计全岩体铂族元素平均含量高达 0.5×10^{-6}，其中 Pd 为 0.298×10^{-6}（由于取样密度在矿层比非矿化层大，统计值偏高，我们曾估计 Pd 在 110×10^{-9} 以上）（陶琰，2000）。根据现有地幔铂族元素丰度及地幔熔融机制的认识，原始地幔部分熔融生成的原生岩浆不可能达到如此高的铂族元素初始浓度。原生岩浆铂族元素含量主要受地幔源岩铂族元素丰度、熔融程度及熔融机制的影响，如果地幔源区经历硫化物的亏损后，低程度部分熔融可能形成相当高铂族元素含量的熔体，但岩石微量元素地球化学特征表明地幔源没有亏损的迹象，而未亏损的原始地幔部分熔融作用形成的原生岩浆，铂族元素含量具有明确的限定，Keays R R（1995）、Rehkamper 等（1999）假定原始地幔中 Pd 的丰度为 4×10^{-9} 左右，部分熔融程度在 20%左右时硫化物耗尽，

铂族元素 Pd 在模式上最高可以达到的浓度大约为 20×10^{-9}。金宝山成矿岩体中 Pd 的平均含量大大高于原始地幔部分熔融岩浆可能的高限浓度，必然存在着一个铂族元素的富集机制：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。

铂族元素的原始富集从岩体 Pd/Y 比值特征也可以得到良好的体现。Pd/Y 比值对岩浆作用过程有重要的成因意义，如果地幔部分熔融过程中，熔体处于硫化物饱和状态，Pd 将大部分保留于地幔残余硫化物中，而大离子亲石元素 Y 大部分进入熔体相中，则必然导致熔体显著低于地幔的 Pd/Y 比值特征，反之， Pd、Y 均基本上全部进入熔体相中，在熔体中的含量同是熔融程度的反比函数，其比值应基本接近于地幔比值。金宝山岩体 Pd/Y 比值如表 1 所列，Pd/Y 远远大于地幔比值，即使有限的几个非矿化样品也都明显高于地幔比值，体现岩体铂族元素相对原生岩浆的高度富集

表 1　金宝山超镁铁岩 Pd/Y 比值

样号	样品类型(层位)	Pd/Y×1000
1339-6R	矿石	1579.033
145-3R	矿石	3382.504
145-4v	矿石	3852.366
B33	非矿岩石(岩体顶部)	3.754255
19-19	非矿岩石(岩体中部)	80.03983
1309-2	非矿岩石(岩体下部)	14.85126
地幔		1.13

注：原始数据待发表

4　讨　论

（1）深部熔离模式：上述分析表明，岩体相对于任何可能的原生岩浆有高度富集的铂族元素含量，铂族元素的富集必然来自于比岩体本身总量大得多的岩浆体系，而且岩体明显缺乏就地分异的堆积结构和同就地分异相协调的岩性比例，我们认为铂族元素在岩体中的原始富集是深部（岩浆房）过程的效果，矿化与硫化物良好的相关性则指示其富集作用是硫化物的熔离。汤中立（1996）曾指出岩浆深部硫化物熔离富集作用是铜镍硫化物矿床成矿的重要条件。

陶琰等（2002）认为原始岩浆在深部岩浆房结晶分异，初略估计原始岩浆经历了大约 11%左右的橄榄石结晶和一定比例的斜长石结晶，成岩岩浆是由结晶出来的堆晶橄榄石和部分残余融体构成的“ 晶－液糊 ”体系。在岩石中橄榄石普遍具有熔蚀结构，是体系侵位上升过程中压力降低与融体反应熔蚀的结果。采用 Ghiorso 等（1995）和 Asimow 等（1998）“ APPLET MELTS ”岩浆结晶演化程序对金宝山岩石化学组成及矿物组成进行拟合计算（待发表），原始岩浆结晶分异的初始物理化学条件大约在 p=0.37GPa，t=1320℃，相当于在 10 km 深度之下。

硫化物熔离与成岩机制相适应，原始岩浆在造岩矿物结晶分异的同时，由于岩浆熔体中硫化物浓度的不断增加或体系的温度降低，在熔体中硫化物逐渐达到过饱和而出现硫化物的熔离，熔离硫化物液滴在重力的作用下与结晶分异出的橄榄石一样，向岩浆房的下部沉降，并成为堆积部分的组份之一与部分残余熔体混合形成侵位岩浆。

（2）矿层群成因:根据上述深部熔离模式，深部熔离的硫化物熔滴向岩浆房下部沉降富集后与堆积橄榄石混合部分残余硅酸盐熔体侵位，受流动分异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的，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，和不同的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，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。

（3）成矿元素在垂向上的变化；成矿元素在垂向上的变化往往被作为考察矿床成因机制的重要研究对象，金宝山岩体垂直层序上不同分配系数亲铜元素比值的变化可以采用岩浆脉冲注入后硫化物就地熔离和重力堆积模式解（陶琰，2000），但问题在于就地熔离作用无法解释金宝山岩体铂族元素在整体上的高度富集。深部熔离作用能否协调成矿元素在垂向上的变化是必然要考虑的问题。通过硫化物熔离模式计算表明，在硫化物含量较低的情况下（如金宝山矿床），岩石或层序中硫化物的含量（f_{sul}）显著的影响其成矿元素的含量及不同分配系数（$D^{sul/melt}$）亲铜元素的比值，影响因素另外还包括熔离硫化物与原始硅酸盐融体的平衡比例（R）以及发生熔离的初始岩浆的成矿元素的初始浓度，岩石或层序中硫化物的含量（f_{sul}）

越高，则成矿元素的含量及高度亲铜元素与一般亲铜元素的比值（如 Pd/Ni）越大。根据上述深部熔离模式，高度富集铂族元素及铜镍的侵位岩浆，受流动分异的影响及侵位后的再沉降作用，可造成岩体中硫化物的不均匀分布，根据元素地球化学模式计算，硫化物富集层，不仅是铂族元素及铜、镍等亲铜元素赋存层位，同时也具有高的 Pd/Ni 比值；而在硫化物贫乏的岩层段，亲铜元素含量及 Pd/Ni 比值则迅速降低，。从图 1 看到，在金宝山岩体垂直剖面上，铂族元素（Pt+Pd）、铜镍含量及 Pd/Ni 比值（图 1-c）呈协调性的同步变化，硫化物富集层，Pd/Ni 比值可以达到 5×10^{-4} 以上，硫化物贫乏层段 Pd/Ni 比值降低到 1×10^{-4} 甚至更低的水平，假定初始岩浆浓度估计:$Pd^0=20\times10^{-9}$、$Ni^0=300\times10^{-6}$（参考 Reikamper M et al.,1999），即 $Pd^0/Ni^0=0.67\times10^{-4}$，那么，金宝山岩体亲铜元素含量及 Pd / Ni 比值的变化幅值范围基本上与熔离参数 R=20000 的硫化物含量模式一致（图 1-c）。因此认为，控制其变化的主要因素是层序上硫化物含量的变化。

（4）金宝山深部熔离作用的特点：参考 Keays（1995）、Rehkamper 等（1999）的文献，假定金宝山原始岩浆 Pd 和 Ni 的初始浓度分别为 20×10^{-9} 和 300×10^{-6}，对金宝山 5ZK17 钻孔岩芯连续劈分采样的分析数据初始浓度标准化，投点到熔离－硫化物含量模式图，可以看出，大部分投点落在 R=20000 的熔离线附近，如此高和相对稳定的平衡硅酸盐熔体比例需要与大量硅酸盐融体的高度均和，对于像金宝山这样一个很小的岩体而言，就地熔离的模式是难以想象的，因为不可能存在有类似于 Bushveld 等大岩体可能的对流机制 （Champbell I H et al., 1983）。可能考虑的模式只能是限于深部岩浆房内的作用过程。另外，还表现出岩体硫化物的含量水平是很低的，基本上都小于 1%（样长 1 m 左右），一般矿层硫化物含量在 1‰～1%（Pd*>30），与金宝山矿床的实际情况基本相符。正是由于这种高平衡硅酸盐熔体比例（R）的熔离和岩体中低的硫化物含量造成了金宝山特征的矿化现象——相对贫铜、镍的铂族元素矿化，成为以铂族元素为主要成矿元素的矿床，从而有别于以铜镍为主的矿床如金川，金川有硫化物富集得多的矿石，我们认为在深部熔离的机制上存在差异，如金川矿床的熔离作用可能受地壳硫的混染作用影响更强一些（解广轰，1998），亲铜元素在某个空间部位上被系统的捕集并集流成矿浆，而金宝山岩体则主要受结晶分异造成的熔体浓缩或温度的自然降低产生硫化物的熔离，熔离的硫化物少而分散，集中程度有限，金宝山超镁铁岩体的硫同位素虽表现有一定的混染影响，但影响较小（杨廷祥，1989）。

5 结 论

金宝山岩体原始岩浆源区为原始地幔性质部分熔融形成的玄武质岩浆，但成矿岩体中 Pd 的平均含量大大高于原始地幔部分熔融岩浆可能的高限浓度，深部硫化物熔离是金宝山铂族元素矿床成矿的主导控制因素，导致了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。原始岩浆在造岩矿物结晶分异的同时，在熔体中硫化物逐渐达到过饱和而出现硫化物的熔离，熔离的硫化物融滴向岩浆房下部沉降富集后与堆积橄榄石一起混合部分残余硅酸盐熔体侵位，受到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，形成似层状的含铂族元素硫化物富集层。

金宝山岩体成矿作用受硫的混染影响较小，主要受结晶分异造成的熔体浓缩或温度降低产生硫化物的熔离，熔离的硫化物少而分散，集中程度有限，表现在熔离模式参数上为高的平衡硅酸盐熔体比例和矿石中低的硫化物含量，形成了金宝山特征的矿化现象—相对贫铜、镍的铂族元素矿化。

参 考 文 献

解广轰，汪云亮，范彩云，等. 1998. 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)，28(增刊)：31～36.

汤中立.1996. 中国岩浆硫化物矿床的主要成矿机制[J]. 地质学报，70(3)：237～243.

陶琰，高振敏，罗泰义，等. 2000. 云南省金宝山铂钯矿成矿机制探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报.，19(4)：337～338.

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

Champbell I H，Naldrett A J and Barnes S J. 1983. A model for the origin of the platinum-rich sulfide horizons in the Bushveld and Stillwater Complexes[J]. J．Petrology， 2 4：133～165 .

Keays R R．1995. The role of komatiitic and picritic magmatism and S-saturation in the formation of ore deposits[J].Lithos， 34：1～18..

McDonough W F and Sun S S. 1995.The composition of the earth[J] .Chemical Geology， 120：223～253 .

Peach C L，Mathez E A. 1996. Constraints on the formation of platinum-group element deposits in igneous rocks[J]. Economic Geology， 91：439～450.

Rehkamper M，Halliday A N，Fitton J G，et al.1999Ir. Ru，Pt and Pd in basalts and komatiites：New constraints for the geochemical behavior of the platinum-group elements in the mantle[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta，.63：3915～3934.