

川西盐边县红格钒钛磁铁矿中镍钴硫化物的 铂族元素地球化学特征

张腾蛟¹⁾, 李佑国¹⁾, 张月姣²⁾, 赵伟³⁾

1) 成都理工大学地球科学学院, 中国成都, 610059;

2) 澳大利亚国立大学, 澳大利亚堪培拉, 2601; 3) 湖南省地质调查院, 中国长沙, 410116

内容提要: 世界上尚未发现过 V—Ti 磁铁矿和硫化物矿床共生, 在川西延边县红格矿床, 原认为在矿体底部存在一个富含 PGE、Cr 的层位, 但我们在多个钻孔中取样分析, 均未发现。然而我们发现在红格矿床白草矿段存在大量的块状硫化物矿体, 硫化物贯入铁矿后, 可叠加形成镍—钴—铁矿体。块状硫化物矿石主要成分为磁黄铁矿(94%)、镍黄铁矿、黄铜矿, 少量普通辉石、次透辉石、古铜辉石、普通角闪石、金云母、磁铁矿、钛铁矿、中长石等。其中 Ni 0.72% ~ 0.90%, Co 0.10%。主要赋存在磁黄铁矿中。通过铂族元素分析发现, 块状硫化物(磁黄铁矿) Cu/Pd 为 12908 ~ 15109, 含硫化物 3% 的贯入式铁矿 Cu/Pd 为 24520。Cu/Pd 比值远高于原始地幔值, 暗示有少量硫化物在岩浆源区的残留。同时, 在铁矿形成之前已发生过硫化物的熔离。红格地区样品的 Pd/Ir 值变化范围为 2.8 ~ 30 主要集中在 8 ~ 14 附近, 可见红格地区经历过很强的岩浆结晶作用。红格矿床的 PGE 元素已发生明显的分异现象, 暗示硫化物与铁可能在流体中有共同富集的情况。不同矿段的 PGE 含量有明显差异, 很难用一个岩浆房进行解释, 可能是多级岩浆房岩浆演化的产物。暗示深部还有岩浆房, 在地下深处, 还可以找 Ni—Cu—PGE 和 Fe—Ti—V 矿床。

关键词: 红格矿床白草矿段; 镍钴硫化物; 硫化物珠滴; 钒钛磁铁矿; 铂族元素

峨眉山大火成岩省(图 1)以世界级超大型 V—Ti—Fe 氧化物矿床, 大、中、小型 Ni—Cu—(PGE) 硫化物矿床星罗棋布, 罕见的成矿多样性有别于其它大火成岩省。

在峨眉大火成岩省中, 占绝大多数的是岩浆演化形成的溢流玄武岩(李宏博, 2015; 董书云, 2009), 这些溢流玄武岩是原始岩浆在岩浆房中经历结晶分异和岩浆混染的产物(Zhou, 2013)。与溢流玄武岩共生的同期层状岩体代表了深部岩浆房系统, 记录了岩浆在岩浆房中演化的全过程(柏中杰, 2009)。在攀西地区, 大量出露与玄武岩共生的层状岩体, 主要有两种类型, 一是与钒钛磁铁矿有关的层状基性—超基性岩体, 另一是与铜镍硫化物(铂族元素)矿床有关的小型镁铁—超镁铁岩体(肖龙, 2007)。

在红格矿床白草矿段, 我们识别出多个块状镍钴硫化物矿体, 矿体呈透镜状或脉状, 透镜状矿体的

规模多数在 10 ~ 50m。块状镍钴硫化物矿石主要由磁黄铁矿(94%)、镍黄铁矿、黄铜矿、少量普通辉石、次透辉石、古铜辉石、普通角闪石、金云母、中长石、磁铁矿、钛铁矿等矿物组成。矿床中的磁铁矿矿石中均发现有硫化物呈“珠滴”状存在, 黄铜矿常与磁黄铁矿、镍黄铁矿共生。野外可见明显的矿体和玄武岩互相穿插现象, 初步认为硫化物的形成时间和钒钛磁铁矿相当。

绝大多数学者认为, 这类矿石的形成是岩浆分异演化的结果, 而罗照华等(2014)认为是透岩浆流体作用的产物, 并提出了是含矿流体注入导致了岩浆分异作用而不是岩浆分异产生了成矿物质的论点。

对矿床的形成机制上尽管均认为钒钛磁铁矿矿石和铜镍硫化物矿石均是岩浆期形成的, 但是对其形成机制也还存在不同的认识, 前人的研究工作, 要么是针对 Fe—Ti—V 氧化物成矿或者 Ni—Cu 硫化

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(批准号:41073022)的成果。

收稿日期:2016-05-19; 改回日期:2017-05-14; 责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2017.04.016

作者简介: 张腾蛟, 男, 1988 年生。博士研究生, 矿物学岩石学矿床学专业, 主要从事氧化物矿床方向研究。Email: mackouowen@me.com。

通讯作者: 李佑国, 男, 1963 年生。教授, 博士生导师。Email: lyguo@cdu.edu.cn。

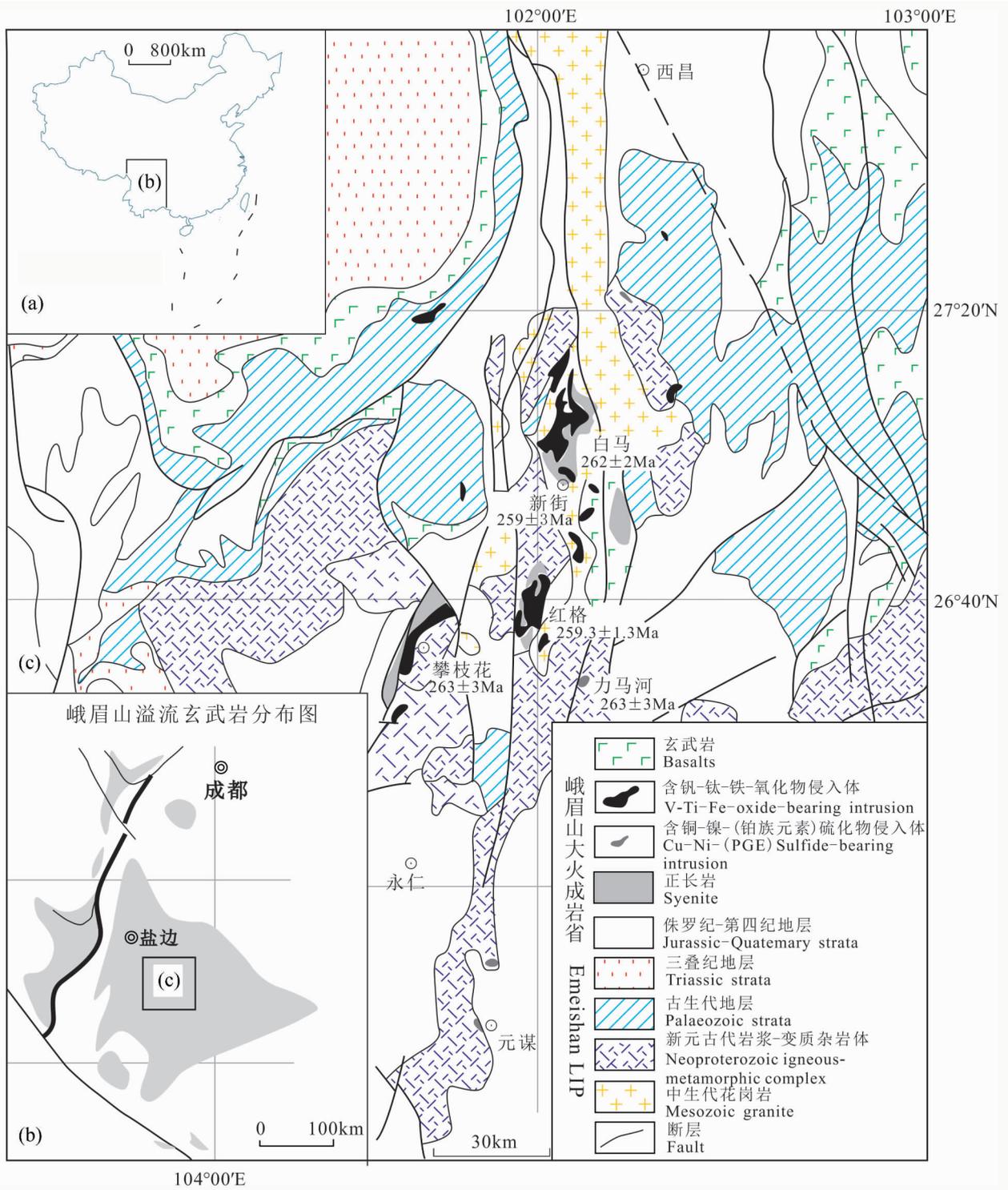


图 1 川西盐边县红格地区地质简图(据张招崇, 2009, 改编)

Fig. 1 geological map of Hongge area, Western Sichuan Yanbian county(modified from the Zhang Zhaochong, 2009&)

物(铂族元素)成矿,并且认为两者形成的物理化学条件不同,很难共生,而我们发现在红格白草矿段两者是可以共生的,那么这种共生的原因是什么?铁矿石中硫化物珠滴的存在,表明存在硫的微饱和,是

否有过硫化物的熔离和分离?

1 地质背景

红格矿床白草矿段位于攀西地区攀枝花市东,

韵律层	岩相带	岩层	厚度(m)	柱状图	主要岩石类型
第IV韵律层	辉长岩相带	上部岩层	203		块状辉长岩, 层状辉长岩, 上部夹薄层闪长岩
		中部岩层	50~303		角闪层状辉长岩, 底部夹有薄层辉石岩、橄辉岩
		下部岩层	44.5~315		含橄或橄辉暗色层状辉长岩为主, 下部有一层厚度不等辉石岩, 橄辉岩底部有一层厚度不大, 且不稳定的辉长岩
第III韵律层	辉石岩岩相带	上部岩层	31~88.4		含长辉岩、橄辉岩、橄辉岩
中部岩层		30~120		辉石岩、橄辉岩、辉橄岩	
下部岩层		15~53.83		含长辉石岩、辉石岩、橄辉岩、橄辉岩	
第I韵律层	橄辉岩岩相带	上部岩层	42~205.3		不等粒辉石岩, 细粒橄辉岩夹橄辉岩为主, 下部往往有包橄角闪橄辉岩夹层, 底部时见角闪辉石
		下部岩层	0~397		似斑状粗粒包橄角闪橄辉岩为主, 下部粗伟晶角闪辉石岩或角闪含橄辉石岩增多

图2 川西盐边县红格岩体韵律结构略图
Fig. 2 Rhythm texture of Hongge deposit, Western Sichuan Yanbian county

往南主要分布有白草、中梁子—黑谷田、马鞍山、红格、湾子田、中干沟等矿段。

矿床出露的地层比较复杂和零碎,前震旦(埃迪卡拉)纪地层主要为会理岩群(P_{thl})、震旦(埃迪卡拉)系灯影组(Z_{bdn})、二叠系峨眉山玄武岩(P_{2β})、三叠系—侏罗系白果湾群(T₃—J_{1bg}),新近系昔格达组(N_{2x})以及第四系(Q)等地层;各地层出露面积较小、分散零乱是本区地层分布的特点。

区内岩浆岩分布广泛,包括玄武岩、微晶(微细粒)辉长岩、辉长玢岩;辉长岩、橄辉岩、辉石岩;辉绿岩脉,辉长玢岩脉;致密块状铁矿石;正长岩;花岗岩等岩石类型。

矿区内构造较发育,其构造体系主要由两条南北向的深大断裂——昔格达断裂、安宁河断裂和区内一些列东西向的次一级断裂带组成。南北向的昔格达断裂似乎控制了基性—超基性含矿岩体的展布,区内矿床(点)除了受深大断裂的控制外,还受东西向的一系列次一级的断裂构造控制。

长期以来,人们将红格岩体当作典型的层状岩体来研究,才有了上述岩相带和韵律旋回的划分方案(图2)。事实上,红格岩体并非层状岩体,而更接近于盆状岩体(图3)。

属于红格超大型钒钛磁铁矿的北部矿段。

红格含矿岩体包括大小矿床(点)十几个,由北

2 金属硫化物的基本情况

我们在红格矿床白草矿段识别出的多个块状镍

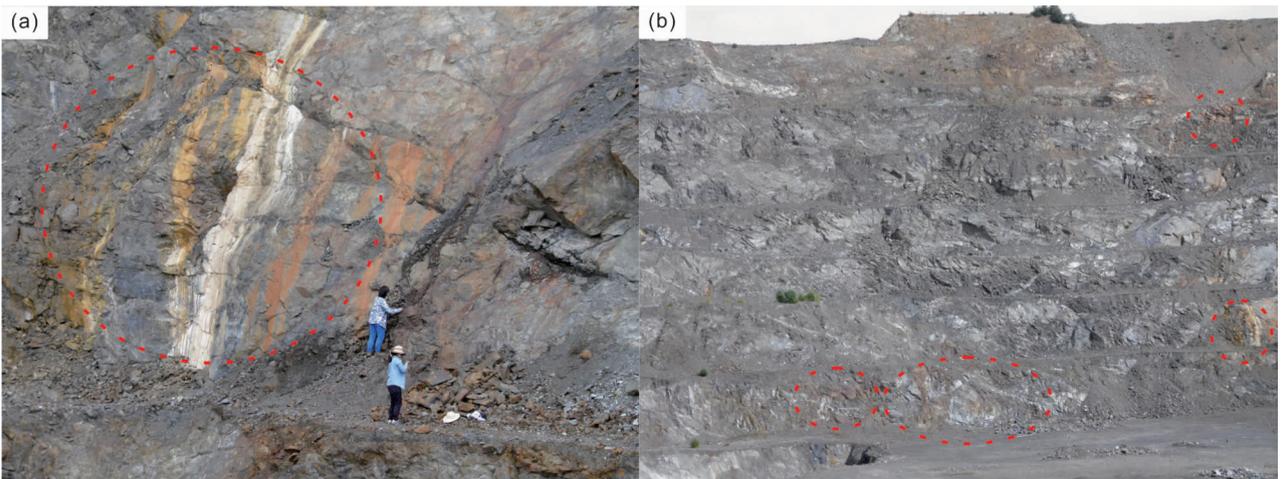


图4 川西盐边县红格矿床硫化物矿体的空间分布
Fig. 4 The spatial distribution of Sulfide orebody in Western Sichuan Yanbian county

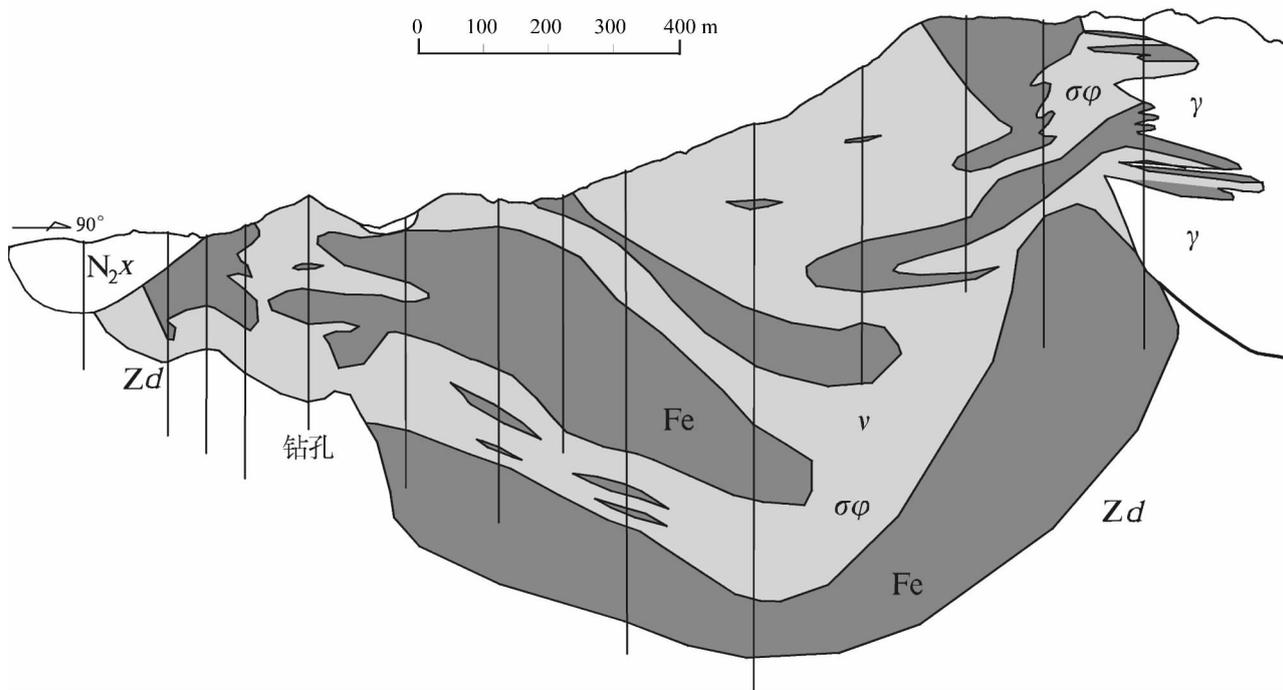


图3 川西盐边县红格矿床P112勘探线剖面图(据四川106地质队2010年资料重新圈定矿体,Fe为钒钛磁铁矿矿体)

Fig. 3 Profiles of the P112 exploratory line of the Hongge deposit, Western Sichuan Yanbian county (Re delineation the ore body, modified from 2010 data of the Sichuan 106 Geological Team)

钴硫化物矿体,呈透镜状或脉状(图4),透镜状矿体的规模多在10~50m,矿石中镍、钴和PGE的品位大致为Ni 0.8%、Co 0.10%、 Σ PGE 0.1g/t;超过10m范围的连续拣块组合样品,其Ni 0.4%±,Co 0.05%±,达到工业品位。块状镍钴硫化物矿石主要由磁黄铁矿(94%)镍黄铁矿、少量普通辉石、次透辉石、古铜辉石、普通角闪石、金云母、中长石、磁铁矿、钛铁矿等矿物组成。

红格矿床的钒钛磁铁矿矿石中普遍含有一定数量的硫化物,硫化物往往呈椭圆或近圆形态的集合体产出,多为1~5mm(大的可达15mm±),形似水珠,习惯上称之为硫化物珠滴。硫化物珠滴主要由磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿等矿物组成。

据张建廷等(2008)研究表明,钒钛磁铁矿矿石中的硫化物矿物含量多数为1%~2%,矿石中的钴、镍、铜主要以硫化物形态赋存,部分分散于铁钛氧化物和脉石中;硫化物相钴、

镍、铜的平均分配率随铁矿石品级增高而降低,钛磁铁矿中钴、镍、铜的平均分配率随铁矿石品级增高而增高(张建廷,2008)。

2.1 矿体与侵入体的空间形态关系

红格钒钛磁铁矿矿床白草矿段位于红格矿床的

北部,其地理位置(海拔高程)相对较高,含矿岩体为辉石岩和辉石橄榄岩,含矿岩体四周均为玄武岩,矿体及含矿岩体均赋存于峨眉山玄武岩的内部。常见含矿岩体穿插玄武岩的现象(图5)

野外观察表明,白草矿段的块状硫化物镍矿体,呈透镜状(图4)或脉状(图5a、c;Ni 0.72%~0.9%,Cu 0.1%)。正长岩脉可以穿入橄榄岩、辉石岩、辉长岩、玄武岩中,并与硫化物矿体有互相穿插现象(图5a、g、h);铁矿可以穿橄榄岩、辉石岩、辉长岩、玄武岩和正长岩(图5b、e),在正长岩中见有铁质辉石岩的岩石包体(图5f)。此外,偶见20~50cm厚的正长岩脉呈岩脉穿切铁矿体,表明,富铁矿体、正长岩岩脉与镍钴硫化物矿体的形成时间大体相当,且正长岩在形成时间上有一期。早期正长岩一般呈规模较小的网脉穿插玄武岩和辉长岩,但不会穿橄榄岩型或辉石岩型铁矿;晚期正长岩岩脉一般为20~100cm厚。

2.2 硫化物镜下特征

通过镜下观察发现,红格矿床白草矿段的磁铁矿矿石中均发现有硫化物呈“珠滴”状存在(图6a),黄铜矿常与磁黄铁矿、镍黄铁矿共生,有时也与硫镍钴矿、辉钴矿共生,有时被黄铁矿、磁黄铁矿

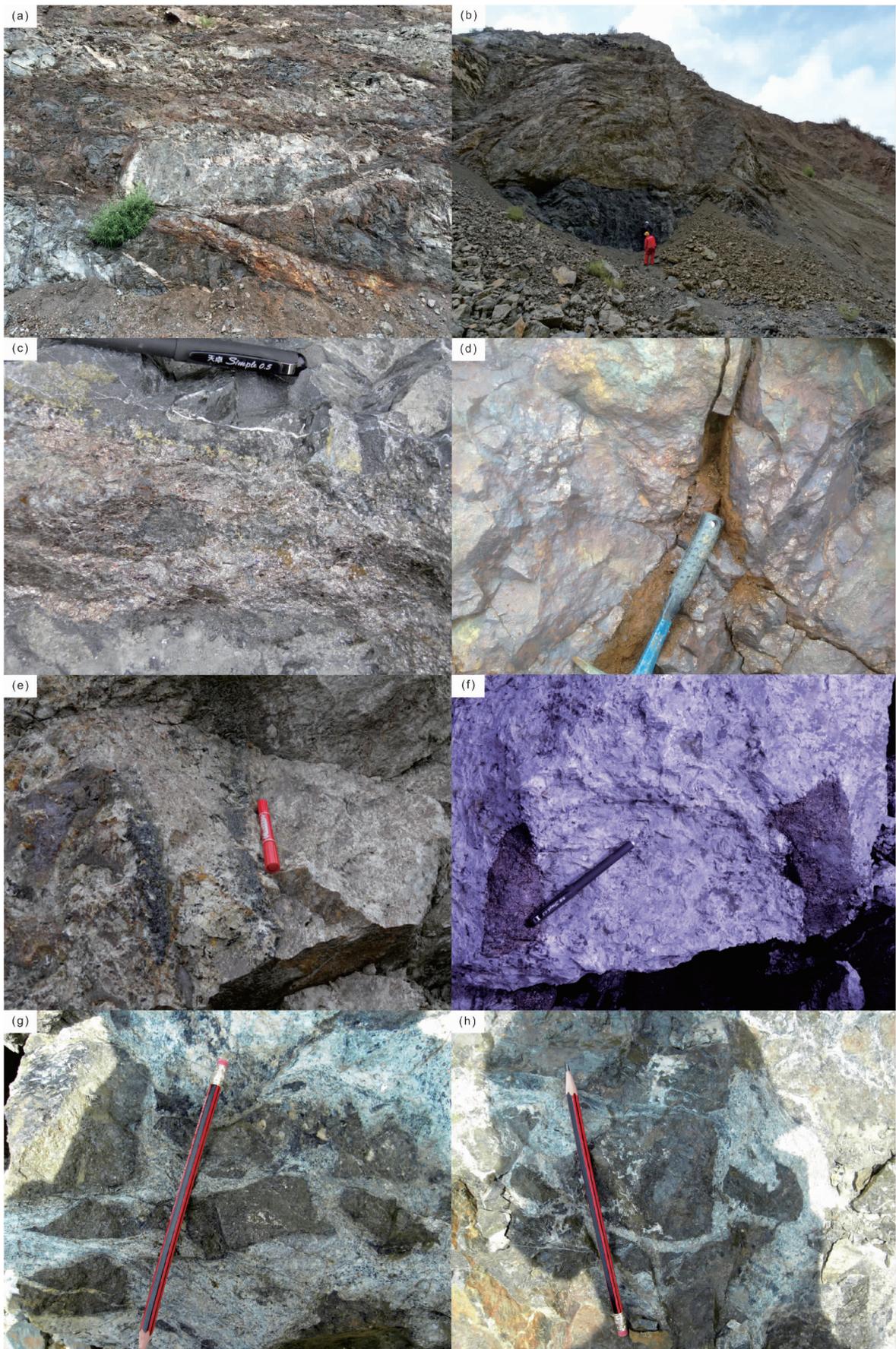


图 5 川西盐边县红格矿床野外典型照片

Fig. 5 Field photographs of Hongge area in Western Sichuan Yanbian county

- (a) 硫化物矿体与正长岩脉互相穿插; (b) 钒钛磁铁矿矿体穿入峨眉山玄武岩; (c) 块状铜镍硫化物矿脉穿入玄武岩; (d) 块状铜镍硫化物; (e) 铁矿脉穿中粒正长岩; (f) 粗粒正长岩岩体中的富铁辉石岩包体; (g) 正长岩穿插硫化物矿体; (h) 正长岩穿插硫化物矿体
 (a) Sulfide ore bodies and syenite dike interspersed with each other; (b) V—Ti magnetite ore body intercalation into the Emeishan basalt; (c) Massive sulfide intercalation into the Emeishan basalt; (d) Massive sulfide ore body; (e) Iron veins intercalation into the medium grained syenite; (f) Coarse grained syenite with ferroaugite xenolith; (g) Syenite insert sulfide ore bodies; (h) Syenite insert sulfide ore bodies

交代,形成围边结构。

白草矿段的贯入型铁钴镍矿石中硫化物的含量较高,常常大于 50% (图 6)。矿石矿物包括磁黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿和钛铁矿,其 Ni 和 Co 往往超过工业品位而构成铁钴镍矿体。

3 铂族元素分析

本文中的铂族元素在中科院贵阳地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成,采用碲共沉淀法测量矿物中的铂族元素的含量。此方法原理是:在大量基体溶液中,通过调整或还原酸度等方法将待测物沉淀出来,因分析物浓度微量,不能自行沉淀,所以需要大量的沉淀将待测物一并沉淀。含有铂族元素的样品经过高温消解后,将溶液蒸干,然后转化为酸的介质,加入碲溶液,用氯化亚硒将碲和铂族元素都还原为金属态,铂族元素就被大量的共沉淀出。实验步骤是称取 5~6g 岩石粉样,加入 Pt、Pd、Ir、Ru 稀释剂,利用 HF 和 HNO₃ 进行高温高压

消解,用 6mol/L 的盐酸使其溶解,再加入 Te 溶液和 SnCl₂ 溶液使其共沉淀,抽滤得到的沉淀用王水溶解后,过柱子,柱子为 P507 混合树脂,在酸性介质下可以除去干扰元素如 Cu、Ni 等元素。最后将溶液蒸干为一滴后定容至 3mL 待测。PGE 的测试是在在中科院贵阳地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室,用 Perkin Elmer Elan 9000 ICP-MS 仪器测定。

红格矿床 17 件样品的铂族元素分析结果列于表 1 中。总体上看,由北往南,从马鞍山矿段,红格矿床北矿段,红格矿床南矿段,其钒钛磁铁矿矿石的 PGE 含量逐渐降低。红格矿床各类岩矿石的铂族元素含量表明,铂族元素含量除了与岩矿石类型有关外,最重要的特点是与具体的位置有显著关系。

白草矿段的玄武岩具有较低的 PGE 含量,而马鞍山矿段的玄武岩 PGE 含量略高些(图 7),红格矿床的玄武岩 PGE 的分异较明显,其铁质玄武岩的含

表 1 川西盐边县红格矿床岩矿石铂族元素分析数据 (ng/g)

Table 1 Platinum group elements analysis data (ng/g) Western Sichuan Yanbian county

序号	样品编号	矿区	岩性	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd
1	HG1228	白草矿段	块状硫化物	1.715	0.860	1.525	6.963	16.967
2	HG1229	白草矿段	铁质玄武岩	0.022	0.022	0.024	0.113	0.186
3	HG1230	白草矿段	块状硫化物	1.455	1.489	0.919	64.407	40.405
4	HG12107	白草矿段	微晶辉长岩	0.031	0.078	0.012	0.119	0.255
5	HG1212	马鞍山矿段	富铜铁矿石	5.729	12.654	6.649	89.660	49.738
6	HG1222	马鞍山矿段	铁矿化橄辉岩	1.330	2.386	0.618	7.318	4.078
7	HG1223	马鞍山矿段	蚀变角闪橄辉岩	0.037	0.053	0.026	0.227	0.423
8	HG1291	红格矿床西北	蚀变深色辉长岩	0.183	0.170	0.058	1.079	2.097
9	HG1292	红格矿床北部	正长岩	0.008	0.022	0.011	0.029	0.240
10	HG1294	红格矿床北部	细粒辉长岩	0.393	0.166	0.151	5.678	3.791
11	ZK822	红格东北 ZK2908	铁矿化辉石玄武岩	0.491	0.154	0.202	6.315	5.954
12	ZK839	红格东北 ZK2908	微晶辉长岩	0.053	0.046	0.026	0.276	0.149
13	ZK843	红格东北 ZK2908	玄武岩	0.008	0.020	0.020	0.004	0.095
14	HG1246	红格	辉石岩型铁矿石	0.396	0.507	0.081	3.170	3.293
15	HG1269	红格	正长岩	0.235	0.048	0.034	0.075	0.849
16	ZK725	红格南 ZK11207	富铁矿石	0.079	0.203	0.030	0.530	0.682
17	ZK727	红格南 ZK11207	铁矿化磷灰石角闪辉长岩	0.039	0.037	0.012	0.377	0.266

注:样品在贵阳地球化学研究所重点实验室分析,每件样品分析 2~4 次求其算术平均值。

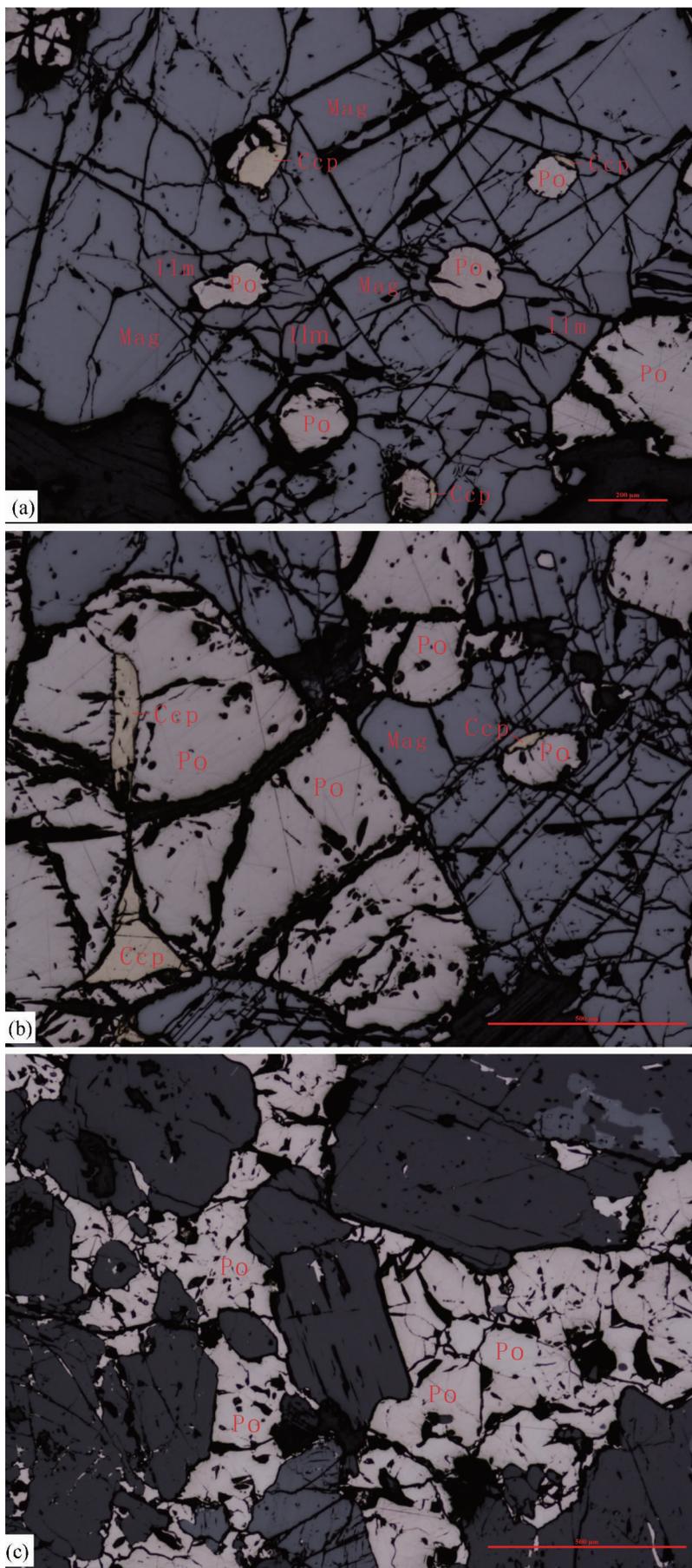


图6 川西盐边县白草矿段钴镍硫化物矿体中金属矿物关系图(反射光显微照像): (a) 铁钛氧化物含量高, 磁黄铁矿(Po)和黄铜矿(Cep)呈珠滴状分布于磁铁矿(Mag)和钛铁矿(Ilrm)中; (b) 金属硫化物与金属氧化物共生: 磁黄铁矿(Po)、黄铜矿(Cep)沿裂隙交代磁铁矿; (c) 块状钴镍硫化物矿体中磁黄铁矿(Po)沿围岩裂隙贯入

Fig. 6 Relations of metallic minerals in the sulphide ore body at Baicao mining area (microphotos of reflected light): (a) high Ti—Fe oxide content, pyrrhotite (Po) and chalcopyrite (Cep) appears as globule distributed in magnetite (Mag) and ilmenite (Ilm); (b) metallic sulfide and metallic oxide coexistence paragenesis relations: pyrrhotite (Po) and chalcopyrite (Cep) along the cracks; (c) Pyrrhotite along the cracked surrounding rock fracture penetration

量相对较高(图7中HG1229为铁质玄武岩)。总体上看,红格地区的峨眉山玄武岩,其铂族元素含量显著低于四川盐源地区的峨眉山玄武岩(图9)且PGE分馏程度也相差较大。

白草矿段的块状硫化物镍矿石以及马鞍山矿段的铁矿石具有高的PGE丰度(图7),红格矿床北矿段的辉石岩型铁矿的PGE含量低(图8a中HG1246样品),而红格矿床南矿段富铁矿石中的PGE含量更低(图8b)。

红格矿床各类岩矿石的铂族元素地球化学特征表明,不同矿段同类岩矿石的铂族元素含量差异显著(图10),除了与岩矿石类型有关外,最重要的特点是与红格矿床的不同矿段有显著关系。总体上看,由北往南,从马鞍山矿段,红格矿床北矿段,红格矿床南矿段,其钒钛磁铁矿矿石的PGE含量逐渐降低(图10)

红格矿床的PGE元素已发生明显的分异现象(图10),在铁矿和块状硫化物中富集,玄武岩和辉石橄榄岩中亏损。不同矿区的PGE含量有明显差异,很难用一个岩浆房进行解释,可能

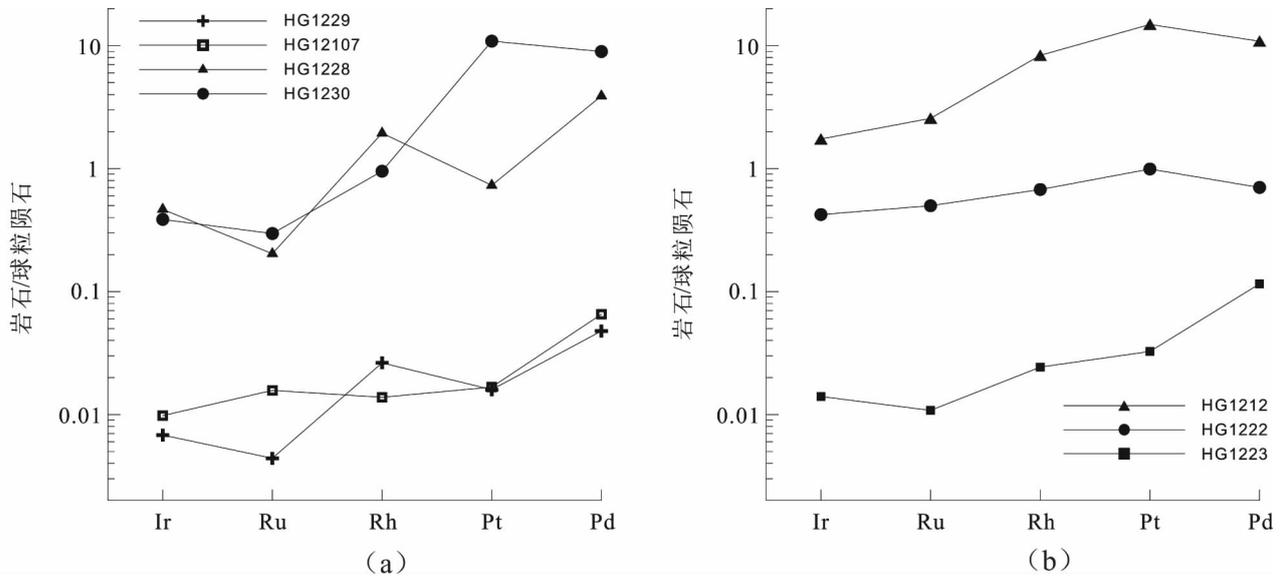


图7 川西盐边县红格矿床白草、马鞍山矿段铂族元素配分图

Fig. 7 PGE patterns of Baicao and Maanshan at Hongge area in Western Sichuan Yanbian county

(a) 白草矿段:HG1229、HG12107 为玄武岩;HG1228、HG1230 块状硫化物镍矿石;(b) 马鞍山矿段:

HG1212—含黄铜矿的铁矿石;HG1222—辉石橄榄岩型贫铁矿;HG1223—辉石橄榄岩

(a) Baicao area:HG1229、HG12107 basalt;HG1228、HG1230 Massive sulfide ore;(b) Maanshan area:HG1212

Iron ore containing chalcopyrite;HG1222 Pyroxene peridotite-type lean iron deposit HG1223 Pyroxene peridotite

是多级岩浆房岩浆演化的产物。

4 讨论

4.1 Cu/Pd 值

Cu/Pd 的值可用来表示岩浆型铜镍硫化物矿床的成因(钟宏,2006),PGE 在硫化物/硅酸盐熔体中的分配系数为 20000,远大于 Cu 的分配系数 1000 (Francis,1990;Fleet et al,1993,1996;(Song et al,2004),因此若早期岩浆经历过 S 饱和,硫化物熔离过程将使 Pd 相对于 Cu 更多的被带走,而剩余岩浆 Cu/Pd 值将明显增高,并高于相应的原始地幔值(钱壮志,2009;Barnes,1993;钟宏,2006)。如果岩浆为 S 不饱和,硫化物就不能熔离出来,使岩浆中更加富集 Pd(Qi,2008)。红格矿床中,块状硫化物的 Cu/Pd 的值为 12908~15109,平均为 14045。辉石岩型铁矿、铁质玄武岩的比值为 40257~48254,平均为 44256。中粒辉长岩的比值为 63235~76197,平均为 69716。而玄武岩和辉石橄榄岩中 Cu/Pd 的值更大,均大于 17000。由此可见,红格矿床岩、矿石中的 Cu/Pd 值均大于原使地幔岩浆的 Cu/Pd 值(6300)(钟宏,2005),暗示在铁矿形成之前已经发生过硫化物的熔离。

4.2 Pd/Ir 值

由于 PGE 诸元素的物理化学性质不尽相同,使其在部分熔融及岩浆冷却结晶过程中发生分异(Zhong,2011),Pd 与 Ir 的地球化学性质差异最大,故常用其比值来表示铂族元素的总体分异特征(宋谢炎,2009)。未分异物质的 Pd/Ir = 1(李佑国,2009,2013),部分熔融程度越高,Pd/Ir 值越小;岩浆结晶作用越强,Pd/Ir 值则越大(王敏芳,2012)。通过计算发现红格地区样品的 Pd/Ir 值变化范围为 2.8~26 主要集中在 6~10 附近(图 11),可见红格地区经历过很强的岩浆结晶作用。

4.3 硫化物矿体与 V—Ti 磁铁矿共同富集的讨论

硫化物矿体和 V—Ti 磁铁矿共同富集的原因不外乎以下两种原因:

(1)外部硫的加入:V—Ti 磁铁矿上侵过程中碰到富 S 的地层、流体等使之饱和,发生熔离作用。如力马河硫化物矿床:经历过多次的硫化物熔离(陶琰,2008)。

(2)岩浆先结晶橄榄石、辉石、斜长石(硫不进入)。结晶到一定程度,残余岩浆硫饱和然后析出。

传统的观点认为,形成于核—幔边界的地幔柱是所有 Ni 和 PGE 的终极来源(Howarth,2013)。地壳混染作用对于 Ni 和 PGE 的成矿应起着主导作用

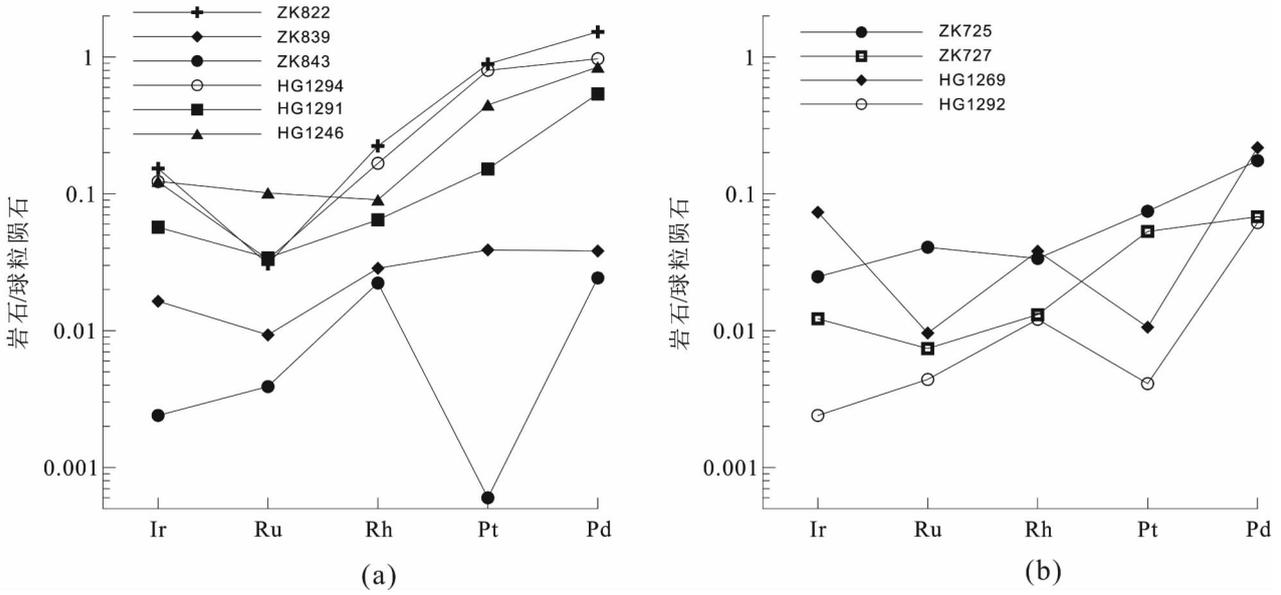


图 8 川西盐边县红格矿床铂族元素配分图

Fig. 8 PGE patterns of Hongge area in Western Sichuan Yanbian county

(a) 红格矿床北矿段:ZK822、ZK839、ZK843 为玄武岩;HG1294—细粒辉长岩、HG1291—辉石岩、HG1246—辉石岩型铁矿。(b),HG1269、HG1292 为红格矿床正长岩;ZK725 和 ZK727 为红格矿床南矿段 ZK11207 钻孔中采样;ZK725 富铁矿石,ZK727 铁质辉长岩)

(a) The northern section of Hongge area;ZK822, ZK839,ZK843 basalt;HG1294 fine grained gabbro;HG1291 augitite;HG1246 Pyroxenite type iron ore. (b) HG1269, HG1292 Syenite in Hongge area; ZK725 ZK727 sample in bore hole ZK11207 The southern section of Hongge area;ZK725 Rich iron ore;ZK727 iron gabbr

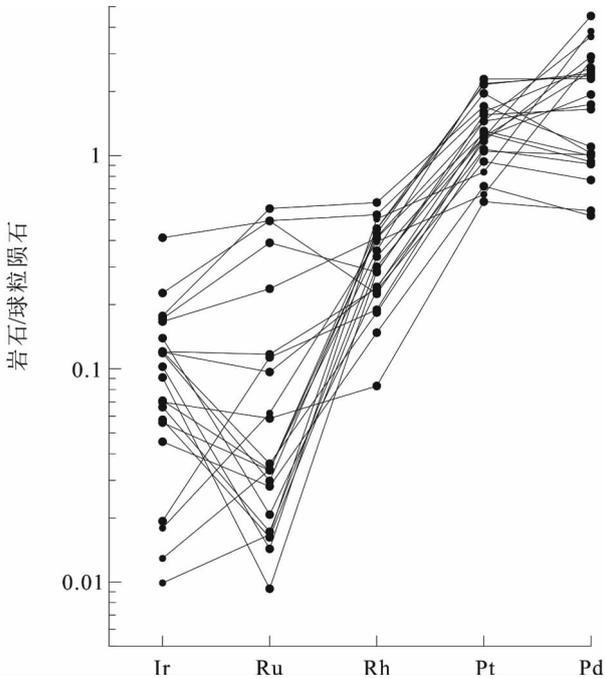


图 9 川西盐源地区峨眉山玄武岩铂族元素配分图

Fig. 9 PGE patterns of Emeishan basalt Yanyuan area

(Keays, 1995; Leshner, 2001)。但是夏林圻(2012)、徐义刚(2003)等认为,传统模式中提出的地壳混染作用不一定是制约大陆溢流玄武岩成矿的主要原因。峨眉山、西伯利亚和德干大陆溢流玄武岩都曾受到过强烈的地壳(或岩石圈)混染作用,为什么只有峨眉山和西伯利亚大火成岩省成矿,而德干大火成岩省不含矿?由此可见,地壳混染作用并不是成矿与否的关键(夏林圻,2012)。

Zhang 等(2008)新近的研究显示,含矿与不含矿大陆溢流玄武岩的地球化学特征存在明显差异,这反映它们的幔源存在有本质差异。因此,由于从古老克拉通岩石圈的硫化物中提取了 Ni 和 PGE,大陆溢流玄武岩才倾向有利于大规模 Ni—PGE 成矿,成为含矿的大陆溢流玄武岩,相反,不含矿的大陆溢流玄武岩则没有经历这一过程。

野外发现矿床内有金云母、原生角闪石(宋谢炎, 2005)出现,大量含水矿物共生说明成矿过程中有水参与。并且红格地区经历过很强的岩浆结晶作用。但是红格地区铂族元素含量明显高于力马河矿床,说明 V—Ti 磁铁矿和镍钴硫化矿体共生的原因很复杂,很有可能是多级岩浆演化的结果。

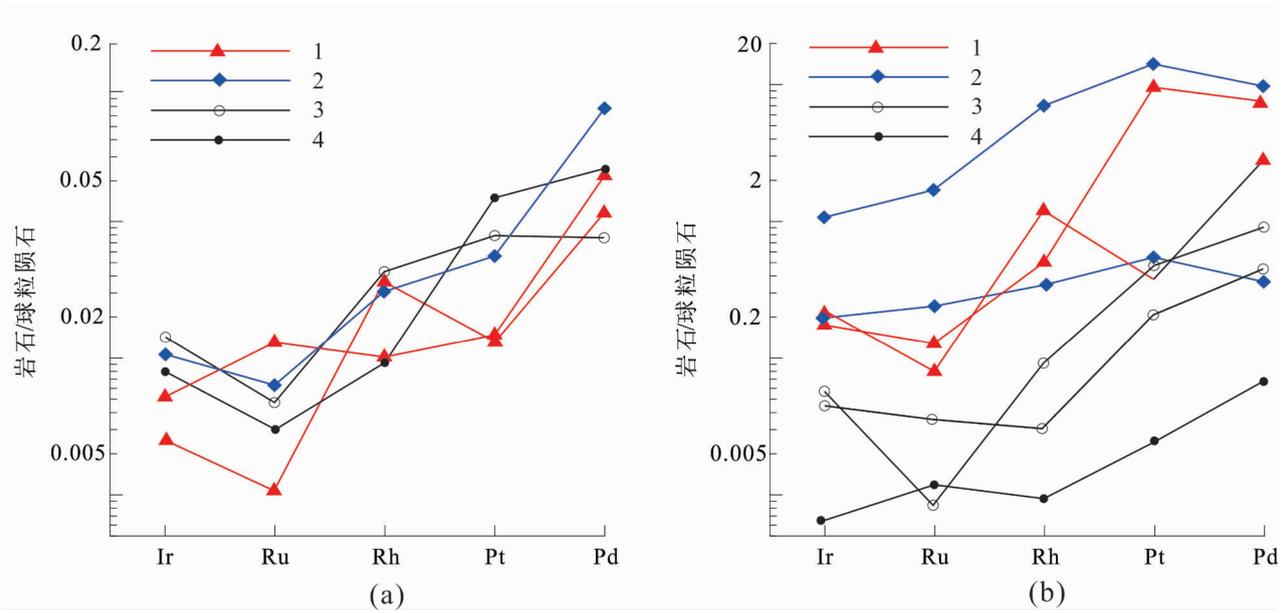


图 10 川西盐边县红格地区岩石和矿石铂族元素配分图

Fig. 10 PGE patterns of rocks and ores Hongge area in Western Sichuan Yanbian county

(a) 红格地区玄武岩、辉长岩、辉石岩；(b) 红格地区钒钛磁铁矿、Ni—Cu 块状硫化物矿石（虚线表示）；
地理位置由北往南为：1—白草矿段，2—马鞍山矿段，3—红格矿床北矿段，4—红格矿床南矿段

(a) : Basalt, gabbro, pyroxenite Hongge area; (b) : Hongge area V—Ti magnetite, Ni—Cu Massive sulfide ore (Dotted line); The geographical position from north to south; 1 Baicao mining area, 2 Maanshan mining area, 3 The northern section of Hongge area; 4 The southern section of Hongge area

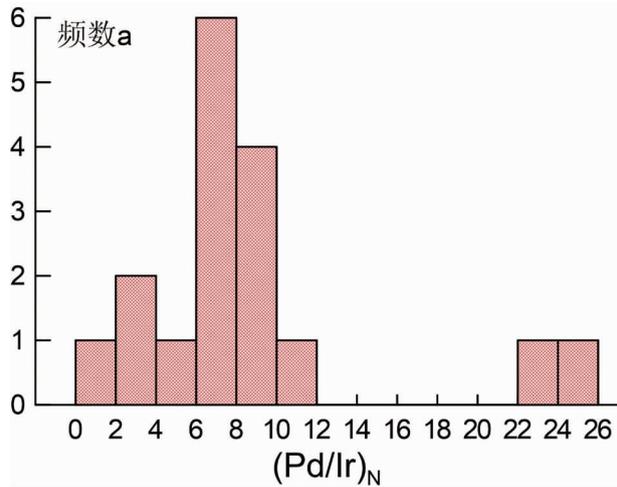


图 11 川西盐边县红格地区样品 Pd/Ir 频数图

Fig. 11 The sample frequency chart of Hongge area in Western Sichuan Yanbian county

5 结论

通过对红格矿床的岩体地质、矿床地质和铂族元素地球化学的研究，通过识别与成矿作用有关的

地质异常，取得的主要认识如下：

(1) 在红格矿床白草矿段，新发现了钴镍硫化物矿（化）体，当钴镍硫化物贯入铁矿体内部时，便形成了透镜状钴镍铁矿体。形成时间与钒钛磁铁矿形式时代相近。

(2) 红格矿床的岩矿石，从北往南，铂族元素含量逐渐降低并差异显著的特点，暗示是不同岩浆房岩浆活动的产物。矿石中 Co 的含量也与岩浆的分异演化或含矿流体的注入有关，寻找岩浆通道和多级岩浆房是进一步找矿预测的关键因素。

(3) 红格矿床的 PGE 元素已发生明显的分异现象，在铁矿和块状硫化物中富集，玄武岩和辉石橄榄岩中亏损，暗示硫化物与铁可以在透岩浆流体中有共同富集。由北往南，从马鞍山矿段，红格矿床北矿段，红格矿床南矿段，其钒钛磁铁矿矿石的 PGE 含量逐渐降低。ZK2908 钻孔中玄武岩 PGE 含量表明，由上往下，其 PGE 含量逐渐降低。

(4) 根据红格地区 Pd/Ir 的比值与原始地幔明显偏离，说明地区母岩浆是幔源岩浆经过分异演化而成，暗示红格岩体属于与玄武岩质岩浆有关的矿床类型；红格矿床岩、矿石中的 Cu/Pd 值均大于原

使地幔岩浆的 Cu/Pd 值(6300),暗示有少量硫化物在岩浆源区的残留。同时,在铁矿形成之前已经发生过硫化物的熔离。

(5)红格矿床的 PGE 元素已发生明显的分异现象(在铁矿和块状硫化物中富集,玄武岩和辉石橄榄岩中亏损)。表明硫化物与铁可能在早期流体中有共同富集的情况。

(6)红格矿床不同矿段的钒钛磁铁矿矿体可能是多级岩浆房岩浆演化的产物。暗示深部还有岩浆房,在地下深处,可能还存在 Ni—Cu—PGE 和 Fe—Ti—V 矿床。

谢语:感谢中国科学院贵阳地球化学研究所和中国地质科学院矿产综合利用研究所提供的实验仪器,感谢四川 106 地质队提供的宝贵文献资料,感谢章雨旭研究员和审稿专家提出的宝贵意见和建议。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

柏中杰,钟宏,朱维光,徐桂文. 2009. 红格层状岩体岩浆混合与结晶分异对钒钛磁铁矿成矿的指示意义. 矿物学报, (s1):43.

董书云,张招崇. 2009. 钇(Y)在铁钛氧化物中的地球化学行为——以峨眉山大火成岩省为例. 地质论评, 55(3):355~360.

李德东,王玉往,龙灵利,王京彬,王莉娟,邹滔. 2012. 东天山过渡型矿化镁铁—超镁铁岩年代学和地球化学特征. 地质论评, 58(6):1145~1160.

李德东,王玉往,王京彬,龙灵利,解洪晶,赵路通,石煜. 2014. 小岩体型铜镍硫化物(铂族)矿床成矿地质体研究进展. 地球科学与环境学报, 36(1):32~47.

李宏博,张招崇,李永生. 2015. 云南富民晚二叠世中——基性岩年代学、地球化学特征:对峨眉山大火成岩省岩浆作用过程的指示意义. 地质学报,89(1):18~36.

李佑国,许家斌,张月姣,王雪. 2013. 红格矿床地质地球化学特征与岩浆演化. 矿物学报, (S2):107~108.

李佑国,张成江,杨武年. 2009. 铂族元素钌(Ru)异常及其地质意义探讨. 矿物学报, (S1):61~62.

罗照华,周久龙,黑慧欣,刘翠,苏尚国. 2014. 超级喷发(超级侵入)后成矿作用. 岩石学报,11:3131~3154.

钱壮志,孙涛,汤中立,姜常义,何克,夏明哲,王建中. 2009. 东天山黄山东铜镍矿床铂族元素地球化学特征及其意义. 地质论评, 55(6):873~884.

宋谢炎,胡瑞忠,陈列猛. 2009. 铜、镍、铂族元素地球化学性质及其在幔源岩浆起源、演化和岩浆硫化物矿床研究中的意义. 地学前缘,16(4):287~305.

陶琰,胡瑞忠,屈文俊,杜安道. 2008. 力马河镍矿 Re-Os 同位素研究. 地质学报, 82(9):1292~1304.

王敏芳,夏庆霖,肖凡,汪新庆,杨武胜,姜楚灵. 2012. 新疆东天山土墩铜镍硫化物矿床岩石地球化学和铂族元素特征及其对成矿的指示意义. 矿床地质,31(6):1195~1210.

王玉往,王京彬,王莉娟,彭晓明,惠卫东,秦全新. 2006. 岩浆铜镍矿与钒钛磁铁矿的过渡类型——新疆哈密香山西矿床. 地质学报,

80(1):61~73.

武斌,曹俊兴,唐玉强,邹俊,余舟. 2012. 红格地区钒钛磁铁矿地质特征及地球物理找矿的探讨. 地质与勘探,48(1):140~147.

夏林圻,徐学义,李向民,夏祖春,马中平. 2012. 亚洲 3 个大火成岩省(峨眉山、西伯利亚、德干)对比研究. 西北地质,45(2):1~26.

肖龙,徐义刚,何斌. 2003. 峨眉地幔柱——岩石圈的相互作用:来自低钛和高钛玄武岩的 Sr—Nd 和 O 同位素证据. 高校地质学报,9(2):207~217.

肖龙, Pirajno F, 何琦. 2007. 试论大火成岩省与成矿作用. 高校地质学报,13(2):148~160.

徐义刚,梅厚钧,许继峰,黄小龙,王岳军,钟孙霖. 2003. 峨眉山大火成岩省中两类岩浆分异趋势及其成因. 科学通报,48(4):383~387.

张建廷,陈碧. 2008. 攀西钒钛磁铁矿主要元素赋存状态及回收利用. 矿产保护与利用,5:38~41.

张招崇. 2009. 关于峨眉山大火成岩省一些重要问题的讨论. 中国地质,36(3):634~646.

钟宏,朱维光,漆亮,周美夫,宋谢炎,张贻. 2006. 攀西地区峨眉山玄武岩的铂族元素地球化学特征. 科学通报,51(1):1297~1304.

钟宏,朱维光,宋谢炎,姚永, Prevec A, Wilson A H. 2005. 攀西地区新街层状岩体的 Sr—Nd 同位素、铂族元素及微量元素地球化学特征. 中国矿物岩石地球化学学会第十届学术年会论文集:2.

Bai Zhongjie, Zhong hong, Zhu Weiguang, Xu Guiwen. 2009 #. Indication of magmatic mixing and crystallization of Hongge layered rock mass in V—Ti magnetite mineralization. Acta Mineralogica Sinica, (s1):43

Barnes S, Pichard C. 1993. The behavior of platinum-group elements during partial melting, crystal fractionation, and sulphide segregation: an example from the Cape Smith Fold Belt, northern Quebec. Geochim. Cosmochim. Acta, 57(1):79~87.

Dong Shuyun, Zhang Zhaochong. 2009&. Geochemical Behavior of Yttrium (Y) in Fe—Ti Oxide——Emeishan Large Igneous Province as an example. Geological Review, 55(3):355~360.

Howarth G, Prevec A, Zhou Meifu. 2013. Timing of Ti-magnetite crystallisation and silicate disequilibrium in the Panzhihua mafic layered intrusion: Implications for ore forming processes. Lithos, 170~171:73~89.

Howarth G, Prevec A. 2013. Trace element, PGE, and Sr Nd isotope geochemistry of the Panzhihua mafic layered intrusion, SW China: Constraints on ore-forming processes and evolution of parent magma at depth in a plumbing-system. Geochimica et Cosmochimica Acta, 120:459~478.

Keays R R. 1995. The role of komatiitic and picritic magmatism and S-saturation in the formation of ore deposits. Lithosphere,34(1):1~18.

Li Dedong, Wang Yuwang, Long Lingli, Wang Jingbin, Wang Lijuan, Zou Tao. 2012&. Chronology and Geochemistry of the Transitional Mineralized Mafic—Ultramafic Rock Bodies in the Eastern Tianshan Mountains. Geological Review, 58(06):1145~1160.

Li Dedong, Wang Yuwang, Long Lingli, Xie Hongjing, Zhao Lutong, Shi Yi. 2014&. Review on Metallogenic Geological Bodies of the Small-intrusion-hosted Ni—Cu (—PGE) Sulfide Deposits. Journal of Earth Sciences and Environment, 36(1):32~47.

Li Hongbo, Zhang Zhaochong, Li Yongsheng. 2015&. Geochronology and Geochemistry of the Late Permian Intermediary—Mafic Intrusions in Fumin, Yunnan Province: Implications for the

- Magmatism of Emeishan Large Igneous Province. *Acta Geologica Sinica*, 89(1):18~36.
- Li Youguo, Xu Jiabin, Zhang Yuejiao, Wang Xue. 2013#. Geological and Geochemical Characteristics and Magmatic Evolution of Hongge Deposit. *Acta Mineralogica Sinica*, (S2):107~108.
- Li Youguo, Zhang Chengjiang, Yang Wunian. 2009#. Anomaly of PGE (Ru) and its geological significance. *Acta Mineralogica Sinica*, (S1):61~62.
- Luo Zhaohua, Zhou Jiulong, Hei Huixin, Liu Cui, Su Shangguo. 2014#. Post-supereruption (—superintrusion) metallogenesis. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11):3131~3154.
- Qi Liang, Wang Yan(Christina), Zhou Meifu. 2008. Controls on the PGE distribution of Permian Emeishan alkaline and peralkaline volcanic rocks in Longzhoushan, Sichuan Province, SW China. *Lithos*, 106:222~236.
- Qian Zhuangzhi, Sun Tao, Tang Zhongli, Jiang Changyi, He Ke, Xia Mingzhe, Wang Jianzhong. 2009#. Platinum-group Elements Geochemistry and Its Significances of the Huangshandong Ni—Cu Sulfide Deposit, East Tianshan, China. *Geological Review*, 55(06):873~884.
- Song Xieyan, Hu Ruizhong, Chen Liemeng. 2009#. Geochemical natures of copper, nickel and PGE and their significance for the study of origin and evolution of mantle-derived magmas and magmatic sulfide deposits. *Earth Science Frontiers*, 16(4):287~305.
- Song Xieyan, Zhou Meifu. 2004. Genetic relationships between base metal sulfides and platinum-group minerals in the Yangliuping Ni—Cu—(PGE) sulfide deposit, SW China, *The Canadian Mineralogist*, 42:469~483.
- Tao Yan, Hu Ruizhong, Qu Wenjun, Du Andao. 2008#. Re-Os Isotope Study of Sulfide and Olivine Pyroxenite in the Limahe Nickel Deposit, Sichuan Province. *Acta Geologica Sinica*, 82(09):1292~1304.
- Wang Minfang, Xia Qinglin, Xiaofan, Wang Xinqing, Yang Wusheng, Jiang Chuling. 2012#. Rock geochemistry and platinum group elements characteristics of Tudun Cu—Ni sulfide deposit in East Tianshan Mountains of Xinjiang and their metallogenic implications. *Mineral Deposits*, 31(6):1195~1210.
- Wang Yuwang, Wang Jingbin, Wang Lijuan, Peng Xiaoming, Hui Weidong, Qin Quanxin. 2006#. A Intermediate Type of Cu—Ni Sulfide and V—Ti Magnetite Deposit: Xiangshanxi Deposit, Hami, Xinjiang, China. *Acta Geologica Sinica*, 80(1):61~73.
- Wu Bin, Cao Junxing, Tang Yuqiang, Zou Jun, Yu Zhou. 2012#. Geological features of the vanadium—titanium magnetite deposit in the Hongge area and its geophysical prospecting. *Geology and Exploration*, 48(1):140~147.
- Xia Linqi, Xu Xueyi, Li Xiangmin, Xia Zuchun, Ma Zhongping. 2012#. Comparison of Three Large Igneous Provinces (Emeishan, Siberia, Decan) in Asia. *Northwestern Geology*, 45(2):1~26.
- Xiao Long, F Pirajno, He Qi. 2007#. A Prdinary Discussion on Large Igneous Provinces and Associated Ore Deposits. *Geological Journal of China Universities*, 13(2):148~160.
- Xiao Long, Xu Yigang, He Bin. 2003#. Emei Mantle Plume—Subcontinental Lithosphere Interaction: Sr—Nd and O Isotopic Evidences from Low-Ti and High-Ti Basalts. *Geological Journal of China Universities*, 9(2):207~217.
- Zhang Jianting, Chen Bi. 2008#. Occurrence and Recycling of Main Elements in Panxi Vanadium—titanium Magnetite. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 5:38~41.
- Zhang Zhaochong, Zhi Xiachen, Chen Lei, Saunders Andrew D, Reichow Marc K. 2013. Re-Os isotopic compositions of picrites from the Emeishan flood basalt province, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 276(1~2):30~39.
- Zhang Zhaochong, Mao Jingwen, Saunder A D, Yu Ai, Li Ying, Zhao Li. 2009. Petrogenetic modeling of three mafic—ultramafic layered intrusions in the Emeishan large igneous province, SW China, based on isotopic and bulk chemical constraints. *Lithos*, 113:369~392.
- Zhang Zhaochong. 2009#. Discussion on some important issues in Emeishan large igneous province. *Geology in China*, 36(3):634~646.
- Zhong Hong, Qi Liang, Hu Ruizhong, Zhou Meifu, Gou Tizhong, Zhu Weiguang, Liu Bingguang, Chu Zhuyin. 2011. Rhenium-osmium isotope and platinum-group elements in the Xinjie layered intrusion, SW China: Implications for source mantle composition, mantle evolution, PGE fractionation and mineralization. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75:1621~1641.
- Zhong Hong, Zhu Guangwei, Qi Liang, Zhou Meifu, Song Xieyan, Zhang Yi. 2006#. Platinum Group element Geochemical Characteristics of Emeishan Basalts in Panxi Region. *Chinese Science Bulletin*, 51(1):1297~1304.
- Zhong Hong, Zhu Weiguang, Song Xieyan, Yao Yong, Prevec A, Wilson A H. 2005#. Sr—Nd Isotopes, Platinum Group Elements and Trace Element Geochemical Characteristics of Layers in Xinjie Area, Panxi Area. *The Proceedings of the 10th Annual Conference of Mineral Rock Geochemistry of China*, 2005:2.
- Zhou Meifu, Arndt N T, Malpas J, Wang Yan(Christina), Kennedy A K. 2008. Two magma series and associated ore deposit types in the Permian Emeishan large igneous province, SW China. *Lithos*, 103:352~368.
- Zhou Meifu, Wei Chen(Terry), Wang Yan(Christina), Prevec S A, Liu Pingping(Patricia), Howarth G H. 2013. Two stages of immiscible liquid separation in the formation of Panzhihua-type Fe—Ti—V oxide deposits, SW China. *Geoscience Frontiers*, 4:481~502.

PGE Geochemical Characteristics of Massive Sulfide in V—Ti Magnetite at Hongge Area, Yanbian County, Western Sichuan

ZHANG Tengjiao¹⁾, LI Youguo¹⁾, ZHANG Yuejiao²⁾, ZHAO Wei³⁾

1) Chengdu University of technology, Chengdu, 610059, China;

2) Australian National University, Canberra, 2601, Australia;

3) Geological Science and Technology Information of Hunan Province, Changsha, 410116, China

Abstract: The paragenesis phenomenon between V—Ti magnetite deposits and sulfide deposits has not yet been found all over the world. Although it was deemed a PGE—Cr enriched layer in the bottom of the ore body at Hongge deposit, the consequence by analyzing lots of drilling samples is not really as the prior viewpoint in Hongge mining area which is in the west of Sichuan province.

However, we find the existence of a large amount of massive sulfide deposits ore which can form Fe—Co—Ni paragenetic orebody after piercing into iron orebody in Baicao mining area in at Hongge deposits.

The major composition ingredients of massive sulfide ores are pyrrhotite (94%), pentlandite and chalcopyrite, and a few ingredients of augite, sahlite, bronzite, hornblende, phlogopite, magnetite, ilmenite, and andesine, etc. The tenor amount of Ni is 0.72% ~ 0.90%, while the tenor amount of Co is about 0.10%. These two elements mainly exist in the pyrrhotite.

The experimental analysis of Platinum Group Elements indicates that the Cu/Pd ratio is between 12908 and 15109 in massive sulfides, while it is about 24520 in iron ore with 3% penetrated sulfide. These Cu/Pd ratios are much higher than primitive mantle source value which implies the tiny amounts of sulfide residue in magmatic source. Meanwhile, sulfide phase separations have of the sulfide occurred before the iron ore form.

In Hongge area, Pd/Ir ratios of samples ranging from 2.8 to 30, mainly concentrated between 8 and 14, suggest show it might experience a strong magmatic crystallization. An obvious fractionation phenomenon of Platinum Group Elements in Hongge deposit suggests that sulfide deposit and iron may accumulate simultaneously in fluid.

It is difficult to explain the obvious differences of PGE contents by the same magma chamber among different mining areas which can be the product of magmatic evolutions in multi-stage magma chambers. It may imply that there is will be a subsurface magma chamber where exists Ni—Cu—PGE deposits and Fe—Ti—V deposits in depth.

Methods: Firstly, take 5 to 6 grams of rock powder samples and incorporate a few mixed diluent of platinum, palladium, iridium, ruthenium. Secondly, digest the mixture at high temperatures and pressures with hydrofluoric acid and nitric acid and dissolve it with 6 mol per litre muriatic acid. Then, add in tellurium solution and stannous chloride solution coprecipitation, and the precipitation, after aqua regia dissolving, go through P-507 mixed resin and get rid of the interference elements under acidic medium. Lastly, dry the mixed solution and instill 3 milliliter distilled water and test the compound by Perkin Elmer Elan 9000 ICP-MS machine.

Results and Conclusions:

- (1) Co—Ni Sulfide deposits are initially discovered in Hongge—Baicao dinnings.
- (2) The content of PGE in Rocks and minerals reduces gradually from north to south which implies that they formed in different periods of magma chamber magmatism.
- (3) The ratio of Pd/Ir is much lower than the primitive mantle value in Hongge area which indicates that parent magma came from the magma crystallization differentiation. Meanwhile, the sulfide has undergone liquation before the iron ore formed.
- (4) The obvious fractionation phenomenon of PGE in Hongge deposits explains that the sulfide and iron might

accumulate collectively in the early fluid.

(5) The vanadium—titanium magnetite in different mining areas in Hongge deposits may formed by multistage magmatic evolution in magma chamber which suggests that deeper magma chamber must exist and deep underground may still have Ni—Cu—PGE deposits and Fe—Ti—V deposits.

Keywords: Hongge—Baicao deposit ; Ni—Co massive sulfide ; Globular sulfide ; V—Ti magnetite platinum family element

Acknowledgements: This study was financially supported by the Natural Science Foundation of China (No. 41073022). We would like to express our thanks to Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources , CAGS and Guiyang Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences to provide the test instrument.

First author: ZHANG Tengjiao male, born in 1988, a Ph. D candidate in Chengdu University of Technology, mainly engaged in the study of oxide ore deposits. Email: mackouowen@me.com

Corresponding author: LI Youguo, male, born in 1963, professor, doctoral supervisor. Email: lyguo@cdu.edu.cn

Manuscript received on: 2016-05-19; Accepted on: 2017-05-14; Edited by: ZHANG Yuxu.

Doi: 10.16509/j.georeview.2017.04.016

丁文江诞辰 130 周年纪念大会暨学术思想研讨会在江苏泰兴召开

关键词: 丁文江; 江苏泰兴

为纪念我国著名地质学家、社会活动家、中国地质事业奠基人丁文江先生诞辰 130 周年, 4 月 13 日, 丁文江先生诞辰 130 周年纪念大会暨学术思想研讨会在丁文江故乡泰兴举行。

上午, 中国地质调查局地学文献中心(中国地质图书馆)、中国地质博物馆、江苏省泰兴市人民政府联合举办丁文江先生诞辰 130 周年纪念大会。国土资源部前副部长、中国观赏石协会会长寿嘉华, 中国地质调查局党组副书记、副局长王研, 中国工程院院士、中国地质科学院研究员裴荣富, 中国科学院院士、中国科学院古脊椎动物与古人类研究所所长周忠和, 北京大学前副校长、首都师范大学前党委书记、中国地质学史专业委员会副主任于浣, 中国地质博物馆馆长贾跃明, 中国地质调查局地学文献中心主任、中国地质图书馆馆长刘延明, 丁文江先生亲属, 泰兴市领导以及来自科学界、地质界近 300 名专家、代表共同缅怀丁文江先生。泰兴市人民政府副市长邵骅主持纪念大会。泰兴市委副书记、市长刘志明致辞, 丁文江先生的侄女张筱玮, 中国地质博物馆馆长贾跃明, 中国地质调查局党组副书记、副局长王研先后发言, 回顾了丁文江平凡而又伟大的一生。

王研副局长表示, 缅怀丁文江先生为社会发展、民族进步所付出的不懈努力, 所体现的奋斗精神和爱国情

操, 对激励后辈传承和弘扬科学精神, 推动地质科技创新, 建设美丽中国, 具有十分重要的意义。

他强调, 丁文江先生是中国地质调查事业的创始者和奠基者, 在以丁文江先生等一代代地质先辈的引领下, 中国的地质调查已经走过百年风雨历程。当前, 中国地质调查事业第二个百年篇章已经开启, “向地球深部进军”的历史使命箭在弦上, “三深一土”科技创新蓝图业已铺就, 我们要传承地质先辈的“三光荣”优良传统, 践行“责任、创新、合作、奉献、清廉”的新时期地质工作者核心价值观, 传播科学思想、普及科学知识、倡导科学方法,

(下转第 1101 页)

