

# 中国西部典型铜镍矿床亲铜元素特征对比

王建中<sup>1,2</sup>, 钱壮志<sup>1</sup>, 董富权<sup>1</sup>, 赵玉梅<sup>1</sup>

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国人民武装警察部队 黄金第八支队, 新疆 乌鲁木齐 830057)

**摘要:** 通过对喀拉通克、黄山东、金川和白马寨 4 个铜镍矿床亲铜元素特征进行比较, 结果发现所有矿床具有相似的左倾原始地幔标准化配分模式和铂族元素明显亏损的共同特点; 其亲铜元素质量分数却明显不同, 铂族元素质量分数最高的金川铜镍矿床以 Ni 为主, 喀拉通克矿床则表现为 Cu 占优势; 矿床的初始岩浆为铂族元素不亏损的玄武质岩浆, 应是地幔岩石较高程度部分熔融的产物; 少量硫化物预先熔离是造成中国铜镍矿床成矿母岩浆亏损铂族元素和  $w(\text{Cu})/w(\text{Pd})$  远大于原始地幔 ( $w(\text{Cu})/w(\text{Pd})$ ) 的控制因素; 不同程度(量)的硫化物熔离导致母岩浆中亲铜元素质量分数不同,  $R$  值低不是主要原因; 早期发生硫饱和和可能是铜镍矿床成矿的必要条件, 成矿的关键可能在于新鲜岩浆的不断补给; 少量硫化物预先熔离结合不含矿岩石亏损铂族元素, 暗示这些矿区深部具有找矿潜力。

**关键词:** 亲铜元素; 铂族元素; 硫化物; 预先熔离; 铜镍矿床; 亏损; 中国西部

中图分类号: P618.41 文献标志码: A 文章编号: 1672-6561(2010)02-0137-07

## Comparisons for the Characteristics of Chalcophile Elements of Typical Cu-Ni Sulfide Deposits in Western China

WANG Jian-zhong<sup>1,2</sup>, QIAN Zhuang-zhi<sup>1</sup>, DONG Fu-quan<sup>1</sup>, ZHAO Yu-mei<sup>1</sup>

(1. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. No. 8 Gold Geological Party, Chinese People's Armed Police Force, Urumqi 830057, Xinjiang, China)

**Abstract** Compared of the characteristics of chalcophile elements among Kalatongke, Huangshandong, Jinchuan and Baimazhai Cu-Ni sulfide deposits, the results show that it is similarly left leaning primary mantle normalized plots and notable depletion of platinum group element (PGE) in all deposits; mass fraction of chalcophile elements is significantly different, and it is mainly Ni in Jinchuan Cu-Ni deposit which is highest in mass fraction of PGE and mainly Cu in Kalatongke deposit; their primary magmas derived from the mantle by high degree partial melt maybe fertile in PGE; the initial magma of deposit is no loss basaltic magma of PGE, and is the product of higher partial melting of mantle rocks, a small quantity of sulfide pre-segregation is the control factor for PGE deficit of ore-forming primary magma of Cu-Ni deposits in China and the ratio of mass fraction of Cu and Pd is much larger than that in primitive mantle; the lower  $R$  is not the main reason for the different mass fraction of primary magma chalcophile elements which is resulted from different quantity sulfide segregation; sulfur saturation in the early stage may be necessary for the formation of Ni deposit; the key of formation of Ni deposit may be continuously supplement of fresh melts; the phenomenon that a small quantity of sulfide pre-segregation does not include mineral rock deficit PGE, indicates that the potentiality of exploration in the depth of these deposits is great.

**Key words:** chalcophile element; PGE; sulfide; pre-segregation; Cu-Ni deposit; deficit; Western China

## 0 引言

亲铜元素(Chalcophile Elements)包括 Ni、Cu

和铂族元素(Platinum-group Elements, PGE), 既具有亲铜性质(Copper-loving), 即这些元素与 S、As、Se、Te 等以共价键结合, 进而形成硫化物、砷化

收稿日期: 2009-09-20

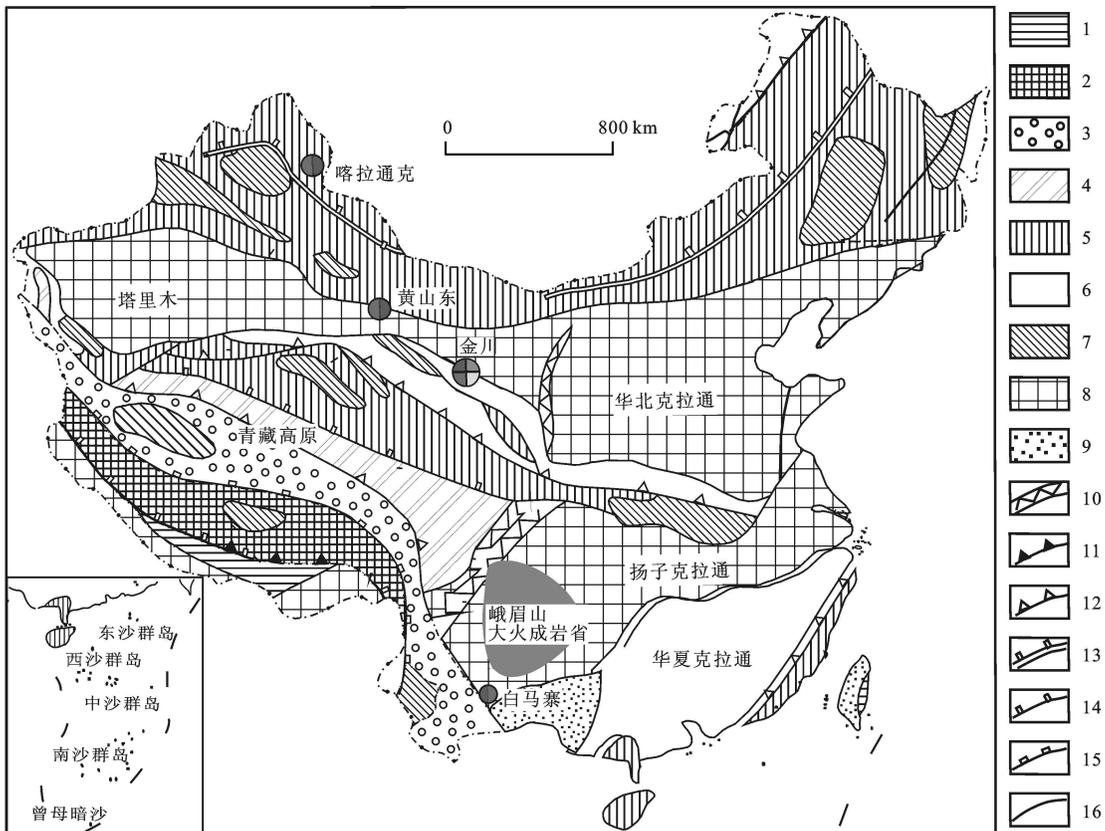
基金项目: 国家自然科学基金项目(40534020); 中国地质调查局项目(1212010630508)

作者简介: 王建中(1978-), 男, 山东单县人, 理学博士研究生, 从事矿床学研究。E-mail: zhong\_jiw2004@yahoo.com.cn

物、硫砷化物和碲化物等化合物; 又具有亲铁性质 (Iron-loving), 即容易与铁或相互之间以金属键结合形成合金。PGE 包括 Os、Ir、Ru、Rh、Pt 和 Pd, 他们在铁金属/硅酸盐熔体相中的分配系数分别高达  $10^7$  (Pd) 和  $10^{12}$  (Pt、Ir) 级<sup>[1-2]</sup>, 所以主要富集在地核, 少量分布于地幔。根据熔点的高低不同, PGE 又可以划分为 IPGE (Os、Ir、Ru) 和 PPGE (Rh、Pt、Pd) 2 个亚族<sup>[3]</sup>。由于它们之间熔点和地球化学性质的差异, 导致在演化过程中产生分异<sup>[4]</sup>。因此, 近 20 年来, PGE 作为一种新的地球化学示踪剂逐渐被人们所认识<sup>[5-8]</sup>, 不仅为核-幔分离<sup>[9]</sup>、“后增薄层”历史和核-幔作用全球规模的分异过程提供关键信息, 而且在示踪超镁铁质和镁铁质岩石演化、地幔源区与成因上(包括部分熔融、熔体渗透、地幔交代、岩浆混合、地壳混染和分离结晶作用)具有不可替代的重要应用价值<sup>[7-8, 10]</sup>。

镁铁质、超镁铁质岩浆岩中的镍、铜、铂族资源在世界上占有重要地位。中国 86% 的镍矿储量、

11.9% 的铜矿储量、95% 的 PGE 储量来自与镁铁质-超镁铁质岩有关的岩浆铜镍矿床<sup>[11]</sup>。中国已发现的铜镍矿床绝大多数分布在华北克拉通、中亚造山带和扬子陆块西部的峨眉山大火成岩省(图 1)。其中西部地区是中国重要的铜镍铂族元素矿产地, 从北向南依次有准噶尔板块北缘的额尔齐斯构造带, 矿床实例为喀拉通克铜镍矿床; 东天山造山带, 典型矿床有黄山东、香山、葫芦和图拉尔根等铜镍矿床; 华北克拉通的西南缘, 典型矿床有金川、冷水箐等铜镍矿床; 峨眉山大火成岩省, 代表性矿床有白马寨、力马河等铜镍矿床。以上 4 个地区分别属于造山带、稳定陆块边缘和大火成岩省 3 种地质构造背景。中国铜镍硫化物矿床以铜镍为主, 伴生的 PGE 则通常作为镍、铜的副产品加以回收利用, 成为利用 PGE 示踪剂研究超镁铁质、镁铁质岩石演化及其与之密切相关的矿床成因的理想对象, 笔者仅选取 4 个典型铜镍矿床(图 1)作为研究对象。已有多位学者分别阐述了喀拉通克<sup>[12-14]</sup>、黄山东<sup>[15]</sup>、



1—喜马拉雅造山带; 2—晚燕山造山带; 3—早燕山造山带; 4—印支造山带; 5—华力西造山带; 6—加里东造山带; 7—微古陆块; 8—前寒武纪地块; 9—叠合盆地; 10—叠加山脉; 11—缝合带; 12—古俯冲带; 13—晚古生代缝合带; 14—中生代缝合带; 15—新生代缝合带; 16—郯庐断裂

图 1 中国西部典型铜镍矿床分布

Fig. 1 Distribution of Typical Ni-Cu Sulfide Deposits in Western China

金川<sup>[16-21]</sup>和白马寨<sup>[22-23]</sup> 4 个铜镍矿床的岩石地球化学特征、岩石成因、矿床亲铜元素特征、矿床成因、成岩成矿时代与构造背景等。焦建刚等<sup>[24]</sup> 以 MAPGIS 为平台开发了矿产空间数据库软件, 借助空间数据库软件对中国镍铜铂族岩浆硫化物矿床进行地质研究, 总结了此类矿床小岩体成矿特征和富集规律, 但对其亲铜元素特征的综合比较不够, 可能影响中国铜镍矿床成矿作用的类比和联系。鉴于此, 笔者试图通过对比其亲铜元素特征, 总结其共同特点和差异性, 通过分析造成其 Ni、Cu、PGE 质量分数差异和 PGE 亏损的原因, 初步

得出几点认识, 为理解矿床成因和进一步指导找矿勘探提供科学依据。

## 1 亲铜元素特征对比

### 1.1 镍、铜元素质量分数变化

表 1 表明, 中国铜镍矿床中的 Ni 和 Cu 质量分数变化较大。喀拉通克矿石  $w(\text{Ni})/w(\text{Cu})$  介于 0.1 和 12 之间, 其中多数小于 1, 说明矿床以 Cu 为主<sup>[12]</sup>。金川和白马寨矿石明显表现出以 Ni 为主的特点<sup>[18, 23]</sup>。黄山东矿石  $w(\text{Ni})/w(\text{Cu})$  均大于 1, 也反映出矿石中 Ni 含量大于 Cu 的总体特征<sup>[15]</sup>。

表 1 中国西部典型铜、镍硫化物矿床铂族元素含量和特征值

Tab. 1 Contents of Chalcophile Element and Eigenvalues of Typical Ni-Cu Sulfide Deposits in Western China

矿床实例	主要岩石	样品类型	样品件数	亲铜元素平均质量分数						特征参数			
				Ni/ %	Cu/ %	铂族元素平均质量分数/ $10^{-9}$			$\Sigma$ PGE/ $10^{-9}$	$w(\text{Ni})/w(\text{Cu})$	$w(\text{Pd})/w(\text{Ir})$	$[w(\text{Cu})/w(\text{Pd})]/10^3$	
						Ir	Pt	Pd					
喀拉通克	苏长岩、淡色辉长岩、闪长岩	矿石	块状	13	3.85	6.55	4.28	145	130.5	304.3	1.82	74.9	165.2
			浸染状	14	3.73	6.62	7.82	466	281.6	822.3	0.89	50.5	30.2
	岩石	17	0.03	0.045	0.15	4.12	4.58	10.05	0.69	38.2	17.7		
黄山东	辉长岩、辉长苏长岩、少量橄榄岩	矿石	块状	2	6.39	1.76	4.99	31.65	34.31	98.72	19.42	10.73	501.9
			浸染状	3	6.22	2.21	11.32	55.98	75.27	243.46	7.74	6.74	466.5
	岩石	4	0.016	0.006	0.06	0.62	0.53	1.89	2.06	9.57	127.5		
金川	橄榄岩	矿石	块状	11	7.70	2.59	22	62	112	275	2.97	5.09	231.3
			浸染状	10	14.78	10.25	165	2324	1104	3984	1.44	6.69	92.8
	岩石	18			1.9	19	10	35		5.26			
白马寨	异剥橄榄岩、橄榄辉石岩	矿石	块状	6	4.01	1.78	2.35	157.0	195.7	371.2	2.52	136.0	147.7
			浸染状	3	0.71	0.40	0.72	13.30	17.11	33.46	2.52	29.4	579.8
	岩石	8	0.05	0.021	0.08	0.81	0.76	1.99	3.29	15.6	398.3		

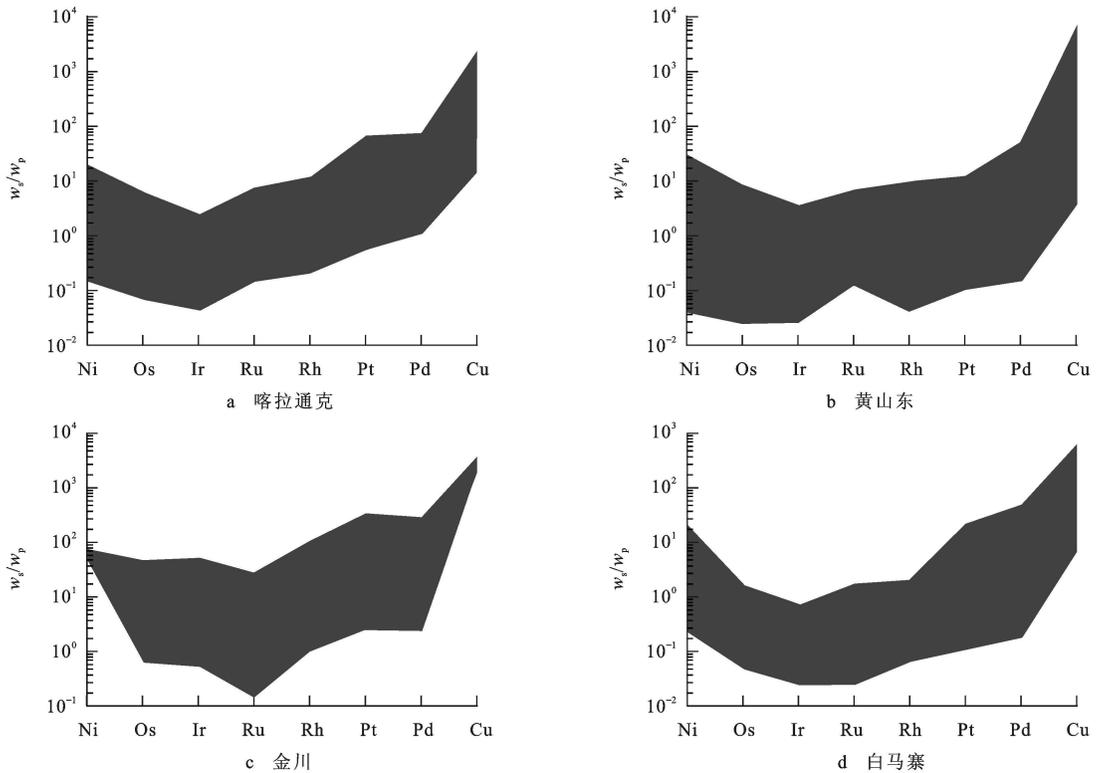
注:  $\Sigma$ PGE 为 6 个铂族元素质量分数总和; 数据来源于文献<sup>[12-15]</sup>

### 1.2 铂族元素质量分数总和差异和亏损

表 1 表明, 4 个矿床的镁铁质-超镁铁质岩石和矿石的 PGE 质量分数总体偏低, 且分布不均匀, 以 Rh、Pt、Pd 为主, Ir、Os、Ru 质量分数较低, 与岩浆铜镍硫化物矿床 PGE 原始地幔标准化配分模式特点相一致。

不同构造环境和相同构造背景下铜镍硫化物矿床的 PGE 质量分数总量存在很大差别(图 2)。所有矿床岩石样品 PGE 质量分数总量为  $(1.99 \sim 35) \times 10^{-9}$ , 平均值为  $12.23 \times 10^{-9}$ , 低于原始地幔 PGE 质量分数总量  $(23.5 \times 10^{-9})$ <sup>[25]</sup>, 说明母岩浆为 PGE 亏损的演化岩浆。例如, 喀拉通克岩石样品 PGE 质量分数总量  $(10.05 \times 10^{-9})$  与大陆拉斑玄武岩相似<sup>[26-27]</sup>。与峨眉山大火成岩省岩石的 PGE

质量分数相当<sup>[13, 28]</sup>, 高于东天山造山带的香山和图拉尔根矿床岩石样品的 PGE 质量分数  $(1 \sim 5) \times 10^{-9}$ <sup>[29]</sup>, 是黄山东岩石样品 PGE 质量分数  $(1.89 \times 10^{-9})$  和白马寨岩石样品 PGE 质量分数  $(1.99 \times 10^{-9})$  的 5 倍; 但低于金川矿床超镁铁质岩石的相应值(PGE 质量分数平均为  $35 \times 10^{-9}$ )<sup>[18]</sup>。基于 100% 硫化物计算, 矿石样品 PGE 质量分数为  $(33.46 \sim 3984) \times 10^{-9}$ , 喀拉通克矿石 PGE 质量分数为  $573 \times 10^{-9}$ , 比金川矿床矿石的 PGE 质量分数平均值  $(3.248 \times 10^{-9})$  低一个数量级, 比俄罗斯 Noril'sk-talnakh 矿床矿石 PGE 质量分数平均值  $(82.209 \times 10^{-9})$  低 2 个数量级<sup>[12]</sup>。除白马寨铜镍矿床外, 块状矿石 PGE 质量分数比浸染状矿石 PGE 质量分数低。例如, 喀拉通克块状矿石 PGE



$w_s$ —样品的质量分数;  $w_p$ —原始地幔的质量分数; 原始地幔数据源自文献[25]

图 2 中国西部典型铜-镍硫化物矿床原始地幔标准化配分模式

Fig. 2 Primitive Mantle normalized Plots of the Typical Cu-Ni Deposits in Western China

质量分数 ( $304 \times 10^{-9}$ ) 比浸染状矿石 ( $823 \times 10^{-9}$ ) 低, 黄山东铜镍矿床和金川铜镍矿床存在同样的现象。总之, 喀拉通克矿床块状矿石 PGE 质量分数与白马寨矿床块状矿石 PGE 质量分数 ( $371 \times 10^{-9}$ ) 接近。

## 2 讨论

中国铜镍矿床母岩浆亲铜元素质量分数变化差异明显。Chai 等<sup>[16]</sup>指出, 硫化物中 Cu、Ni、PGE 的质量分数主要受母岩浆中的质量分数以及硅酸盐岩浆和液态硫化物的质量比 ( $R$  值) 的影响。Song 等<sup>[28]</sup>进一步指出, 影响 Cu-Ni-PGE 岩浆硫化物矿床中成矿元素质量分数的主要因素包括母岩浆中金属元素的丰度、液态硫化物与岩浆反应的量、硫化物熔体的结晶分异作用、金属元素未亏损的新鲜岩浆的加入。

### 2.1 亲铜元素质量分数差异性

研究表明, 当  $R$  值为  $100 \sim 2\,000$  时, Ni、Cu、PGE 等成矿金属中主要为 Ni 富集成矿, PGE 质量分数低。而当  $R$  值为  $10\,000 \sim 100\,000$  时, 硫化物中 Ni、Cu 质量分数与低  $R$  值的岩浆体系中 Ni、Cu

质量分数比较变化不大, 主要是 PGE 质量分数增高很快<sup>[29-30]</sup>。喀拉通克、黄山东和白马寨铜镍矿床的平均  $R$  值分别为  $2\,624$ 、 $324$ 、 $70$ <sup>[12, 15, 22]</sup>, 而金川矿床除块状矿石  $R$  值约  $100$  外, 大多为  $1\,000 \sim 10\,000$ <sup>[17]</sup>。多数矿床的  $R$  值小于  $2\,000$ , 矿床应当主要富集 Ni, 但是, 喀拉通克矿床却表现出 Cu 大于 Ni 的总体特征, 同时, 喀拉通克块状矿石 PGE 质量分数恰恰与  $R$  值很低的白马寨矿床块状矿石 PGE 质量分数相当。因此,  $R$  值低不是亲铜元素质量分数变化和 PGE 低(亏损)的主要原因, 成矿母岩浆中金属元素质量分数的差异可能是矿床元素质量分数变化的控制因素。亲铜元素在硫化物中的质量分数也可能因为与新鲜补给的岩浆发生反应以及硫化物熔体分异而改变, 或者因为后期热液作用而变化<sup>[31-32]</sup>。至于喀拉通克矿床岩石较黄山东、白马寨、金川矿床更富镁铁质而缺失超镁铁质岩, 各矿床矿化均赋存在相对更富镁铁质的岩相中, 矿化程度和金属质量分数随岩性的基性程度增大而升高。Ni 倾向于超镁铁质岩中富集, 与超镁铁质岩相关的煎茶岭矿床  $w(\text{Ni})/w(\text{Cu})$  大于  $10$ <sup>[33]</sup> 和青海德尔尼矿床超镁铁质围岩中 Ni 质量分

数高于矿石 Ni 质量分数<sup>[34]</sup>,均说明 Ni 与超镁铁质岩关系密切。这是偶然还是成矿专属性的反映?如果是后者,笔者认为超镁铁质岩可能比镁铁质岩更具有形成镍矿的潜力,因为 Cu 比 Ni 具有更强的亲硫性,但它的应用需要将来进一步验证。

## 2.2 铂族元素亏损

中国铜镍矿床 PGE 明显亏损,从整体上看,造山带内的铜镍矿床 PGE 质量分数与峨眉山大火成岩省矿床的 PGE 质量分数相当,低于稳定陆块边缘金川矿床的 PGE 质量分数,同时,造山带环境中不同矿床间 PGE 的质量分数又存在差异。就岩石相对矿石而言 PGE 亏损更强烈,除白马寨铜镍矿床外,块状矿石 PGE 质量分数比浸染状矿石 PGE 质量分数低。

导致中国铜镍矿床 PGE 亏损的原因尚无定论,PGE 的系统研究还处于起步阶段,它们在不同构造环境中的分异行为并不十分清楚<sup>[6]</sup>。峨眉山大火成岩省与约 260 Ma 地幔柱活动有关,发育有金宝山、黄狮涝铂矿床和亏损 PGE 的白马寨矿床<sup>[35]</sup>,而处于稳定陆块边缘的金川铜镍矿床也亏损 PGE<sup>[20]</sup>,成矿作用可能与约 825 Ma 地幔柱活动导致罗迪尼亚大陆裂解有关<sup>[21]</sup>,所以金川矿区及其外围应该具有铂族元素成矿的潜力,实际上在该地区至今未发现铂族元素矿床。造山带铜镍矿床(喀拉通克、黄山东)的构造环境则为后碰撞伸展环境,同样具有 PGE 亏损的显著特点。不同构造环境和相似构造背景下的所有矿床均亏损 PGE,因此,构造环境不可能是中国铜镍矿床 PGE 亏损的原因,其对 PGE 质量分数是否具有决定性的作用还需要进一步证实。造成中国铜镍矿床亏损 PGE 的原因可能包含 2 个方面:部分熔融程度低造成初始岩浆中 PGE 质量分数过低,后期硫化物对 PGE 的富集达不到经济品位;PGE 质量分数正常的初始岩浆在大规模的硫化物形成之前,已经发生过硫化物的预先熔离<sup>[29]</sup>。喀拉通克初始岩浆是 MgO 质量分数为 11.55% 的拉斑玄武质岩浆<sup>[14]</sup>,其地幔源区发生大约 14% 的部分熔融;而黄山东含矿岩体的初始岩浆是 MgO 质量分数为 11.70% 的拉斑玄武质岩浆<sup>[15]</sup>。同样,金川铜镍矿床是地幔橄辉岩更高熔融程度(33%)的产物<sup>[19]</sup>,初始岩浆是 MgO 质量分数为 11.50% 的玄武质岩浆<sup>[17]</sup>。以上矿床初始岩浆的 MgO 质量分数已接近苦橄质岩浆(12%)<sup>[36]</sup>,均为高镁玄武质岩浆,推断其地幔源区经历了较高度

度的部分熔融,其初始岩浆中 PGE 不应亏损<sup>[12, 15, 20, 22-23]</sup>,所以,部分熔融程度低不应是中国铜镍矿床 PGE 亏损的原因。

研究表明,国内众多铜镍矿床普遍存在深部少量硫化物预先熔离的现象。例如,喀拉通克矿床在深部岩浆房(Staging Chamber)经历了少量硫化物的预先熔离作用导致成矿母岩浆亏损 PGE<sup>[12-13]</sup>。钱壮志等<sup>[15]</sup>认为,黄山东 PGE 不亏损的初始岩浆,在上升的过程中发生早期硫化物深部熔离,带走了岩浆中大部分的 PGE,其结果造成母岩浆中的 PGE 质量分数亏损,这可能是造成黄山东矿床 PGE 质量分数很低的主要原因。同样的硫化物预先熔离过程也发生在白马寨、力马河和天宇铜镍矿床<sup>[28, 37-38]</sup>,造成母岩浆亏损 PGE。Song 等<sup>[20]</sup>指出,早期少量硫化物的预先熔离是造成金川矿床母岩浆 PGE 亏损的主要因素,并推测 Pechenga 和 Voisey Bay 矿床可能也经历了类似的熔离过程。而孙赫等<sup>[29]</sup>则认为金川铜镍矿床和香山、图拉尔根铜镍矿床母岩浆亏损 PGE 可能是地幔源区低度部分熔融(10%~20%)的结果。 $w(\text{Cu})/w(\text{Pd})$  是单一岩浆流之间演化程度的重要指示,主要在地幔以上的部分适用<sup>[26]</sup>。PGE 在硫化物/硅酸盐熔体中的分配系数为 20 000,远大于 Cu 的分配系数 1 000<sup>[39-40]</sup>,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 更多被带走,而剩余岩浆  $w(\text{Cu})/w(\text{Pd})$  将明显增高,并高于相应的原始地幔比值。从表 1 可以看出,中国 4 个典型铜镍矿床岩石、矿石的  $w(\text{Cu})/w(\text{Pd})$  均远大于原始地幔的  $w(\text{Cu})/w(\text{Pd})(7.69 \times 10^3)^{[23]}$ ,表明其初始岩浆在早期演化过程中曾发生过深部硫化物熔离作用。图拉尔根铜镍矿床岩石  $w(\text{Cu})/w(\text{Pd})$  接近 10 000<sup>[29]</sup>,说明图拉尔根铜镍矿床也经历了深部硫化物熔离过程,与东天山诸多铜镍矿床的侵位母岩浆为含硫化物的“晶粥”相一致<sup>[41]</sup>。从表 2 可知,金川和喀拉通克铜镍矿床初始岩浆中亲铜元素均不亏损,喀拉通克矿床 PGE 质量分数较金川矿床的 PGE 质量分数高。由于 Ni、Cu 在硫化物/硅酸盐熔体中的分配系数远小于 PGE 的分配系数(20 000)<sup>[39-40]</sup>,喀拉通克矿床早期预先熔离的硫化物的质量分数(0.018%)是金川矿床硫化物熔离质量分数(0.008%)的 2 倍,促使喀拉通克矿床母岩浆中 PGE 质量分数比金川矿床母岩浆中 PGE 质量分数更亏损,而 Cu(Ni)亏损不明显或基本上不亏损。

表 2 金川与喀拉通克铜镍矿床初始岩浆及母岩浆亲铜元素质量分数对比

Tab. 2 Comparisons for the Compositions of Chalcophile Element Between Jinchuan and Kalatongke Ni-Cu Sulfide Deposits

亲铜元素	喀拉通克		金川	
	初始岩浆 洋岛玄武岩	母岩浆 0.018%硫化物 熔离后	初始岩浆 Mokulaevsky Basalts	母岩浆 0.008%硫化物 熔离后
Pt	13.500	0.370	6.300	0.570
Pd	6.000	0.16	6.200	0.250
Ir	0.180	0.005	0.100	0.009
Ni			300.000	290.000
Cu	142.000	119.000		

注: 数据源自文献 [3, 20]; Pt, Pd, Ir 质量分数/ $10^{-9}$ ; Ni, Cu 质量分数/ $10^{-6}$

综上所述, 少量硫化物预先熔离导致矿床母岩浆 PGE 质量分数低 (PGE 亏损) 和  $w(\text{Cu})/w(\text{Pd})$  远大于原始地幔的  $w(\text{Cu})/w(\text{Pd})$ , 由于熔离的硫化物的量不同, 进而造成各铜镍矿床成矿母岩浆中亲铜元素质量分数存在差异。由于金属元素未亏损的新鲜岩浆不断补给, 造成硫化物同更多的岩浆达到平衡, 促使硫化物从岩浆中萃取更多的亲铜元素, 进而使 PGE 质量分数升高, 这也可能是金川矿床 PGE 质量分数最高的又一重要因素, 但不排除硫化物熔体结晶分异作用的影响。所以, 早期发生硫饱和可能是国内众多铜镍矿床成矿的必要条件<sup>[20]</sup>, 金属元素未亏损的新鲜岩浆加入引起岩浆多阶段 (多次) 硫饱和从而发生硫化物熔离可能是成矿的关键<sup>[42]</sup>, 少量硫化物熔离结合不含矿岩石强烈亏损 PGE, 意味着这些铜镍矿床深部具有进一步找矿的潜力。

### 3 结语

(1) 对比结果显示, 4 个铜镍矿床中亲铜元素的质量分数明显不同; 铂族元素特征十分相似, 所有矿床具有 Pt-Pd 型原始地幔标准化配分模式; 同时, 尤为显著的共同点是铂族元素质量分数明显偏低, 其中造山带背景下的铜镍矿床 PGE 质量分数最为亏损, 岩石相对矿石而言 PGE 亏损更为强烈。

(2) 推断矿床的初始岩浆为 PGE 不亏损的高镁玄武质岩浆, 少量硫化物预先熔离是导致母岩浆 PGE 质量分数低 (亏损 PGE) 和  $w(\text{Cu})/w(\text{Pd})$  远大于原始地幔  $w(\text{Cu})/w(\text{Pd})$  的根本因素; 不同程度 (量) 的硫化物熔离造成各矿床成矿母岩浆中亲

铜元素质量分数存在差异, 而  $R$  值低不是 Ni、Cu、PGE 质量分数变化的主要原因, 但不排除硫化物熔体结晶分异作用的影响。

(3) 早期发生硫饱和可能是国内众多铜镍矿床成矿的必要条件, 意味着这些矿床深部具有进一步找矿的潜力; 成矿的关键在于新鲜岩浆 (未亏损金属元素) 的加入引起岩浆多阶段 (多次) 硫饱和和熔离。

(4) 超镁铁质岩可能较镁铁质岩更具有形成镍矿的潜力, 仍需要进一步研究。

成文中得到了汤中立院士的指导; 野外工作得到了喀拉通克铜镍矿党新生、王勇、王彬等和新疆地矿局第四地质大队周刚、杨文平、何永胜等以及长安大学田战武、潘振兴、孙涛等研究生的大力帮助, 在此一并致谢。

### 参考文献:

- [1] Borisov A, Palme H, Spettel B. Solubility of Palladium in Silicate Melts; Implications for Core Formation in the Earth [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(2): 705-716.
- [2] Borisov A, Palme H. The Solubility of Iridium in Silicate Melts: New Data from Experiments with Ir<sub>10</sub>Pt<sub>90</sub> Alloy [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(3): 481-485.
- [3] Walter M J. One Step to Earth [J]. *Nature*, 1997, 387: 453.
- [4] Ganugi G, Gorgoni C, Sighinolfi G P. Sulfide Mineralogy and Chalcophile and Siderophile Element Abundances in the Ivrea-Verbania Mantle Peridotites (Western Italian Alps) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1984, 70(1): 69-87.
- [5] 储雪蕾, 孙敏, 周美夫. 化学地球动力学中的铂族元素地球化学 [J]. *岩石学报*, 2001, 17(1): 112-122.
- [6] 许成, 黄智龙, 刘丛强, 等. 铂族元素地球化学研究评述 [J]. *地学前缘*, 2003, 10(4): 520-528.
- [7] Reisberg L, Alard O, Lorand J P, et al. Highly Siderophile Element Behavior in High Temperature Processes [J]. *Chemical Geology*, 2004, 208(1/4): 1-4.
- [8] Luguat A, Pearson D G, Selby D, et al. Highly Siderophile Element Geochemistry [J]. *Chemical Geology*, 2008, 248(3/4): 115-118.
- [9] Li J, Agee C B. Geochemistry of Mantle-core Differentiation at High Pressure [J]. *Nature*, 1996, 381: 686-689.
- [10] Garuti G, Fershtater G, Bea F, et al. Platinum-group Elements as Petrological Indicators in Mafic-ultramafic Complexes of the Central and Southern Urals; Preliminary Results [J]. *Tectonophysics*, 1997, 276(1/4): 181-194.
- [11] 汤中立, 钱壮志, 姜常义, 等. 中国镍铜铂岩浆硫化物矿床与成矿预测 [M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- [12] 钱壮志, 王建中, 姜常义, 等. 喀拉通克铜镍矿床铂族元素地球化学特征及其成矿作用意义 [J]. *岩石学报*, 2009, 25(4):

- 832-844.
- [13] Song X Y, Li X R. Geochemistry of the Kalatongke Ni-Cu (PGE) Sulfide Deposit, NW China: Implications for the Formation of Magmatic Sulfide Mineralization in a Post-collisional Environment [J]. *Mineralium Deposita*, 2009, 44(3): 303-327.
- [14] 姜常义, 夏明哲, 钱壮志, 等. 新疆喀拉通克镁铁质岩体群的岩石成因研究 [J]. *岩石学报*, 2009, 25(4): 749-764.
- [15] 钱壮志, 孙涛, 汤中立, 等. 东天山黄山东铜镍矿床铂族元素地球化学特征及其意义 [J]. *地质论评*, 2009, 55(6): 873-884.
- [16] Chai G, Naldrett A J. Characteristics of Ni-Cu-PGE Mineralization and Genesis of the Jinchuan Deposit, Northwest China [J]. *Economic Geology*, 1992, 87(6): 1475-1495.
- [17] Chai G, Naldrett A J. The Jinchuan Ultramafic Intrusion: Cumulate of a High-Mg Basaltic Magma [J]. *Journal of Petrology*, 1992, 33(2): 277-303.
- [18] 汤中立, 李文渊. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比 [M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [19] 杨合群, 汤中立, 苏犁, 等. 金川硫化铜镍矿床成矿岩浆性质和源区特征讨论 [J]. *甘肃地质学报*, 1997, 6(1): 44-52.
- [20] Song X Y, Keays R R, Zhou M F, et al. Siderophile and Chalcophile Elemental Constraints on the Origin of the Jinchuan Ni-Cu-(PGE) Sulfide Deposit, NW China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(2): 404-424.
- [21] Li X H, Su L, Chung S L, et al. Formation of the Jinchuan Ultramafic Intrusion and the World's Third Largest Ni-Cu Sulfide Deposit: Associated with the ~825 Ma South China Mantle Plume? [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2005, 6: 1-16.
- [22] Wang C Y, Zhou M F. Genesis of the Permian Baimazhai Magmatic Ni-Cu-(PGE) Sulfide Deposit, Yunnan, SW China [J]. *Mineralium Deposita*, 2006, 41(8): 771-783.
- [23] 王生伟, 孙晓明, 石贵勇, 等. 云南白马寨铜镍硫化物矿床铂族元素地球化学及其对矿床成因的制约 [J]. *地质学报*, 2006, 80(9): 1474-1486.
- [24] 焦建刚, 汤中立, 钱壮志, 等. 中国镍铜铂族岩浆矿床矿产地空间数据库建设及其开发应用 [J]. *地球科学与环境学报*, 2007, 29(1): 22-25.
- [25] McDonough W F, Sun S S. The Composition of the Earth [J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3/4): 223-253.
- [26] Brüggemann G E, Naldrett A J, Asif M, et al. Siderophile and Chalcophile Metals as Tracers of the Evolution of the Siberian Trap in the Noril'sk Region, Russia [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57(9): 2001-2018.
- [27] Fryer B J, Greenough J D. Evidence for Mantle Heterogeneity from Platinum-group-element Abundances in Indian Ocean Basalts [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1992, 29(11): 2329-2340.
- [28] Song X Y, Zhou M F, Tao Y, et al. Controls on the Metal Compositions of Magmatic Sulfide Deposits in the Emishan Large Igneous Province, SW China [J]. *Chemical Geology*, 2008, 253(1/2): 38-49.
- [29] 孙赫, 秦克章, 李金祥, 等. 地幔部分熔融程度对东天山镁铁质-超镁铁质岩铂族元素矿化的约束——以图拉尔根和香山铜镍矿为例 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(5): 1079-1086.
- [30] Naldrett A J. *Magmatic Sulfide Deposit: Geology, Geochemistry and Exploration* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2004.
- [31] Ebel D S, Naldrett A J. Fractional Crystallization of Sulfide Ore Liquids at High Temperature [J]. *Economic Geology*, 1996, 91(3): 607-621.
- [32] Barnes S J, Makovicky E, Makovicky M, et al. Partition Coefficients for Ni, Cu, Pd, Pt, Rh and Ir Between Monosulfide Solid Solution and Sulfide Liquid and the Formation of Compositionally Zoned Ni-Cu Sulfide Bodies by Fractional Crystallization of Sulfide Liquid [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1997, 34(4): 366-374.
- [33] 王瑞廷, 毛景文, 任小华, 等. 煎茶岭硫化镍矿床矿石组分特征及其赋存状态 [J]. *地球科学与环境学报*, 2005, 27(1): 34-38.
- [34] 焦建刚, 黄喜峰, 袁海潮, 等. 青海德尔尼铜(钴)矿床研究新进展 [J]. *地球科学与环境学报*, 2009, 31(1): 42-47.
- [35] Zhou M F, Yang Z X, Song X Y, et al. Magmatic Ni-Cu-(PGE) Sulfide Deposits in China [C] // Cabri L J. *The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum Group Elements*. Berlin: Springer-Verlag, 2002: 619-636.
- [36] Bas M J. IUGS Reclassification of the High-Mg and Picroitic Volcanic Rocks [J]. *Journal of Petrology*, 2000, 41(10): 1467-1470.
- [37] 陶琰, 胡瑞忠, 漆亮, 等. 四川力马河镁铁-超镁铁质岩体的地球化学特征及成岩成矿分析 [J]. *岩石学报*, 2007, 23(11): 2785-2800.
- [38] 唐冬梅, 秦克章, 孙赫, 等. 东疆天宇岩浆 Cu-Ni 矿床的铂族元素地球化学特征及其对岩浆演化、硫化物熔离的指示 [J]. *地质学报*, 2009, 83(5): 680-697.
- [39] Francis R D. Sulfide Globules in Mid-ocean Ridge Basalts (MORB) and the Effect of Oxygen Abundance in Fe-S-O Liquids on the Ability of Those Liquids to Partition Metals from MORB and Komatiite Magmas [J]. *Chemical Geology*, 1990, 85(3/4): 199-213.
- [40] Fleet M E, Crocket J H, Stone W E. Partitioning of Platinum-group Elements (Os, Ir, Ru, Pt, Pd) and Gold Between Sulfide Liquid and Basalt Melt [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(13): 2397-2412.
- [41] Qin K Z, Sun H, San J Z, et al. Tectonic Setting, Geological Features and Evaluation of Ore-bearing Property for Magmatic Cu-Ni Deposits in Eastern Tianshan, NW China [J]. *Northwestern Geology*, 2009, 42(Supp): 95-99.
- [42] Foster J G, Hutchinson D. Melts, Magmas, Metals and Magmatic Sulfides: Source Variability and Multi-stage Sulfide Saturation [J]. *Northwestern Geology*, 2009, 42(Supp): 14.