

文章编号:0258-7106(2005)03-0462-09

煎茶岭与金川硫化镍矿床的铂族元素地球化学特征对比及其意义*

王瑞廷^{1,2}, 毛景文^{1,3}, 任小华², 王民良², 赫英⁴

(1 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 西北有色地质勘查局地质勘查院, 陕西 西安 710054;

3 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 4 西北大学地质系, 陕西 西安 710069)

摘 要 采用 ICP-MS 方法分析了煎茶岭和金川硫化镍矿床岩石、矿石的铂族元素含量, 煎茶岭岩体蛇纹岩的 Cu/Pd 比值低于原生地幔岩浆, 说明岩浆熔离作用较弱, 矿石的 Pd/Ir 比值较小, 指示其多数矿石属于岩浆型, 以岩浆成矿作用为主; 而金川岩体的平均 Cu/Pd 比值远大于原生地幔岩浆, 表明岩浆熔离作用强, 矿石的 Pd/Ir 比值较大, 体现了钯族元素矿化及成矿物质以幔源为主的特征。煎茶岭在成矿过程中有壳源物质的混染, 整体上岩石、矿石铂族元素含量较低, 这与岩浆熔离作用弱、铂族元素成矿作用不发育等因素有关; 金川在成矿成矿过程中也有少量地壳物质的混染, 但岩石、矿石铂族元素含量较高, 反映了以岩浆深部熔离成矿作用为主的特征。

关键词 地球化学; 铂族元素; 硫化镍矿床; 煎茶岭; 金川

中图分类号: P618; P597

文献标识码: A

与基性、超基性岩有关的铜镍硫化物矿床是重要的铂族元素矿床类型, 也是世界铂族金属产量和储量的最主要来源。铂族元素通常被作为重要的贵金属矿产资源进行研究(Naldrett et al., 1980; Naldrett, 1981), 同时它在示踪超镁铁质和镁铁质岩石演化与成因上亦具有不可替代的重要作用(Lorand, 1989; Garuti et al., 1997; 储雪蕾等, 2001; 王瑞廷, 2002)。陕西略阳煎茶岭含钴硫化镍矿床和甘肃金昌金川超大型岩浆铜镍硫化物矿床是中国西部具有重要代表意义的硫化镍矿床, 后者还是超大型铂族金属矿床, 其铂族金属储量占全国总储量的 53%(梁有彬等, 1998)。前人对这两个矿床的铂族元素地球化学进行过不少研究(冉红彦等, 1996; 甘肃省地质矿产局第六地质队, 1984; 贾恩环, 1986; 杨轩柱, 1989; 杨合群, 1991; 1992; 汤中立等, 1995; Chai et al., 1992; 梁有彬等, 1998; 朱文凤等, 2000), 但由于分析方法的限制或不一致, 导致所获得的数据不完整或缺乏可比性。本次研究工作采用 ICP-MS 分析方法, 对分别采自煎茶岭和金川硫化镍矿床的岩石、矿石样品进行了铂族元素、金及镍含量的测试, 并且

对比研究了煎茶岭和金川矿区不同的构造环境、不同性质超镁铁质岩石的成矿作用, 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 区域及矿床地质概况

区域上煎茶岭镍(钴)矿床位于松潘-甘孜造山带摩天岭褶皱系东部, 勉-略-阳元古代隆起区北缘。该区北以略阳—褒河深断裂为界, 以勉-略蛇绿构造混杂岩带与秦岭造山带相接; 南以汉江深断裂为界, 与扬子地块相连, 其北部鱼洞子地体和南部碧口地体对接拼贴构成一个三角形构造复合地体, 即勉(县)—略(阳)—阳平关(宁强)三角区, 同时其内也形成了一个金镍铜矿化集中区(王相等, 1996)。区内出露地层为太古宙变质结晶基底鱼洞子组、元古宙变质过渡基底接官亭组和震旦纪—早寒武世浅变质盖层断头崖组。鱼洞子组为区内最古老的变质岩系, 历经多期变质作用, 为片麻岩、变粒岩、斜长角闪岩等。接官亭组为海相火山熔岩, 中酸性火山碎屑岩夹碎屑碳酸盐沉积层。矿区出露中酸性火山碎屑

* 本文受国家重点基础研究发展规划项目(编号: G1999043211)、中国地质调查局国土资源大调查项目(编号: 200310200001; 200110200058)和西北有色地质勘查局人才基金联合资助

第一作者简介 王瑞廷, 男, 1969 年生, 博士后, 高级工程师, 主要从事矿床地球化学研究和矿产勘查工作, E-mail: wrtyf@163.com。

收稿日期 2004-07-21; 改回日期 2005-01-08。张绮玲编辑。

岩,岩石以绿泥钠长石英片岩、钠长石英片岩为主,其次有碎屑-碳酸盐岩。断头崖组岩石主要为镁质碳酸盐岩、板岩等,以断裂接触关系覆于上述不同性质基底岩系之上。

煎茶岭复式超基性主岩体沿 NEE 向与 NW 向断裂交汇部位侵入于何家岩背斜东部倾伏端,该岩体东西长 5 km,南北宽 0.3~1.2 km,钻探测深大于 1.1 km,出露面积约 5 km²,平面上呈中部膨大,向北西、南西分枝,向东收缩的“燕鱼”形态,剖面上呈向南陡倾的岩墙(王相等,1996)。分枝分别为北

部的三岔子岩枝和南部的柳树沟岩枝。煎茶岭硫化镍矿床赋存于主岩体中部(图 1),主岩体 M/F 值为 8.45~11.96,属镁质系列。产于该超基性主岩体内的晚期侵入体主要有花岗斑岩、闪长岩。花岗斑岩与镍矿成矿关系密切,各矿体皆产于岩体南部花岗斑岩外接触带弧形断裂蚀变带中。含矿岩石及近矿围岩主要为叶蛇纹岩、滑镁岩、菱镁岩、透闪岩等蚀变超基性岩类。围岩蚀变强烈,以黄铁矿化、蛇纹岩化、滑镁岩化等为主。矿石矿物主要为磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿、镍黄铁矿等。

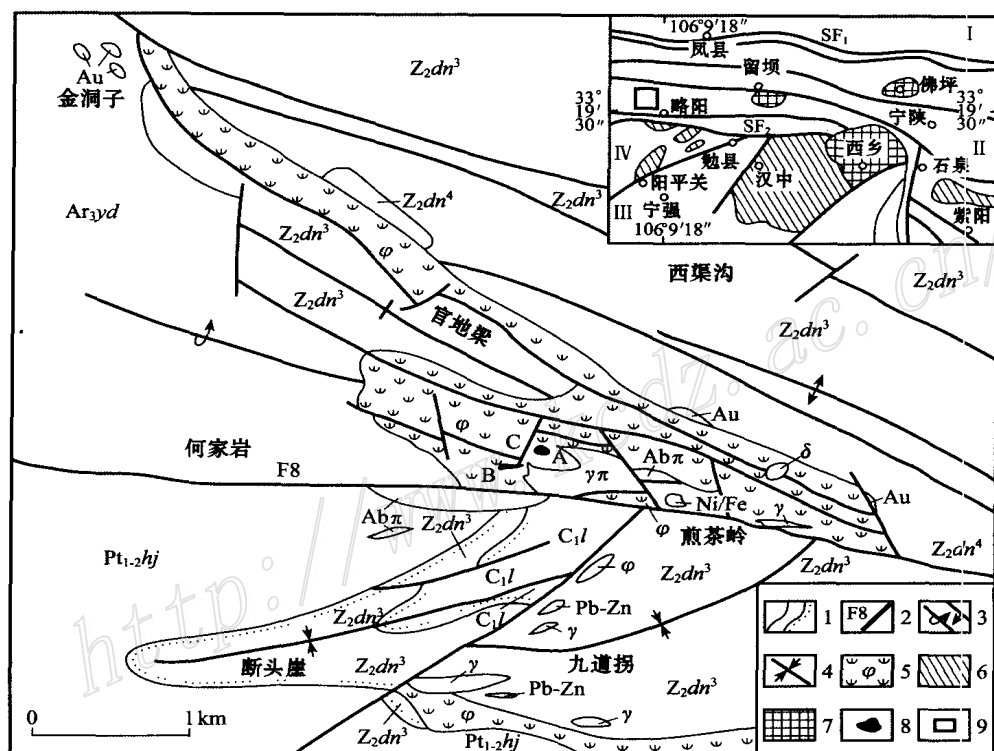


图 1 煎茶岭镍矿床地质图(据任小华,1990 修编)

C₁ l—下石炭统略阳组灰岩;Z₂dn³—灯影组白云岩、灰岩、板岩;Z₂dn⁴—灯影组白云岩;Pt₁₋₂hj—何家岩岩群细碧角斑岩;Ar₃yd—鱼洞子群混合岩、片麻岩;γ—花岗岩;γπ—花岗斑岩;δ—闪长岩;Abπ—钠长斑岩;1—整合、不整合地层界线;2—断层、逆断层及编号;3—倾伏倒转背斜及背斜;4—向斜;5—超基性岩;6—盆地;7—隆起;8—镍矿体;9—研究区。I—华北地块;II—秦岭造山带;III—扬子地块;IV—摩天岭微地块;SF₁—商丹缝合带;SF₂—勉略缝合带。Au—金矿;Ni/Fe—镍矿/铁矿;Pb-Zn—铅锌矿。A、B、C—本次采样位置。右上角为矿床区域位置图

Fig.1 Geological sketch map of the Jianchaling nickel deposit(modified after Ren,1990)

C₁ l—Limestone of Lower Carboniferous Lueyang Formation; Z₂dn³—Dolomite, limestone, slate of Dengying Formation; Z₂dn⁴—Dolomite of Dengying Formation; Pt₁₋₂hj—Spilitic keratophyre of Hejiayan complex; Ar₃yd—Chorismite, gneiss of Yudongzi Group; φ—Ultrabasic rocks; γ—Granite; γπ—Granite porphyry; δ—Diorite; Abπ—Albitophyre; 1—Conformity and unconformity; 2—Fault, reversed fault and serial number; 3—Plunging overturned anticline, anticline; 4—Syncline; 5—Ultrabasic rock; 6—Basin; 7—Range; 8—Nickel deposit; 9—Study area. I—North China massif; II—Qinling orogenic belt; III—Yangtze block; IV—Motianling micro-massif; SF₁—Shangdan suture zone; SF₂—Miannue suture zone. Au—Gold deposit; Ni/Fe—Nickel deposit/iron deposit; Pb-Zn—Lead and zinc deposit. A, B, C—Sampling locations. Upper right insert: regional location of the nickel deposit

金川超大型镍铜硫化物矿床产于龙首山隆起带所在的阿拉善地块边缘,该地块位于塔里木地台与华北地台相接的部位,南邻早古生代北祁连褶皱带,北依晚古生代准噶尔褶皱系。金川超基性岩体位于其西南缘龙首山隆起带北侧 NW 向断裂带内,岩体大致以 10° 交角不整合侵位于太古代白家嘴子组中,岩体直接与大理岩、条带状混合岩和片麻岩接触。太古代和古元古代深变质岩组成该区的基底构造层,倾向南西的单斜构造盖层变质程度浅,呈角度不整合覆于基底构造层之上。现存岩体长约 6 500 m,宽 20 ~ 527 m,延伸数百米至千米,最大延伸超过 1 100 m。岩体东西两端被第四系覆盖,中部出露地表,上部已遭剥蚀,岩体基岩面积约 1.34 km²,岩体走向北西 $50^\circ \sim 80^\circ$,整体呈透镜状,受 NEE 向压扭性断层 F_8 、 F_{16} 、 F_{23} 错断,由西向东分为 III、I、II 和 IV 4 个矿区(图 2)。该岩体为一不规则状岩墙,沿走向中间较宽,两端较窄,沿倾向一般呈板状或上宽下窄的楔状,在横剖面上 II 矿区东部地段呈歪漏斗状(汤中立等,1995)。

金川岩体作为龙首山地区超镁铁岩带中最大的岩体,是由含硫化物纯橄橄榄岩、二辉辉橄岩、二辉橄榄岩、斜长二辉橄橄榄岩及辉石岩组成的多岩相复式岩体。该岩体 Cu、Ni 及贵金属平均含量较高,在其

中、下部产出金川超大型镍铜硫化物矿床。岩体中各类岩石 CaO 、 Al_2O_3 、 NiO 含量较高, $w(\text{CaO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 近于 1, M/F 值为 2.6 ~ 6.4,均属铁质系列, MgO 含量除个别辉石岩较低外,其余皆介于 20% ~ 33.9% 之间,含矿岩石 MgO 含量变化范围较窄,一般为 21% ~ 30% (董显扬等,1995;汤中立等,1995)。金川矿床的矿石矿物主要为磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿、紫硫镍铁矿等。铂族元素矿物种类较多,主要为砷铂矿、铋碲镍钨矿等。

2 分析结果及讨论

对采自煎茶岭大型硫化镍矿床钻孔岩芯的 9 件镍矿石样品开展测试研究,其采样位置示于图 1,主要进行铂族元素(钨未分析)和金元素分析,其分析方法和精度在表 1 下部已经说明,将分析结果及前人对于该区蚀变超基性岩、围岩和中酸性岩 PGE 和 Au 分析结果一并列表于表 1。镍矿石铂族元素总量 ΣPGE (Ir、Ru、Rh、Pt、Pd 之和) 为 $9.34 \times 10^{-9} \sim 65.05 \times 10^{-9}$, 平均为 31.28×10^{-9} ; 3 件滑镁岩(表 1) 中铂族元素总量 ΣPGE 在 $19.7 \times 10^{-9} \sim 22.0 \times 10^{-9}$ 之间变化,平均为 20.77×10^{-9} 。这些不同矿石与岩石的铂族元素及金球粒陨石标准化配分模式(图 3)

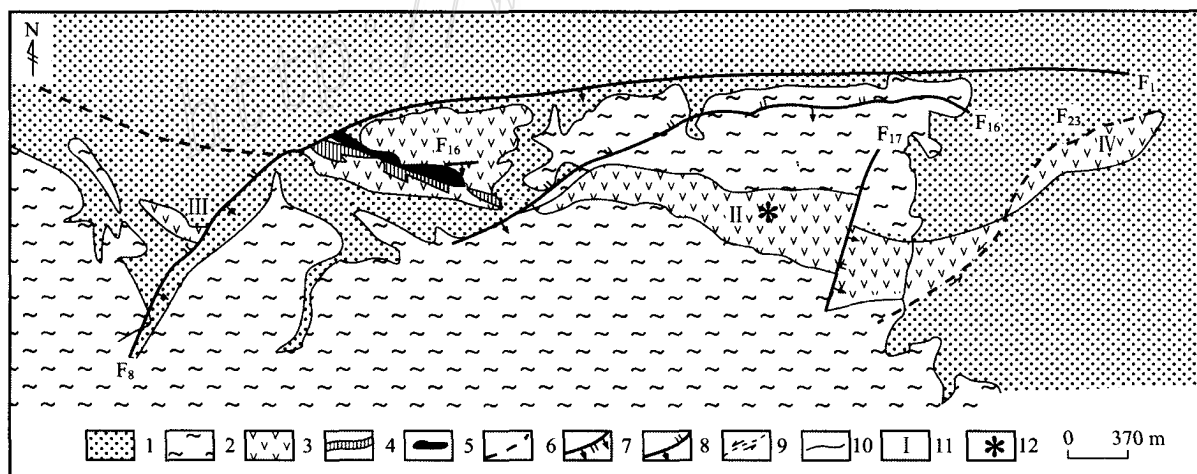


图 2 金川镍铜矿床及其岩体地质略图(据汤中立等,1995 修编)

- 1—第四系沉积物;2—古元古界白家嘴子组混合岩;3—二辉橄橄榄岩;4—岩浆就地熔离矿体;5—深部熔离-贯入矿体;6—岩相界线;
7—正断层;8—逆断层;9—平推断层;10—地质界线;11—矿体编号;12—采样位置(竖井内的不同采矿中段)

Fig. 2 Geological sketch map of the Jinchuan nickel and copper deposit and its rock body(modified after Tang Z L et al., 1995)

- 1—Quaternary;2—Pt₁ Baijiazui Formation migmatite;3—Iherzolite;4—In situ magmatic liquation orebody;5—Deep magmatic liquation orebody;
6—Lithofacies boundary;7—Normal fault;8—Reverse fault;9—Strike-slip fault;10—Geological boundary;11—Orebody serial number;12—Location of the sample

表 1 煎茶岭大型含钴硫化镍矿床岩石、矿石铂族元素、金及镍含量

Table 1 PGE, Au and Ni contents of altered ultrabasic rocks and ores in the Jianchaling large-size cobalt-bearing nickel deposit

样号	岩性	$w_{Ni}/\%$	$w_B/10^{-9}$								资料来源
			Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	Σ PGE	Au	
25228	镍矿石	0.9	-	2.41	6.39	0.48	26.54	8.49	44.31	22.77	本文
25462	镍矿石	1.472	-	2.33	6.37	0.47	2.55	2.54	14.26	12.59	
25562	镍矿石	0.555	-	2.42	5.56	0.47	3.93	4.77	17.15	9.48	
25629	镍矿石	1.216	-	2.25	5.95	0.64	38.69	17.52	65.05	27.95	
25765	镍矿石	3.722	-	2.8	5.11	0.4	7.54	8.05	23.90	15.49	
25772	镍矿石	1.523	-	2.66	9.22	0.59	2.42	6.43	21.32	72.11	
26258	镍矿石	1.587	-	1.03	2.19	0.22	3.04	2.86	9.34	13.71	
26553	镍矿石	1.453	-	3.04	7.42	0.52	19.67	14.22	44.87	19.59	
A2746	镍矿石	2.032	-	2.31	6.71	0.78	27.42	4.11	41.33	19.62	
JN-2	滑镁岩	-	2.4	2.5	4.3	4.0	6.3	2.5	22.0	160	冉红彦等, 1996
JN-3	滑镁岩	-	2.7	3.2	4.1	5.0	2.2	3.4	20.6	-	
J-42	滑镁岩	-	2.2	2.0	6.0	6.0	2.5	1.0	19.7	120	
JN-1	透闪岩	-	4.4	5.0	7.0	6.0	2.7	6.1	31.2	120	
JN-4	花岗斑岩	-	<1	0.2	<1	<1	0.4	0.5		160	
JN-6	钠长斑岩	-	<1	0.2	<1	<1	0.9	4.5		120	
J-41	蚀变白云岩	-	6.0	6.6	14.7	7.0	3.1	1.1	38.5	14100	
J8	蛇纹岩	0.195	1.0	1.2	3.0	0.3	<1	1.0		4.2	
J-31	叶蛇纹岩	-	5.9	3.0	6.4	3.0	-	-		-	

注：“-”为未测；矿石样品由中国科学院地球化学研究所资源环境测试分析中心采用 ICP-MS 完成，分析精度 RSD 为 1.5%~6.5%；岩石样品中 Pt、Pd 由原地质矿产部郑州矿产综合利用研究所采用试金光谱法分析，RSD 分别为 15%、11%；Os、Ru、Ir、Rh 由原中国有色金属工业总公司桂林矿产地质测试中心分别采用蒸馏分离催化光度法（Os、Ru）、试金催化光度法、试金氢催化波极谱法分析，RSD 各为 10%；Au 由中国科学院广州地球化学研究所测试中心采用原子吸收分光光度法分析，RSD 为 20%。

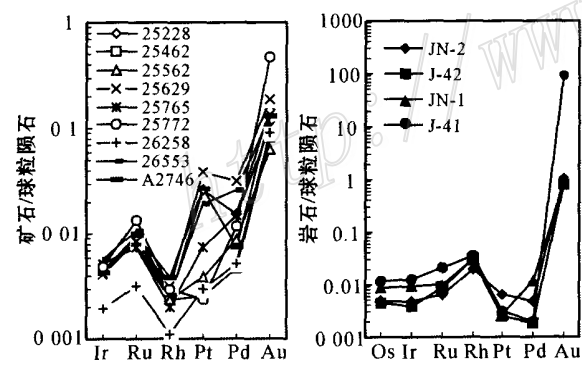


图 3 煎茶岭矿区镍矿石(左)和蚀变超基性岩(右)铂族元素及金球粒陨石标准化配分模式 (图中样号性质及数据来源同表 1, 球粒陨石值据 Barnes et al., 1988)

Fig.3 Chondrite-normalized PGE and Au patterns of Ni ores (right) and altered ultrabasic rocks (left) in the Jianchaling ore district

表明,矿石铂族元素配分曲线为向右升高的左倾型,含金、钯较高,具有铂的高峰,Pt/Pd 比值(质量分数比值,下同)在 0.38~6.67 之间变化,平均为 1.95,大于球粒陨石的 Pt/Pd 比值,Pd/Ir 比值在 1.09~

7.79 之间变化,平均为 3.21,亦大于球粒陨石的 Pd/Ir 比值,属 Pt、Pd 向下倾斜的配分型。除金外,岩石铂族元素配分曲线与矿石基本上呈互补关系,含金、钯较高,铂、钯较低,滑镁岩的 Pt/Pd 比值在 0.74~2.52 之间变化,平均为 1.92;Pd/Ir 比值在 0.50~1.06 之间变化,平均为 0.85,与矿石的对应值大致相当,反映了该矿床与蚀变超基性岩之间密切的成因关系。造成 PGE 分异的可能机制有蚀变作用、部分熔融和结晶分异(Barnes et al., 1985),而蚀变作用对 Pd 组铂族元素的分异影响大,因此,镍的成矿过程可能与后期蚀变作用有关。

在金川超大型镍铜硫化物矿床 II 矿区采取 6 件岩石、矿石样品,其采样位置标于图 2 中,分析方法及精度列于表 2 下部,分析结果见表 2。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(图 4),含 Pt、Pd 较高,具有 Pt 的高峰,Pt/Pd 比值在 0.71~5.81 之间变化,平均为 1.74,大部分接近或大于球粒陨石的 Pt/Pd 比值,与全矿区贫富矿石 Pt 含量比 Pd 含量约大 1 倍的规律一致(朱文凤等,2000);Pd/Ir 比值在 1.99~18.82 之间变化,平均为 6.54,远大于球粒陨石的 Pd/Ir 比

表 2 金川超大型硫化镍矿床岩石、矿石中铂族元素、金及镍含量 ($w_p/10^{-9}$)

Table 2 PGE, Au and Ni contents of rocks and ores from the Jinchuan superlarge cobalt-bearing nickel 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
	SJC-2	SJC-3	T1	T2	T3	SJC-13	T4	T5	T6	SJC-1	SJC-4	SJC-5	TJ1
Os	37	40	18	28.9	29	124	45	150	13.5	2.0	0.6	0.7	1.5
Ir	33	35	17	34.6	23	78	17	16.2	15.1	1.7	0.5	0.6	0.8
Ru	24	29	16	30	40	138	29	16	14.5	4	2	2	0.6
Rh	18	19	8	12.6	11	32	6	6.7	5.9	0.9	0.2	0.2	0.3
Pt	110	610	640	300	140	133	30	180	120	6	6	4	17
Pd	156	105	320	200	140	155	130	100	70	21	1.3	1.8	12
Au	140	8.4	380	130	280	11.2	800	60	30	36.5	5.2	9.2	30
Ni*	1.95	1.30	2.21	2.05	2.88	5.67	7.15	0.56	0.42	0.30	0.0728	0.0904	

注: * 单位为 %; 样品号开头为 SJC 的样品由国家地质实验测试中心采用 ICP-MS 法分析完成, $RSD \leq 10\%$; 其余据杨轩柱, 1989; 杨合群, 1991, 由中国地质科学院西安地质矿产研究所等单位测试, 分析方法及精度不详。

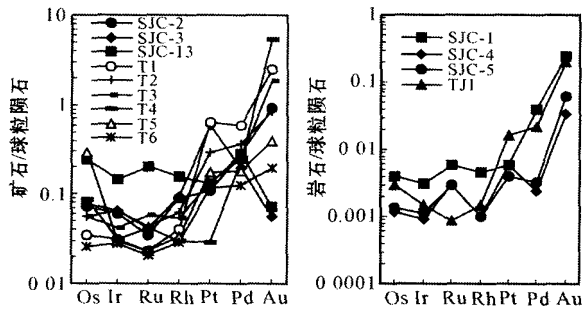


图 4 金川矿区镍矿石(左)和超基性岩(右)铂族元素及球粒陨石标准化配分模式(岩石、矿石性质见表 2; 球粒陨石值据 Barnes et al., 1988)

Fig. 4 Chondrite-normalized PGE and Au patterns of Ni ores (left) and ultrabasic rocks (right) in the Jinchuan ore district

值。二辉橄榄岩的 Pt/Pd 比值为 $0.29 \sim 4.62$, 平均为 2.38 ; Pd/Ir 比值为 $3.53 \sim 12.00$, 平均为 7.08 。其矿石铂族元素总量 ΣPGE 在 $239.0 \times 10^{-9} \sim 1019.0 \times 10^{-9}$ 之间变化, 平均为 538.8×10^{-9} ; 二辉橄榄岩中的 ΣPGE $9.3 \times 10^{-9} \sim 30.2 \times 10^{-9}$, 平均为 16.7×10^{-9} , 远小于矿石的平均值。

据前人研究 (Naldrett et al., 1986), $Pt/(Pt + Pd)$ 比值和 $(Pt + Pd)/(Os + Ir + Ru)$ 比值是母岩浆分异程度的函数。 $Pt/(Pt + Pd)$ 比值在煎茶岭矿床为 $0.27 \sim 0.87$ (表 1), 金川矿床为 $0.19 \sim 0.85$ (表 2), 大多数高于与科马提岩有关的镍矿床 ($0.1 \sim 0.3$)、Sudbury 镍矿床 (0.49) 和与溢流玄武岩有关的镍矿床 (0.2)。 $(Pt + Pd)/(Os + Ir + Ru)$ 比值在与玄武质岩浆有关的铜镍岩浆硫化物矿床中矿石的变化范围 $5.7 \sim 55.6$; 在与科马提岩有关的铜镍岩浆硫化物矿

床中的矿石为 $1.3 \sim 3.5$ (Naldrett et al., 1981), 煎茶岭矿床的该比值 (1.71) 在此范围内; 而金川矿床的该比值为 $1.54 \sim 11.88$, 平均值 5.29 (汤中立等, 1995 对该值的统计结果为 7.54) 高于与科马提岩有关的镍矿床 (≤ 3.5), 而低于 Sudbury 镍矿床 ($10 \sim 25$) 和与溢流玄武岩有关的镍矿床 (10), 整体上更接近于与玄武岩有关的镍矿床。

对比来看, 煎茶岭镍矿床的铂族元素总量较低, Pt 和 Pd 含量均小于 0.01×10^{-6} , Os 、 Ir 、 Ru 、 Rh 含量更低, 这与加拿大产于由蛇纹石化橄榄岩组成的镁质超基性岩体中的汤普逊镍铜矿床类似 (梁有彬等, 1998), 符合镁质超基性岩体中镍矿床铂族元素含量普遍较低的规律; 金川矿床的铂族元素总量较高, 尤其富集 Pt 、 Pd 。同时, 两者岩石、矿石的 PGE 球粒陨石标准化配分模式也明显不同, 煎茶岭矿石具有 Ru 的高峰, 岩石具有 Rh 的高峰, 反映了岩浆一次侵入、分异成岩成矿的特征; 金川矿床的配分曲线杂乱, 岩石、矿石具有 Pt 、 Pd 的高峰, 这反映了岩浆多次侵入、分异成岩成矿的特征。金川矿区内只在铜镍矿化的岩石和铜镍矿体中才有 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。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 Cr_2O_3 有一定的成因联系。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 (杨轩柱, 1989; 梁有彬等, 1998), 该矿床晚期贯入块状富矿石的 $w_{Pd} > w_{Pt}$, $w_{Pt}/w_{Pd} = 0.5$, 相对富集 Os 、 Ir 、 Ru 、 Rh , $w(Pt + Pd)/w(Os + Ir + Ru + Rh) = 2$, 除此以外, 其他不同成因类型的矿石均为 $w_{Pt} >$

$w_{\text{Pd}}, w_{\text{Pt}} / w_{\text{Pd}} = 2 \sim 4$, Os、Ir、Ru、Rh 的含量相对较低, $w(\text{Pt} + \text{Pd}) / w(\text{Os} + \text{Ir} + \text{Ru} + \text{Rh})$ 为 $5 \sim 300$, 全矿区岩浆型矿石的(质量分数比) Os: Ir: Ru: Rh = 1: 87: 0.86: 0.40(梁有彬等, 1998)。与金川矿床明显不同, 煎茶岭矿床矿体中的 Pt 含量大于 Pd、Ru 含量, Pd、Ru 含量大于 Os 或 Ir 或 Rh 的含量(冉红彦等, 1996), 这可能与围岩同化混染作用有关。

在硫化物-硅酸盐体系中, 铂族元素的总分配系数约为 $103 \sim 105$ (Naldrett et al., 1986), 故矿石的铂族元素含量一般高于不含硫化物的岩石, 也表明铂族元素与硫化物强烈相容, 岩浆演化过程中铂族元素的富集与硫化物析出密切相关。由表 3 可见, 不同成因的镁铁-超镁铁岩的 Pd/Ir 比值明显不同。随地幔熔融程度的减小, 熔浆的 Pd/Ir 比值逐渐增大。代表地幔耐熔部分的阿尔卑斯型纯橄榄岩的 Pd/Ir 比值小于原始上地幔和球粒陨石的比值, 而地幔高度熔融形成的科马提岩的 Pd/Ir 比值高于原始上地幔值。且地幔低度熔融生成的玄武岩及由玄武质岩浆分离结晶产生的镁铁-超镁铁岩 Pd/Ir 比值很大。煎茶岭与金川矿床相比, 前者的 Pd/Ir 平均比值(3.21, 表 1)明显低于后者(6.54, 表 2), 这与 2 个含

矿岩体各自的成因类型是对应的, 即阿尔卑斯型岩体一般为铱族元素矿化, 而由地幔熔体演化形成的岩体为钯族元素矿化。

Pd 在超镁铁质岩浆结晶或成岩过程中性状与 Au 相近(Au/Pd 值为一常数), 但在后期成岩及变质作用过程中呈惰性, 保持其原始含量不变, 又与金性质完全不同。煎茶岭矿石的 Au/Pd 比值在 $1.38 \sim 11.21$ 范围内变化, 反映有后期热液的贡献。金川二辉橄榄岩的 Au/Pd 比值为 3.34, 矿石的 Au/Pd 比值为 1.34, 反映了岩浆熔离的成矿作用。

煎茶岭蛇纹岩的 Cu/Pd 比值为 1190, 低于原生地幔岩浆的 Cu/Pd 比值(6500), 说明岩石中存在富 Pd 硫化物, 岩浆熔离作用较弱, 因此应注意寻找就位岩体与后期侵入体接触部位的矿体; 金川二辉橄榄岩的 Cu/Pd 比值在 $85714.29 \sim 116923.08$ 之间, 平均为 106064.31, 岩体的平均 Cu/Pd 比值为 50000(王瑞廷, 2002), 远大于原生地幔岩浆的 Cu/Pd 比值, 说明该岩石为因硫化物析离而失去 Pd 的岩浆所结晶(Maier et al., 1996), 指示存在强烈的岩浆熔离作用, 故岩体深部及边部还应有一定的找矿前景。

表 3 铂族元素特征参数*

Table 3 Characteristic parameters of platinum group elements

矿区及岩、矿石类型	$w_{\text{Pt}} / w_{\text{Pd}}$	$w_{\text{Pd}} / w_{\text{Ir}}$	$w(\text{Pt} + \text{Pd}) / w(\text{Os} + \text{Ir} + \text{Ru})$
煎茶岭			
蛇纹岩型镍矿石	4.03	3.23	-
滑镁岩型镍矿石	0.79	2.69	-
菱镁岩型镍矿石	2.21	7.79	-
透闪岩型镍矿石	1.00	1.09	-
滑石岩型镍矿石	3.13	3.52	-
钠长岩型镍矿石	0.82	1.97	-
矿石(16 件)(王相等, 1996)	1.17	2.56	1.71
滑镁岩	1.92	0.85	0.62
金川			
海绵陨铁状镍矿石	2.20	7.68	6.43
块状镍矿石	0.55	4.82	1.31
浸染状镍矿石	1.80	6.17	1.54
星点状镍矿石	1.71	14	11.88
二辉橄榄岩(汤中立等, 1995)	1.42	15	10
布什维尔德 MR 层矿石(Barnes et al., 1985)	2.44	20.67	9.29
安大略科马提岩中的浸染状矿石(Barnes et al., 1987)	10.5	9.8	3.3
阿尔卑斯型纯橄榄岩(Barnes et al., 1985)	4.05	0.49	0.68
富硫化物拉斑玄武岩(Barnes et al., 1985)	0.38	77.08	13.01
原始上地幔(Ringwood, 1991)	1.36	1.52	1.08
原始地幔(McDonough et al., 1995)	1.82	1.22	0.93
CI 球粒陨石(McDonough et al., 1995)	1.84	1.21	0.94

* 表中数据根据表 1、表 2、王相等(1996)及汤中立等(1995)资料计算。

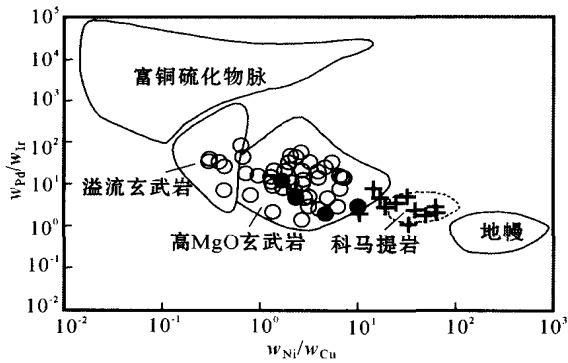


图5 煎茶岭与金川硫化镍矿床 Ni/ Cu- Pd/ Ir 图解
(+ 字为煎茶岭矿石; 实心、空心圆为金川矿石; 空心圆圈
数据引自 Chai et al., 1992)

Fig. 5 The Ni/ Cu- Pd/ Ir diagram of Jianchaling and
Jinchuan sulfide nickel deposits

(Cross pattern signifies Jianchaling ore. Solid and hollow circles indicate Jinchuan ore. Data in the hollow circle from Chai et al., 1992)

图5表明,煎茶岭与金川镍矿床的原始岩浆成分存在明显差异,前者为类似于科马提岩质的高镁岩浆,后者则为高 MgO 的玄武质岩浆。煎茶岭和金川镍矿床的铂族元素地球化学分布截然不同也说明了这一点,即煎茶岭矿床铂族元素地球化学分布部分接近于科马提岩型矿床;而金川矿床铂族元素地球化学分布更偏向于玄武质岩浆来源的矿床(王瑞廷, 2002)。

由图6可知,煎茶岭矿床多数岩石、矿石的 PGE 表现出结晶分异趋势,与纯橄榄岩接近,说明其熔离作用不发育;而金川矿床大部分岩石的 PGE 具有部分熔融趋势,与地幔橄榄岩接近,矿石显示出随着 Pt 正异常的降低, Pd/ Ir 比值减小的特征。

3 结论

(1) 煎茶岭蛇纹岩的 Cu/ Pd 比值低于原生地幔岩浆的相应值,表明岩石中存在富 Pd 硫化物,岩浆熔离作用较弱,当然这不排除后期蚀变作用对 Pd 分配行为的影响,其 Au/ Pd 比值反映存在后期变质热液成矿作用;金川岩体的 Cu/ Pd 平均比值远大于原生地幔岩浆的相应值,说明其岩石为硫化物析离而失去 Pd 的岩浆结晶形成,二辉橄榄岩的 PGE 具有部分熔融趋势,与地幔橄榄岩接近,指示存在岩浆熔离作用。

(2) 煎茶岭镍矿石的 Pd/ Ir 比值在 1.09 ~ 7.79

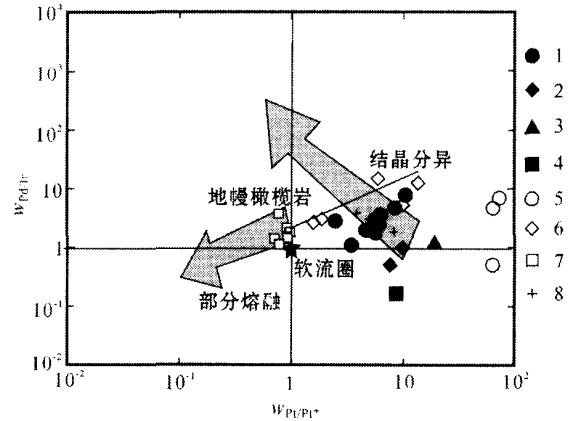


图6 结晶分异和部分熔融过程中的 PGE 分异趋势

1—煎茶岭含矿蛇纹岩; 2—滑镁岩; 3—透闪岩; 4—蚀变白云岩;
5—金川星点状镍矿石; 6—二辉橄榄岩; 7—地幔橄榄岩; 8—纯橄
榄岩; Pt* 为 Pt 异常; 据 Garuti et al., 1997, 7.8 为原图数据

Fig. 6 Differentiation trends of PGE in crystal
fractionation and partial melting

1—Ore-bearing serpentinite in Jianchaling; 2—Talc magnesite rock;
3—Tremolite rock; 4—Altered dolomite; 5—Scattered nickel ores in
Jinchuan; 6—Lherzolite; 7—Mantle peridotite; 8—Dunite; Pt*
means Pt anomaly; 7, 8 after Garuti et al., 1997

之间变化,均值较小,指示多数矿石以岩浆成矿作用为主;金川矿床矿石的 Pd/ Ir 比值变化范围为 4.82 ~ 15,均值较大,与其由地幔熔体演化形成的含矿岩体的成因类型相对应,体现了其岩体发生钼族元素矿化及成矿物质以幔源为主的特征。

(3) 煎茶岭超基性岩体的原岩可能为纯橄榄岩,其母岩浆成分为类似于科马提岩的高镁岩浆;金川岩体的母岩浆为高镁拉斑玄武质岩浆。

(4) 煎茶岭硫化镍矿床的铂族元素特征参数 $Pt/(Pt + Pd)$ 、 $(Pt + Pd)/(Ru + Ir + Os)$ 、Pd/ Ir 及 $Cu/(Ni + Cu)$ 等比值具有过渡特征,与其处于过渡的构造环境、特殊的岩浆性质和复杂的成矿作用有关;金川超大型铜镍硫化物矿床铂族元素特征参数具有与基性岩浆有关的铜镍硫化物矿床的特征,与其母岩浆性质有关,正是这种镁铁质而非超镁铁质岩浆才形成了既富 Cu、又富 PGE 的超大型铜镍岩体硫化物矿床。

(5) 煎茶岭镍矿床的成矿过程中有壳源物质的混染,整体上其岩石、矿石铂族元素含量较低,这与其岩浆熔离作用弱、PGE 成矿作用不发育有关;金川超大型硫化镍矿床成岩成矿过程中也有少量地壳物质的混染,但其岩石、矿石铂族元素含量较高,反映

了该矿床以岩浆深部熔离成矿作用为主的特征。

References

- Barnes S J, Naldrett A J and Gorton M P. 1985. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas [J]. *Chem. Geol.*, 53: 303 ~ 323.
- Barnes S J and Naldrett A J. 1987. Fractionation of the platinum-group elements and gold in some komatiites of the Abitibi greenstone belt, Northern Ontario [J]. *Econ. Geol.*, 82(1): 165 ~ 183.
- Barnes S J, Boyd R, Korneliusson A, et al. 1988. The use of mantle ratios in discriminating between the effects of partial melting, crystal fractionation and sulfide segregation on platinum-group elements, gold, nickel and copper: examples from Norway [A]. In: Prichard H M, et al. ed. *Geo-Platinum 87* [C]. London: Elsevier. 113 ~ 143.
- Chai G and Naldrett A J. 1992. Characteristics of Ni-Cu-PGE mineralization and genesis of the Jinchuan deposit, Northwest China [J]. *Econ. Geol.*, 87: 1475 ~ 1495.
- Chu X L, Sun M and Zhou M F. 2001. The platinum-group elements geochemistry in chemical geodynamics [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 112 ~ 122 (in Chinese with English abstract).
- Dong X Y, Li X, Ye L H, et al. 1995. Ultra-mafic rocks in China [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 74, 98 ~ 129 (in Chinese with English abstract).
- Garuti G, Fershtater G, Bea F, et al. 1997. Platinum-group elements as petrological indicators in mafic-ultramafic complexes of the central and southern Urals: Preliminary results [J]. *Tectonophysics*, 276: 181 ~ 194.
- Jia E H. 1986. Geological feature of Jinchuan sulfide copper-nickel deposit [J]. *Mineral Deposits*, 5(1): 27 ~ 38 (in Chinese with English abstract).
- Liang Y B, Liu T Y, Song G R, et al. 1998. Platinum-group element deposits in China [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press. 1 ~ 18 (in Chinese with English abstract).
- Lorand J P. 1989. Abundance and distribution of Cu-Fe-Ni sulfides, sulfur, copper and platinum-group elements in orogenic type spinel ilmenite massifs of Ariege (Northeastern Pyrenees, France) [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 93: 50 ~ 64.
- Maier W D, Barnes S J, Teigler B, et al. 1996. Cu/Pd and Cu/Pt of silicate rocks in the Bushveld complex: Implications for platinum-group element exploration [J]. *Econ. Geol.*, 91: 1151 ~ 1158.
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the earth [J]. *Chem. Geol.*, 120: 223 ~ 253.
- Naldrett A J and Duke M. 1980. Platinum metals in magmatic sulfide ores [J]. *Science*, 208: 1417 ~ 1424.
- Naldrett A J. 1981. Nickel sulfides deposits: Classification, composition, and genesis [J]. *Econ. Geol.*, 6: 28 ~ 85.
- Naldrett A J and Barnes S J. 1986. 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.*, 64(2): 113 ~ 133.
- No. 6 Geological Team, Gansu Bureau of Geology and Mineral Resources. 1984. *Geology of the Baijiozuizi Cu-Ni sulfide deposit* [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 225p (in Chinese).
- Ran H Y, Huang W K, Gan X P, et al. 1996. The noble elements in the gold deposits related to altered ultrabasic rock massives [J]. *Geochimica*, 25(5): 520 ~ 528 (in Chinese with English abstract).
- Ren X H. 1990. The ore-forming geological characteristics of Jianchaling nickel deposit [A]. In: Wang X and Wang D S, ed. *Major types of metal mineralization and discuss on ore-forming perspective of super-large deposits in Mianlueyang volcanic rocks belt, Shaanxi Province* [C]. Lanzhou: Lanzhou University Press. 115 ~ 123 (in Chinese).
- Ringwood A E. 1991. Phase transformations and their bearing on the constitution and dynamics of the mantle [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55(8): 2083 ~ 2110.
- Tang Z L and Li W Y. 1995. The metallogenic model and geological comparison for Jinchuan nickel-copper sulfide (platinum-bearing) deposit, Gansu Province, China [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 14 ~ 209 (in Chinese).
- Wang R T. 2002. The Comparative study on mineralization of Jianchaling and Jinchuan nickel-copper sulfide deposits [PhD dissertation] [D]. Advisor: He Y and Tang Z L. Xi'an: Northwest University. 1 ~ 143 (in Chinese with English abstract).
- Wang X, Tang R Y, Li S, et al. 1996. Qinling orogeny and metallogenesis [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press. 272 ~ 300 (in Chinese with English abstract).
- Yang H Q. 1991. On the genesis of Jinchuan copper-nickel sulfide deposit [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 22: 117 ~ 135 (in Chinese with English abstract).
- Yang H Q. 1992. The zoning mechanism for noble elements of Jinchuan sulfide copper-nickel deposit [J]. *Northwest Geoscience*, 13(1): 75 ~ 80 (in Chinese with English abstract).
- Yang X Z. 1989. Platinoid and gold geochemistry in the Cu-Ni sulfide deposit at Jinchuan, Gansu province, China [J]. *Bulletin of Xi'an Geology and Mineral Resource Institute of CAGS*, 26: 59 ~ 68 (in Chinese with English abstract).
- Zhu W F and Liang Y B. 2000. Occurrence state and distribution of platinum group elements in the Jinchuan Cu-Ni sulfide deposit [J]. *Geology and Prospecting*, 36(1): 26 ~ 28 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 储雪蕾, 孙敏, 周美夫. 2001. 化学地球动力学中的铂族元素地球化学 [J]. *岩石学报*, 17(1): 112 ~ 122.
- 董显扬, 李行, 叶良和, 等. 1995. *中国超镁铁质岩* [M]. 北京: 地质出版社. 98 ~ 129.
- 甘肃省地质矿产局第六地质队. 1984. *白家咀子硫化铜镍矿床地质* [M]. 北京: 地质出版社. 1 ~ 225.
- 贾恩环. 1986. *金川硫化铜镍矿床地质特征* [J]. *矿床地质*, 5(1): 27 ~ 38.

- 梁有彬, 刘同有, 宋国仁. 1998. 中国铂族元素矿床[M]. 北京: 冶金工业出版社. 1 ~ 18.
- 冉红彦, 黄婉康, 甘先平, 等. 1996. 蚀变超基性岩金(镍) 矿床中的贵金属元素——以云南墨江金矿和陕西煎茶岭金矿为例[J]. 地球化学, 25(5): 520 ~ 528.
- 任小华. 1990. 煎茶岭镍矿床成矿地质特征[A]. 见: 王相, 王东生, 主编. 陕西勉略阳火山岩带主要金属矿化类型及超大型矿床成矿远景探讨[C]. 兰州: 兰州大学出版社. 115 ~ 123.
- 汤中立, 李文渊. 1995. 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. 14 ~ 209.
- 王瑞廷. 2002. 煎茶岭与金川镍矿床成矿作用比较研究[博士学位论文][D]. 导师: 赫英, 汤中立. 西安: 西北大学. 1 ~ 143.
- 王相, 唐荣扬, 李实, 等. 1996. 秦岭造山与金属成矿[M]. 北京: 冶金工业出版社. 272 ~ 300.
- 杨合群. 1991. 论金川硫化铜镍矿床成因[J]. 中国地质科学院院报, 第 22 号: 117 ~ 135.
- 杨合群. 1992. 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, 13(1): 75 ~ 80.
- 杨轩柱. 1989. 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, 第 26 号: 59 ~ 68.
- 朱文凤, 梁有彬. 2000. 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, 36(1): 26 ~ 28.

Comparison of platinum group elements (PGE) between Jianchaling and Jinchuan nickel sulfide deposits and its significance

WANG Rui-ting^{1,2}, MAO Jing-wen^{1,3}, REN Xiao-hua², WANG Min-liang² and HE Ying⁴

(1 Faculty of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 Northwest Bureau of Geological Exploration for Nonferrous Metals, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4 Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract

The PGE geochemistry of rocks and ores from the Jianchaling and the Jinchuan nickel sulfide deposits was systematically studied in this paper by new ICP-MS analytic method for the purpose of probing further into the genesis of this type of deposits and guiding their prospecting work. It is concluded that the Cu/Pd ratio of serpentinite from Jianchaling rock body is lower than that of the original mantle magma, indicating that the liquation process of magma is rather weak, and that the mean Cu/Pd ratio of Jinchuan intrusion is much higher than that of the original mantle magma, suggesting that the liquation process of magma is strong. The average Pd/Ir ratio of ores from the Jianchaling nickel deposit is relatively low, implying the domination of magmatic type ores and magmatic metallogenic processes. In contrast, the ratio of the Jinchuan nickel deposit is high, embodying the characteristics of PGE mineralization and the derivation of ore-forming substance mainly from the mantle source. The platinum group element characteristic parameters $Pt/(Pt + Pd)$, $(Pt + Pd)/(Ru + Ir + Os)$, Pd/Ir , and $Cu/(Ni + Cu)$ of the former deposit show transitional features, which are related to the transitional tectonic environment, special magma property, and complex ore-forming process. The characteristic parameters of the latter are similar to those of the copper-nickel deposits related to basic magma. Nevertheless, it is not the ultramafic magma, but the mafic magma, that results in the formation of the superlarge sulfide copper-nickel deposits enriched in Cu and PGE. There existed crustal substance contamination during the formation of the Jianchaling ore deposit, and the PGE content of Jianchaling ores and rocks is comparatively low, which might be related to weak magmatic liquation process and PGE mineralization. There also existed some crustal substance contamination during the rock-forming and ore-forming process of the Jinchuan deposit, but its PGE content is high, suggesting the mineralization was dominated by deep magmatic liquation.

Key words: geochemistry, platinum group elements, nickel sulfide deposit, Jianchaling, Jinchuan