

# 煎茶岭硫化镍矿床的铂族元素地球化学特征及其意义\*

王瑞廷<sup>1,2</sup> 毛景文<sup>1,3</sup> 赫英<sup>4</sup> 汤中立<sup>5</sup> 王东生<sup>2</sup> 任小华<sup>2</sup>

WANG RuiTing<sup>1,2</sup>, MAO JingWen<sup>1,3</sup>, HE Ying<sup>4</sup>, TANG ZhongLi<sup>5</sup>, WANG DongSheng<sup>2</sup> and Ren XiaoHua<sup>2</sup>

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, 西安 710054

3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

4. 西北大学地质学系, 西安 710069

5. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054

1. Faculty of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Bureau of Geological Exploration for Nonferrous Metals in Northwest China, Xi'an 710054, China

3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

4. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

5. Faculty of Geosciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2003-10-18 收稿, 2005-01-12 改回.

Wang RT, Mao JW, He Y, Tang ZL, Wang DS and Ren XH. 2005. Geochemical characteristics of Platinum group elements of the sulfide nickel ores and related rocks in Jianchaling, Lueyang county, Shannxi province, China and their implication for genesis. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1) 219–226

**Abstract** The Platinum-group elements (PGE) geochemistry of rocks and copper-nickel sulfide ores from Jianchaling deposit is systematically studied by ICP-MS testing method. The Cu/Pd ratio of serpentinite is lower than that of original mantle magma, indicating that magmatic liquation is weak, and the Au/Pd ratio of the serpentinite reflects the post-magmatic emplacement metamorphic hydrothermal mineralization is also responsible for the formation of the copper-nickel sulfide deposit. The Pd/Ir ratio of ores changes in a small range, showing the ores belong to magma-type, although magmatic action is relatively weak in the ore field, but the magma ore-forming process play an important role in the formation of copper-nickel sulfide ores. The Platinum-group elements characteristic parameter for the sulfide nickel deposit have transition feature, which is corresponding to transition tectonic setting of the mineralization, special magma composition, and complicated metallogenesis. The substances of the crustal source have contaminated during ore-forming process, the content of PGE for the rocks and ores are low. On the whole, this can be ascribed to weak magmatic liquation and undeveloped PGE mineralization.

**Key words** Platinum group elements, Sulfide nickel deposit, Geochemical feature, Jianchaling

**摘要** 采用 ICP-MS 分析方法对煎茶岭硫化镍矿床岩石及矿石的铂族元素地球化学研究表明,煎茶岭矿床蛇纹岩的 Cu/Pd 值低于原生地幔岩浆的 Cu/Pd 值,说明岩浆熔离作用较弱,其 Au/Pd 值反映存在后期变质热液成矿作用。镍矿石的 Pd/Ir 比值变化较小,指示其多数矿石属于岩浆型,尽管岩浆活动弱,但以岩浆成矿作用为主。该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)具有过渡特征,这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。煎茶岭镍矿床成矿过程中有壳源物质的混染,整体上岩、矿石铂族元素含量较低,这与其岩浆熔离作用弱,PGE 成矿作用不发育等因素有关。

**关键词** 铂族元素;硫化镍矿床;地球化学特征;煎茶岭

中图法分类号 P618.53;P618.63;P594.1

\* 本文受国家重大基础研究发展规划项目(编号:G1999043211)及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,高级工程师,主要从事矿床地球化学研究及矿产勘查工作,E-mail:wrtf@163.com

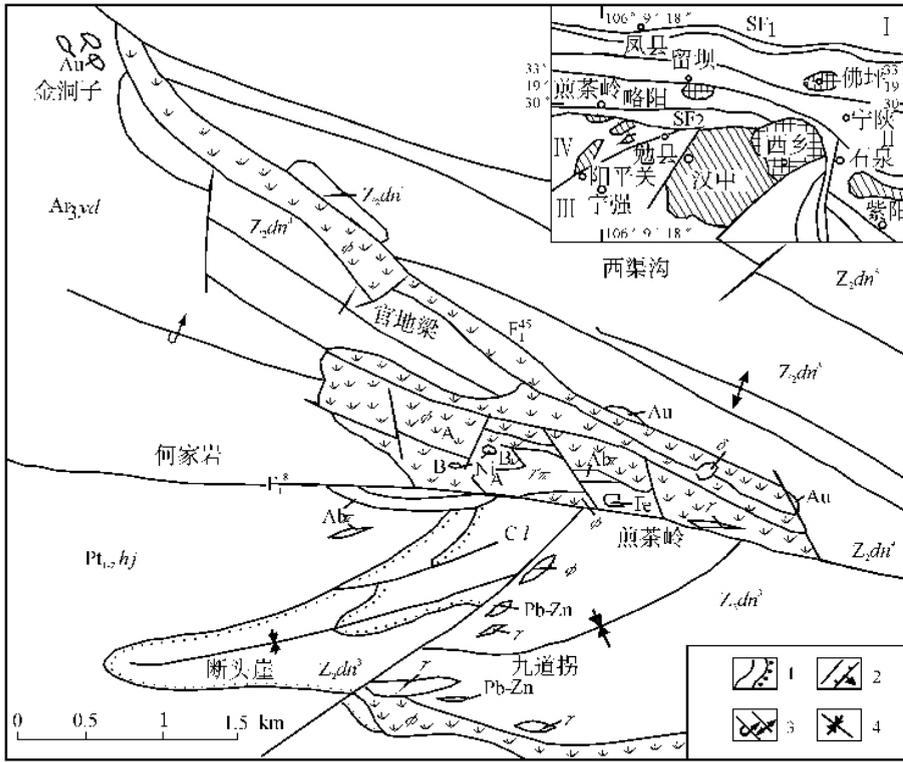


图1 煎茶岭镍矿床地质图(据任小华,1990修编)

C<sub>1</sub>l—下石炭统略阳组灰岩;Z<sub>2</sub>d—板岩(未分);Z<sub>2</sub>dn<sup>3</sup>—灯影组白云岩、灰岩、板岩;Z<sub>2</sub>dn<sup>4</sup>—灯影组白云岩;Pt<sub>1,2</sub>hj—何家岩岩群细碧角闪岩;Ar<sub>3</sub>yd—鱼洞子群混合岩、片麻岩;Φ—超基性岩;γ—花岗岩;γπ—花岗斑岩;δ/Abπ—闪长岩/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,背斜;4—向斜。I—华北地块;II—秦岭造山带;III—扬子地块;IV—摩天岭微地块;SF<sub>1</sub>—商丹缝合带;SF<sub>2</sub>—勉略缝合带。Au—金矿;Ni/Fe—镍矿/铁矿;Pb-Zn—铅锌矿。A、B—本次采样位置。右上角为矿床区域位置图。

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

铂族元素通常作为重要的贵金属矿产资源进行研究(Naldrett *et al.*, 1980; Naldrett, 1981),但同时它在示踪超镁铁和镁铁质岩石演化与成因及相关成矿方面具有不可替代的重要应用价值(Lorand, 1989; Garuti *et al.*, 1997; 储雪雷等, 2001)。铂族元素地球化学研究是矿床和元素地球化学研究领域的热点和难点之一,在岩浆硫化物矿床研究中铂族元素地球化学应用普遍(Chai *et al.*, 1992; Naldrett *et al.*, 2000)。对于产于镁质超基性岩中的煎茶岭镍矿床前人在这方面做了一些零星的工作,仅认为煎茶岭金-镍矿田PGE均低于 $71 \times 10^{-9}$ ,且具有Pt ≥ Pd和Ru > Os、Ir、Rh的特征(冉红彦等, 1996),而对镍矿床铂族元素地球化学未专门作深入的探讨和分析。随着铂族元素测试方法技术及其应用理论的深入,系统地对其岩、矿石进行铂族元素地球化学研究是该矿床成矿作用和地球化学研究所必需的。本文即探讨其铂族元素地球化学特征及意义,并据此分析成岩成矿作用,以促进该矿床研究的发展。

### 1 区域及矿床地质概况

区域上煎茶岭镍-金矿田位于松潘-甘孜造山带摩天岭褶

皱系东部,勉(县)-略(阳)-沔(平关)元古代隆起区北缘。该区北以略阳-褒河深断裂为界与秦岭造山带相接,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-略-阳三角区,同时其内也形成了一个金、铜、镍等金属矿化集中区(王相等, 1996; 王平安等, 1998)。

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-早寒武世浅变质盖层断头崖组。鱼洞子组为区内最古老变质岩系,历经多期变质作用,现仅存片麻岩、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。矿区只出露该岩组下部中酸性碎屑岩,岩石以绿泥钠长石英片岩,钠长石英片岩为主,其次有上部的碎屑-碳酸盐岩。断头崖组岩石主要为镁质碳酸盐岩、板岩等,以断裂接触关系上覆于上述不同性质基底岩系之上。

煎茶岭含钴硫化镍矿床赋存于煎茶岭超基性岩体中(图1),该岩体沿北东东向与北西西向断裂交汇部位侵入于何家岩背斜东部倾伏端,岩体东西长5km,南北宽0.3~1.2km,钻探测深大于1.1km,出露面积约5km<sup>2</sup>,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)。其北西、南西分枝分别为北部的三岔子岩枝和南部的柳树沟岩枝,主岩体及其分枝为岩浆冷侵位形成。产于该超基性主岩体内的晚期侵入体主要有花岗斑岩、钠长斑岩等。花岗斑岩长轴近东西向,南界面受断裂限制较平直,北界面呈向北凸出的弧形,浅部向北缓倾,深部向南陡倾,东西端延伸浅,中部较大;钠长斑岩主要集中分布在主岩体中部,呈大致左行斜列的脉岩群,构成了一个宽约0.1~0.3km的脉带,与矿体走向一致,产状上与花岗斑岩相同,均为深部南倾,浅部北倾(任小华,1990)。煎茶岭超基性主岩体 Sm-Nd 等时线年龄为  $927 \pm 49\text{Ma}$ (庞春勇等,1993),研究表明其形成于新元古代由元古宙裂陷槽向显生宙造山带过渡的特殊构造环境(王瑞廷,2003)。与其有关的煎茶岭金矿床产于超基性岩体北侧与白云岩接触的断裂蚀变带中,成矿较晚,主要为印支-燕山期(王相等,1996;王瑞廷等,2000)。该含矿主岩体深度变质,岩石已强烈蚀变成蛇纹岩、滑石菱镁岩、菱镁岩,岩石 M/F 值为 8.45~11.96,属镁质超基性岩。全岩分析表明此岩体具高 Mg、Ni,低 S、K、Na 特征, MgO 含量通常大于 30%,推测其原岩为纯橄榄岩、橄榄岩等(师占义等,1992;骆华宝等,1993;张国伟等,2001)。现今岩体构造裂隙发育,主要由蛇纹岩、滑石菱镁岩、石英菱镁岩及透闪岩等蚀变岩石组成。

该矿床可分为南、北、中三个矿化带,各矿体皆位于岩体南部印支期花岗斑岩外接触带弧形断裂蚀变带中,且其成群成带环绕外接触带分布(王相等,1996)。目前探明的矿体主要集中分布在中带主岩体中段,两侧分枝岩体仅见镍矿化,无工业意义。通常矿体走向  $280^\circ$  至南西  $260^\circ$ ,南倾,倾角  $68^\circ \sim 75^\circ$ ,呈透镜体状、似层状产出,与变质超基性岩体产状一致。单个矿体沿走向和倾向均有明显的分枝复合,膨胀收缩现象,受花岗斑岩北接触带向北突出向南倾斜的弧形构造控制,各矿体也呈北凸南倾的弧形产出,在剖面、平面上,矿体产状完全与花岗斑岩北接触带一致。矿体规模变化较大,主要矿体均具有浅部矿体薄,矿石品位低,深部矿体厚,矿石品位高的变化规律。其镍矿石依据主要金属矿物组合可分

为两个系列,即磁黄铁矿-镍黄铁矿系列和黄铁矿-针镍矿-辉镍矿系列。全矿床镍、钴、铜平均品位分别为 TNi 0.683%、Co 0.026%、Cu 0.029%,已圈定镍储量近 22 万吨。TNi 品位大于 1% 的富镍矿占全矿总吨量的 30%,这些富镍矿体常位于贫镍矿体中、下部和深部,形态与产状均与贫镍矿体一致。

## 2 样品特征及分析方法

本次野外工作采集了 14 件岩、矿石样品,其蛇纹岩呈暗绿色或浅黄绿色,为叶片状、放射状变晶结构,致密块状构造,主要矿物为蛇纹石,含少量菱镁矿、磁铁矿及滑石等。菱镁岩呈灰白色或浅灰色,为自形中粗粒变晶结构,致密块状构造,主要矿物为菱镁矿、石英,含少量滑石、铬尖晶石及磁铁矿等。花岗斑岩呈深灰色或黄褐色,具斑状结构,块状构造,斑晶主要是钠长石,基质多为钾长石和石英,另含少量次生绢云母、碳酸盐及黄铁矿等。

矿石多为块状构造、鳞片变晶结构,金属硫化物含量在 10%~35% 之间变化,多为磁黄铁矿、镍黄铁矿等;脉石矿物主要为蛇纹石、滑石与白云石等(部分光、薄片鉴定结果如表 1;采样位置见图 1,其中 A 为岩石 J-8、JCD-3、JCD-4 的采样位置, B 为矿石之采样位置)。

岩、矿石样品分别在国家地质实验测试中心、中国科学院地球化学研究所资源环境测试中心分析,分析流程各为,将待测样品与碳酸钠、硼酸钠、硼砂、玻璃粉、硫磺、面粉混合,倒入坩埚中,加入适当量钨稀释剂在  $1150^\circ\text{C}$  高温炉内熔融,把溶体倒入铁模中冷却后取出钨扣,用 HCL 溶解钨扣滤出不溶物,在封闭溶样器中用王水溶解滤渣,在 ICP-MS 上测定 Pt、Pd、Rh、Ir、Ru 和 Os;将试样于刚玉坩埚中经  $\text{Na}_2\text{O}_2$  熔融分解,王水浸取后蒸发脱水除  $\text{SiO}_2$ ,Te 共沉淀富集 PGE 和 Au,用同位素稀释法 ICP-MS 测定 Ru、Pd、Ir 和 Pt,内标法测定 Rh 和 Au(漆亮等,1999)。ICP-MS 测定精度  $\text{RSD} \leq 6.5\%$ (表 2)。

表 1 煎茶岭镍矿床岩石及矿石的矿物成分特征(%)

Table 1 Mineral composition feature(%) and sampling location of Jianchaling dolostone talc serpentinite-type nickel ore

样号	样品性质	金属硫化物	蛇纹石	滑石	白云石	白云母	方铅矿
J-8	蛇纹岩	菱镁矿 3~5	92	-	-	-	铁质 3
JCD-3	菱镁岩	菱镁矿 60~90	-	5	-	-	-
JCD-4	花岗斑岩	钠长石~50	钾长石 30	石英 5	-	-	铁质 2
JCK-1	镍矿石	20	35	15~20	15~20	5	-
JCK-2	镍矿石	10~15	57	15~20	2~3	>5	-

### 3 铂族元素地球化学

采自煎茶岭镍矿床坑道、钻孔岩芯的 14 件不同类型岩、矿石样品的铂族元素与金的测试数据及前人对于该区蚀变超基性岩、围岩和中酸性岩 PGE 及 Au 的分析结果列于表 2。这些不同矿石与岩石的球粒陨石标准化 PGE 及金分布模式如图 2。该图表明, 矿石的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, 这与 Pt、Pd 及 Au 在镁铁质地壳岩石和与镁铁-超镁铁质侵入体有关的矿床中相对富集的认识 (Fleet *et al.*, 1991, 1996) 是一致的。Pt/Pd 比值

在 0.40 ~ 1.67 之间变化, 均小于球粒陨石的 Pt/Pd 比值; Pd/Ir 比值在 1.08 ~ 7.72 之间变化, 均大于球粒陨石的 Pd/Ir 比值, 属 Pt、Pd 向下倾斜的配分型。由于一般情况下, 热液型镍矿石的 Pd/Ir 值超过 100, 而岩浆型镍矿石的 Pd/Ir 值较低 (Maier *et al.*, 1996), 故说明多数煎茶岭镍矿石属于岩浆型, 该矿床的形成以岩浆成矿作用为主, 并不象前人认为的以后期变质热液交代改造成矿作用为主。除金外, 岩石的铂族元素配分曲线与矿石基本上呈互补关系, 含金、钨较高, 具有铂、钯的低谷, 由于造成 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 PGE 影响大, 因此这说明镍成矿过程还与蛇纹石化蚀变

表 2 煎茶岭镍矿床岩、矿石中成矿及铂族元素含量 ( $10^{-9}$ )

Table 2 The content of Ni, Co, PGE and Au in rock and ore from Jianchaling sulfide nickel deposit ( $10^{-9}$ )

样号	岩性	Ni (%)	Co (%)	Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	Au
J-31	叶蛇纹岩			5.9	3.0	6.4	3.0			
J8	蛇纹岩	0.195	0.009	1.0	1.2	3.0	0.3	<1	1.0	4.2
JN-2	镍矿石	1.260	0.034	2.4	2.5	4.3	4.0	6.3	2.5	160
JN-3	镍矿石	2.493	0.061	2.7	3.2	4.1	5.0	2.2	3.4	
J-42	滑镁岩			2.2	2.0	6.0	6.0	2.5	1.0	120
JCD-3	菱镁岩	0.027	0.039	<1	<0.1	<1	<0.1	2.0	<1	21
JN-1	透闪岩	0.527	0.017	4.4	5.0	7.0	6.0	2.7	6.1	120
JN-4	花岗斑岩	0.20	0.003	0.2	0.2	<0.2	<1	0.4	0.5	160
JCD-4	花岗斑岩	0.001	0.009	<1	<0.1	<1	<0.1	<1	<1	5.9
JN-6	钠长斑岩	0.116	0.086	0.2	0.2	<0.2	<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	14100
	矿石(16)			3.3	3.6	4.8	3.7	10.8	9.2	
25228	镍矿石	0.9	0.043		2.41	6.39	0.48	26.54	8.49	22.77
25462	镍矿石	1.472	0.046		2.33	6.37	0.47	2.55	2.54	12.59
25562	镍矿石	0.555	0.052		2.42	5.56	0.47	3.93	4.77	9.48
25629	镍矿石	1.216	0.052		2.25	5.95	0.64	38.69	17.52	27.95
25765	镍矿石	3.722	0.097		2.80	5.11	0.4	7.54	8.05	15.49
25772	镍矿石	1.523	0.049		2.66	9.22	0.59	2.42	6.43	72.11
26258	镍矿石	1.587	0.138		1.03	2.19	0.22	3.04	2.86	13.71
26553	镍矿石	1.453	0.06		3.04	7.42	0.52	19.67	14.22	19.59
A2746	镍矿石	2.032	0.042		2.31	6.71	0.78	27.42	4.11	19.62
JCK-1	镍矿石	0.43	0.013	1.0	0.6	2.0	0.4	6.0	3.0	6.3
JCK-2	镍矿石	1.05	0.018	2.0	1.0	1.0	0.2	<1.0	2.0	6.6
	金川超基性岩			1.5	0.8	0.6	0.3	17	12	30
Urals	纯橄榄岩(5)	0.108		2.0	3.74	-	1.34	58.8	5.28	12.66

注: ( ) 中数字为参加统计平均的样品数, J-及 JN-据冉红彦等, 1996; JCK-1, JCK-2, JCD-3 由国家地质实验中心测试; 其它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, 其中 Ru, Pt, Ir, Pd 为 ID-ICP-MS 法测定, Rh, Au 为内标法测定, 所用仪器为 Finnigan MAT ELEMENT 型高分辨率等离子体质谱仪, RSD 为 1.5% ~ 6.5%。金川超基性岩、Urals 纯橄榄岩分别据汤中立等, 1995; Garuti *et al.*, 1997。

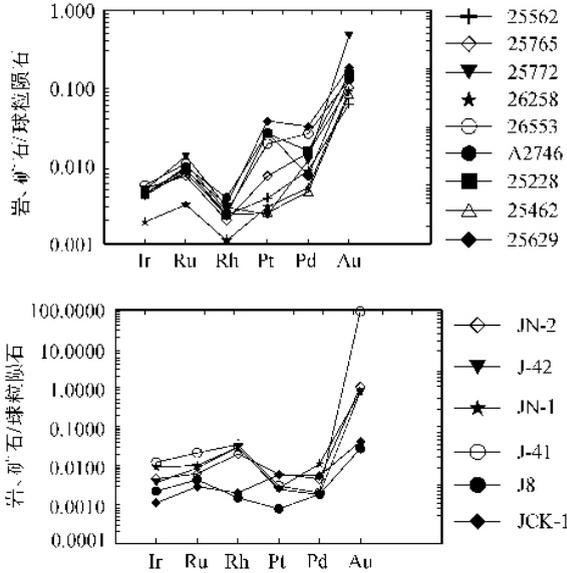


图2 煎茶岭镍矿床岩、矿石 PGE 及金球粒陨石标准化分布模式

(各样号所代表的岩、矿石性质见表1)

Fig. 2 Chondrite normalized PGE patterns of rock and ore from Jianchaling sulfide nickel deposit( See Table 1 for rock and ore description )

作用有关。另外,岩、矿石的铂族元素配分曲线均比较规整一致,可能反映煎茶岭岩体为一次侵入。煎茶岭镍矿床整体上铂族元素含量较低,其矿石铂族元素总量  $\Sigma\text{PGE}$ (除 Os 外)在  $9.34 \times 10^{-9} \sim 65.05 \times 10^{-9}$  之间变化,平均为  $31.28 \times 10^{-9}$ ,Pt 和 Pd 含量均小于  $0.01 \times 10^{-6}$ ,Os、Ir、Ru、Rh 含量更低微(表2),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,符合镁质超基性岩体中铜镍硫化物矿床铂族元素含量普遍较低的规律(梁有彬等,1998)。1件蛇纹岩中铂族元素总量  $\Sigma\text{PGE}$  为  $7.5 \times 10^{-9}$ ,滑镁岩中铂族元素总量  $\Sigma\text{PGE}$  在  $19.70 \times 10^{-9} \sim 22.00 \times 10^{-9}$  之间变化,平均为  $20.77 \times 10^{-9}$ ,小于矿石的平均值,反映铂族元素倾向在晚期岩浆中富集。

煎茶岭镍矿床蛇纹岩的 Au/Pd 值为 4.2,金川超基性岩为 2.50,Urals 纯橄榄岩为 2.40,煎茶岭蛇纹岩的 Au/Pd 值很高,且与金川超基性岩、Urals 纯橄榄岩的 Au/Pd 值比较接近,可能指示其原岩更类似于纯橄榄岩/橄榄岩。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。矿石的 Au/Pd 值在 1.38 ~ 11.21 范围内变化,个别较大达 11.21,似反映有后期热液的贡献。

表3 铂族元素特征参数对比

Table 3 The comparison of PGE characteristic parameter

	名称	Pt/Pd	Pd/Ir	(Pt + Pd)/(Os + Ir + Ru)
煎 茶 岭	蛇纹岩型镍矿石	4.03	3.23	1.71 ~ 2.5
	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	-
	蛇纹岩	<1	0.83	<0.38
	滑镁岩	1.92	0.85	0.62
	布什维尔德 MR 层矿石( Barnes <i>et al.</i> , 1985 )	2.44	20.67	9.29
	安大略科马提岩中的浸染状矿石( Barnes <i>et al.</i> , 1987 )	10.5	9.8	3.3
	阿尔卑斯型纯橄榄岩( Barnes <i>et al.</i> , 1985 )	4.05	0.49	0.68
	富硫化物拉斑玄武岩( Barnes <i>et al.</i> , 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 <i>et al.</i> , 1995 )	1.82	1.22	0.93
	CI 球粒陨石( McDonough <i>et al.</i> , 1995 )	1.84	1.21	0.94

该矿床蛇纹岩的 Cu/Pd 值为 1190,低于原始地幔岩浆的 Cu/Pd 值( Cu/Pd = 6500 ),说明岩石中存在富 Pd 硫化物,岩

浆熔离作用较弱,这是因为 Pd 的  $D_{\text{硫化物/硅酸盐}}$  远远超过 Cu 的相应值,如果发生充分的岩浆熔离作用,则由因硫化物熔离

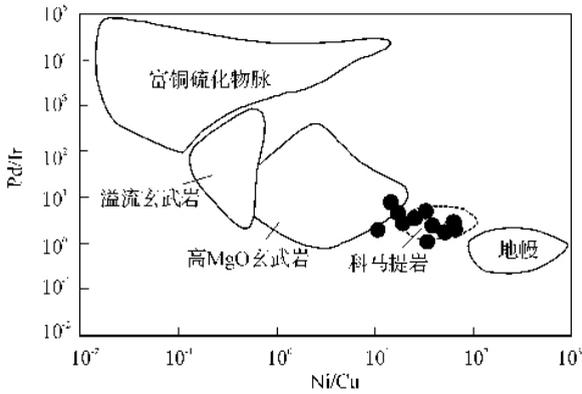


图3 煎茶岭硫化镍矿床矿石 Ni/Cu - Pd/Ir 图解  
(底图据 Chai *et al.*, 1992)

Fig. 3 The Ni/Cu - Pd/Ir diagram of Jianchaling sulfide nickel deposit  
(modified after Chai *et al.*, 1992)

过程而失去 Pd 的岩浆所结晶的岩石将具有高的 Cu/Pd 值 ( $>6500 \times$  Barnes *et al.*, 1993; Maier *et al.*, 1996)。矿石中金属硫化物的 PGE 含量接近或高于矿石的平均含量(王瑞廷 2003),亦证明 Pt、Pd 等铂族元素主要富集于硫化物中。

蛇纹岩、滑镁岩、透闪岩的铂族元素含量与镍矿石中的铂族元素含量接近,说明矿石中的铂族元素来源于该蚀变超基性岩体。前二者的 Pd/Ir 值(0.83、0.85)落于纯橄榄岩范围内(0.57 ~ 3.68) (Garuti *et al.*, 1997),其平均值为 0.84 (表 3),接近于阿尔卑斯型纯橄榄岩的该比值 (Pd/Ir = 0.49, Barnes *et al.*, 1985),指示其原岩更可能为纯橄榄岩,佐证了其属阿尔卑斯型岩体和原岩多为纯橄榄岩的认识。Pt/(Pt + Pd) 值和 (Pt + Pd)/(Os + Ir + Ru) 值是母岩浆分异程度的函数。与玄武岩有关的铜镍岩浆硫化物矿床中矿石的 (Pt + Pd)/(Os + Ir + Ru) 比值变化于 5.7 ~ 55.6 之间,而与科马提岩有关的铜镍岩浆硫化物矿床中矿石的 (Pt + Pd)/(Os + Ir + Ru) 比值变化于 1.3 ~ 3.5 之间 (Naldrett *et al.*, 1981)。煎茶岭镍矿床的 (Pt + Pd)/(Os + Ir + Ru) = 1.71 ~ 2.5,具有与科马提岩有关的铜镍岩浆硫化物矿床中矿石的 (Pt + Pd)/(Os + Ir + Ru) 比值特征,反映了其超镁铁质岩的性质。该矿床的 Pt/(Pt + Pd) = 0.27 ~ 0.63,显然该值高于与科马提岩有关的镍矿床 (0.1 ~ 0.3)、Sudbury 镍矿床 (0.45) 和与溢流玄武岩有关的镍矿床 (0.2) (汤中立等, 1995),可能指示其母岩浆的特殊性,即该镍矿床的原始岩浆成分为近似于科马提岩质的高 Mg 岩浆 (图 3)。

煎茶岭镍矿床矿体中 Pt、Pd、Ru  $>$  Os、Ir、Rh,与前人研究结论一致 (冉红彦等, 1996),这可能与围岩同化混染有关。煎茶岭镍矿床的 Pd/Ir 值 (3.23) 较低,这与其成因类型是对应的,即阿尔卑斯型岩体一般为钽族元素矿化,而由地幔熔体演化形成的岩体为钼族元素矿化。煎茶岭镍矿床、矿石的 PGE 表现出结晶分异趋势,与纯橄榄岩接近 (图 4),说明其熔离作用不发育。煎茶岭镍矿床产于类蛇纹岩中,不同于

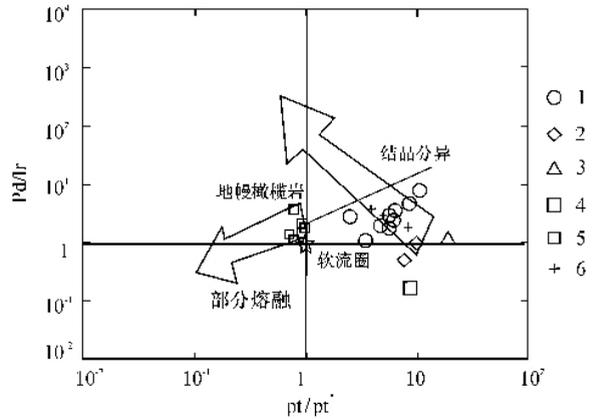


图4 结晶分异和部分熔融过程中的 PGE 分异趋势  
(1—煎茶岭含矿蛇纹岩; 2—滑镁岩; 3—透闪岩; 4—蚀变白云岩; 5—地幔橄榄岩; 6—纯橄榄岩; Pt\* 为 Pt 异常; 据 Garuti *et al.*, 1997 重绘 5、6 为原图数据)

Fig. 4 Differentiation trends of PGE in the crystal fractionation and partial melting (modified after Garuti *et al.*, 1997)

典型的岩浆熔离型矿床。一般科马提岩岩浆矿床的  $Cu/(Ni + Cu) = 0.04 \sim 0.06$ ;  $Pt/(Pt + Pd) = 0.36 \sim 0.38$ ;  $(Pt + Pd)/(Ru + Ir + Os) = 0.44 \sim 3.50$ ; 拉斑玄武岩岩浆矿床的  $Cu/(Ni + Cu) = 0.25 \sim 0.59$ ;  $Pt/(Pt + Pd) = 0.28 \sim 0.72$ ;  $(Pt + Pd)/(Ru + Ir + Os) = 5.7 \sim 55.60$  (Naldrett *et al.*, 1981; 汤中立等, 1995)。煎茶岭镍矿床却表现出过渡性质,其  $Cu/(Ni + Cu)$ 、 $(Pt + Pd)/(Ru + Ir + Os)$  特征值落于前一类矿床范围内,图 3 也表现出这一特征;而  $Pt/(Pt + Pd)$  特征值则落于后一类矿床范围内,可能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。煎茶岭镍矿床 Pt、Pd、IPGE 与 Ni、Cu 相关性不明显,这与其岩浆熔离作用弱, PGE 成矿作用不发育有关。

煎茶岭镍矿床矿石样品的  $^{187}Os/^{188}Os$  和  $Re/Os$  变化范围大,8 件矿石样品中,深部条带状矿石的  $Re/Os$  比值仅为 0.05,  $^{187}Os/^{188}Os$  为 0.1167; 块状矿石的  $Re/Os$  比值范围为 4.24 ~ 24.43,  $^{187}Os/^{188}Os$  为 0.438 ~ 1.853。而且,矿石样品  $^{187}Os/^{188}Os$  和  $1/Os$  总体呈显著的正相关 (图 5),说明成矿过程中有含高放射性成因 Os 的壳源物质的混染。 $Re-Os$  同位素研究还表明,煎茶岭超镁铁质岩浆可能来源于 Re 亏损地幔 (王瑞廷 2003)。

## 4 结论

通过对煎茶岭硫化镍矿床、矿石的铂族元素地球化学研究,进一步探讨了其成岩成矿机制,结论如下:

(1) 煎茶岭蛇纹岩的 Cu/Pd 值低于原生地幔岩浆的 Cu/Pd 值,表明岩石中存在富 Pd 硫化物,岩浆熔离作用较弱。

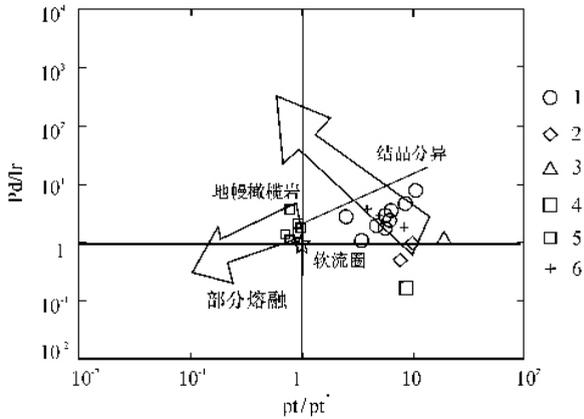


图5 煎茶岭镍矿床矿石 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} - 1/\text{Os}$ 图解

Fig. 5 The  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} - 1/\text{Os}$  diagram of Jianchaling sulfide nickel deposit

当然这不排除后期蚀变作用对 Pd 分配行为的影响。其 Au/Pd 值即反映存在后期变质热液成矿作用。

(2) 煎茶岭镍矿石的 Pd/Ir 比值在 1.08 ~ 7.72 之间变化, 均较小, 指示其多数矿石属于岩浆型, 虽然岩浆活动弱, 但以岩浆成矿作用为主。

(3) 煎茶岭硫化镍矿床的铂族元素特征参数(  $\text{Pt}/(\text{Pt} + \text{Pd})$ 、 $(\text{Pt} + \text{Pd})/(\text{Ru} + \text{Ir} + \text{Os})$ 、 $\text{Pd}/\text{Ir}$  及  $\text{Cu}/(\text{Ni} + \text{Cu})$  等) 具有过渡特征, 这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。

(4) 煎茶岭硫化镍矿床成矿过程中有壳源物质的混染, 整体上其岩、矿石铂族元素含量较低, 表明其岩浆熔离作用弱, PGE 成矿作用不发育。

致谢 在野外工作期间得到西北有色地质勘查局711 总队汪军谊、任文清、李福让、廖俊红和单祖祥等高级工程师的大力支持与帮助, 特此致谢。同时感谢《岩石学报》审稿人的审阅和所提的宝贵意见。

## References

Barnes S J, Naldrett A J, Gorton M P. 1985. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas. *Chem. Geol.*, 53 : 303 - 323

Barnes S J, Naldrett A J. 1987. Fractionation of the platinum-group elements and gold in some komatiites of the Abitibi greenstone belt, Northern Ontario. *Econ. Geol.*, 82(1) : 165 - 183

Barnes S J, Couture J F, Sawyer E W, Bouchaib C. 1993. Nickel-copper occurrences in the Belleterre-Angliers belt of the Pontiac subprovince and the use of Cu/Pd ratios in interpreting platinum-group element distributions. *Econ. Geol.*, 88 : 1402 - 1418

Chai G, Naldrett A J. 1992. Characteristics of Ni-Cu-PGE mineralization and genesis of the Jinchuan deposit, Northwest China. *Econ. Geol.*, 87 : 1475 - 1495

Chu X L, Sun M, Zhou M F. 2001. The platinum-group elements

geochemistry in chemical geodynamics. *Acta Petrologica Sinica*, 17 (1) : 112 - 122 (in Chinese with English abstract)

Fleet M E, Crocket J H, Stone W E. 1996. Partitioning of platinum-group-elements (Os, Ir, Ru, Pt, Pd) and gold between sulfide liquid and basalt melt. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60 : 2397 - 2412

Fleet M E, Stone W E. 1991. Partitioning of platinum-group elements in the Fe-Ni-S system and their fractionation in nature. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55 : 245 - 253

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. *Tectonophysics*, 276 : 181 - 194

Liang Y B, Liu T Y, Song G R. 1998. Platinum-group element deposits in China. 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 lherzolite massifs of Ariège (Northeastern Pyrenees, France). *Earth Planet. Sci. Lett.*, 93 : 50 - 64

Luo H B, Qiao D W. 1993. Geological setting and genesis of major nickel-bearing rock bodies in China. *Acta petrologica et mineralogica*, 12(4) : 312 - 324 (in Chinese with English abstract)

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. *Econ. Geol.*, 91 : 1151 - 1158

McDonough W F, Sun S-S. 1995. The composition of the earth. *Chem. Geol.*, 120 : 223 - 253

Naldrett A J, Duke M. 1980. Platinum metals in magmatic sulfide ores. *Science*, 208 : 1417 - 1424

Naldrett A J. 1981. Nickel sulfides deposits: classification, composition, and genesis. *Econ. Geol.*, 6 : 28 - 85

Naldrett A J, Asia M, Krstic S, et al. The composition of mineralization at the voisey's Bay Ni-Cu sulfide deposit, with special reference to Platinum-group elements. *Econ. Geol.*, 2000, 95(4) : 845 - 865

Pang C Y, Chen M Y. 1993. Isotopic geochronological data and their geological significance in Jianchaling region, Shanxi province. *Mineral Resource and Geology*, 7(5) : 354 - 360 (in Chinese with English abstract)

Qi L, Hu J. 1999. Rapidly analyzing trace platinum-group-elements (PGEs) and gold of geological samples by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) method. *Rocks and Minerals Testing*, 18(4) : 267 - 270 (in Chinese with English abstract)

Ran H Y, Huang W K, Gan X P, Shan Z X, Tao M, Liu Y. 1996. The noble elements in the gold deposits related to altered ultrabasic rock massives. *Geochemica*, 25(5) : 520 - 528 (in Chinese with English abstract)

Ren X H. 1990. The ore-forming geological characteristics of Jianchaling nickel deposit. In: Wang Xiang, Wang Dong sheng, ed. Major types of metal mineralization and discuss on ore-forming perspective of superlarge deposits in Mianlueyang volcanic rocks belt, Shanxi province. 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. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55(8) : 2083 - 2110

Shi Z Y, Luo C Y, Yang H Q. 1992. Rock type and fabric feature of main nickel-bearing rock bodies (belt) in China. *Northwest Geoscience*, 13(1) : 1 - 16 (in Chinese with English abstract)

Tang Z L, Li W Y. 1995. The metallogenic model and geological comparison for Jinchuan nickel-copper sulfide (platinum-bearing)

- deposit, Gansu province, China. Beijing: Geological Publishing House, 14-209 (in Chinese)
- Wang P A, Chen Y C, Pei R F, Wu G G. 1998. Regional minerogenetic series, tectono- minerogenic cycles and evolution in the Qinling orogenic belt, China. Beijing: Geological Publishing House, 12-31 (in Chinese)
- Wang R T, He Y, Wang X. 2000. Probe into the metallogenic mechanism of Jianchaling large gold ore deposit. Northwest Geoscience, 21(1): 19-26 (in Chinese with English abstract)
- Wang R T, He Y, Wang D S, Liu M W. 2003. Re-Os Isotope Age and its Application of Jianchaling Nickel-Copper Sulfide Deposit, Lueyang, Shanxi Province, China. Geological Review, 49(2): 205-211 (in Chinese with English abstract)
- Wang X, Tang R Y, Li S, Li Y X, Yang M J, Wang D S. 1996. Qinling orogeny and metallogenesis. Beijing: Metallurgical industry Press, 272-300 (in Chinese with English abstract)
- Zhang G W, Zhang B R, Yuan X C, Xiao Q H. 2001. Qinling orogenic belt and continental dynamics. Beijing: Science Press, 467-473 (in Chinese with English abstract)
- 庞春勇 陈民扬. 1993. 煎茶岭地区同位素地质年龄数据及其地质意义. 矿产与地质, 7(5): 354-360
- 漆亮 胡静. 1999. 等离子体质谱快速测定地质样品中的痕量铂族元素和金. 岩矿测试, 18(4): 267-270
- 冉红彦 黄婉康 甘先平 单祖翔 陶密 刘雁. 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. 地球化学, 25(5): 520-528
- 任小华. 1990. 煎茶岭镍矿床成矿地质特征. 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. 兰州: 兰州大学出版社, 115-123
- 师占义 洛长义 杨合群. 中国主要含镍岩体(带)岩石类型与组构特征. 西北地质科学, 1992, 13(1): 1-16
- 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. 北京: 地质出版社, 14-209
- 王平安 陈毓川 裴荣富 吴淦国. 1998. 秦岭造山带区域矿床成矿系列、构造-成矿旋回与演化. 北京: 地质出版社, 12-31
- 王瑞廷 赫英 王新. 2000. 煎茶岭大型金矿床成矿机理探讨. 西北地质科学, 21(1): 19-26
- 王瑞廷 赫英 王东生 刘民武. 2003. 略阳煎茶岭铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素年龄及其地质意义. 地质论评, 49(2): 205-211
- 王相 唐荣扬 李实 李永祥 杨铭君 王东生. 1996. 秦岭造山与金属成矿. 北京: 冶金工业出版社, 272-300
- 张国伟 张本仁 袁学城 肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 702-705

#### 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. 岩石学报, 17(1): 112-122
- 梁有彬 刘同有 宋国仁. 1998. 中国铂族元素矿床. 北京: 冶金工业出版社, 1-18
- 骆华宝 乔德武. 1993. 中国主要含镍岩体特征及其成因. 岩石矿物学杂志, 12(4): 312-324