

金川铜镍硫化物矿床岩浆通道型 矿体地质地球化学特征

田毓龙¹⁾, 包国忠¹⁾, 汤中立²⁾, 王玉山¹⁾

1) 金川集团有限公司, 甘肃金昌, 737102; 2) 长安大学国土资源学院, 西安, 710054

内容提要:金川铜镍硫化物矿床6行富铜(铂族)矿体曾因Cu、Pt、Pd等含量明显高于相邻其他矿体而被认为是岩浆期后热液叠加作用的产物, 研究发现, 空间上该矿体受断层构造控制, 在矿石组构、矿物组成和硫同位素组成方面与相邻岩浆熔离型1号矿体一致, 显示了该矿体岩浆成矿作用的特征。在元素地球化学方面, 6行富铜(铂族)矿体的Cu、Ni、Pt、Pd含量及Cu/Ni值明显高于1号主矿体, 而Os、Ir、Rh、Ru却明显低于后者, 同时, 前者相对富含LREE, 轻、重稀土分异程度高于后者。根据硫化物结晶分异过程中金属元素分配规律及稀土元素特征, 阐明了6行富铜(铂族)矿体为岩浆通道型矿体, 是岩浆硫化物晚期结晶的产物。矿区中西部存在的Cu、Ni、Pt、Pd、Au等含量高, 而Os、Ir、Rh、Ru含量低的部位, 是寻找岩浆通道型矿体的有利部位。

关键词: 金川矿床; 岩浆通道; 硫化物结晶分异; 找矿

随着对加拿大Voisey's Bay硫化铜镍矿床形成机制的不断认识, 岩浆熔离型矿床的岩浆通道及岩浆通道型矿体引起不少学者的研究兴趣(Li et al., 2001)。中国金川铜镍硫化物矿床是基性—超基性岩浆深部熔离贯入形成的超大型岩浆矿床(甘肃省地质矿产局第六地质队, 1984; 汤中立等, 1995), 也有学者曾对金川矿床存在岩浆通道进行了论述和推测(Chai & Naldrett, 1992; 宋谢炎等, 2005)。

在金川矿床1号矿体西端发现的6行富铜(铂)矿体与1号矿体在成矿元素含量方面有较大差异。6行富铜(铂)矿体相对1号矿体富含Ni、Cu、Pt、Pd、Au等元素, 而Os、Ir、Rh、Ru等含量较低, 其Ni含量约是后者的1.3倍, Cu含量约是后者的3倍, Cu/Ni含量比值达到1~2, 而1号矿体的Cu/Ni值约为0.5~1。有研究者认为6行富铜(铂)矿体矿石破碎, 部分含矿超基性岩蛇纹石化、滑石化蚀变强烈, 而Cu、Pt、Pd都具有随热液活化的特点, 因此认为6行富铜(铂)矿体是岩浆期后热液叠加改造作用的产物。本文通过对6行富铜(铂)矿体与1号矿体地质和地球化学特征的对比, 揭示两者都是含矿岩浆熔离结晶的产物, 但6行富铜(铂)矿体空间上与构造有着密切关系, 其分异程度高于相邻矿体, 硫化物结晶固化晚于相邻矿体, 显示了岩浆通道型矿体

特征; 对金川矿区的元素含量变化研究, 确定矿区中西部存在的Cu、Ni、Pt、Pd、Au含量高, 而Os、Ir、Rh、Ru含量低的部位, 是寻找岩浆通道型矿体的有利部位。

1 金川铜镍矿床地质概况

金川含矿超基性岩体产于华北地台阿拉善地块西南缘龙首山隆起带的东南端北侧, 走向N50°W, 倾向SW, 倾角50°~80°。岩体小角度不整合侵入于古元古界白家嘴子组混合岩和大理岩之间, 长约6500 m, 平均宽约300 m, 倾向最大延深1000余米未尖灭。金川硫化铜镍矿床几乎全部产于岩体内。矿区内节理、断层发育, 主要断层有F₁、F₈、F₁₇、F₂₃、F₁₆和F₁₆₋₁等(图1)。

汤中立等(1995)在前甘肃地质矿产局六队勘探资料基础上对金川含矿岩体进行了系统研究, 提出金川岩体是同一含矿岩浆分异后分4期侵入形成的复式侵入体, 其第一期中细粒含二辉橄榄岩和橄榄二辉岩, 产有就地熔离形成的星点状、局部海绵状贫矿, 规模很小; 第二期中粗粒含二辉橄榄岩和二辉橄榄岩占金川岩体体积约67.7%, 分布于整个矿区, 产有规模较大的以星点浸染状矿石为主的透镜状、板状和似层状贫矿体; 第三期中粒硫化物纯橄岩相,

注: 本文为“十一五”国家科技支撑计划项目“金川铜镍矿深部及外围综合勘查技术示范研究”(编号2006BAB01B08)资助成果。

收稿日期: 2009-06-27; 改回日期: 2009-09-25; 责任编辑: 周健。

作者简介: 田毓龙, 男, 1970年生。教授级高级工程师, 从事金属矿床研究。Email: tian0721@yahoo.com.cn。

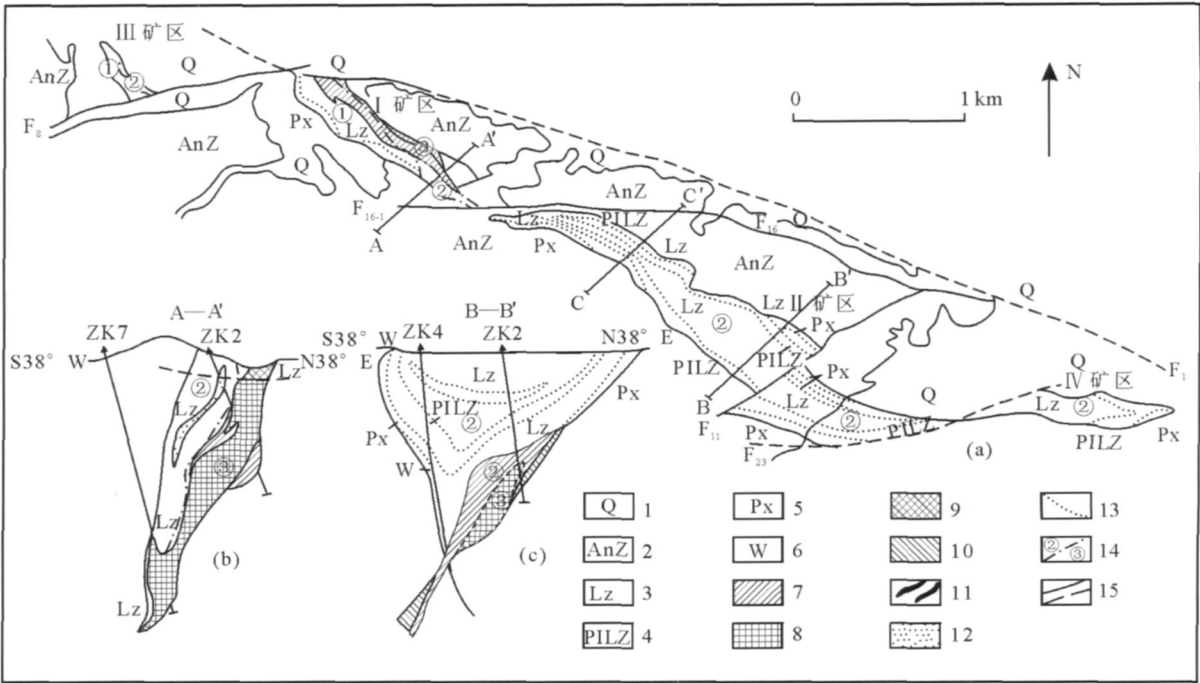


图 1 金川超基性岩体及矿体平面(a)及剖面(b,c)地质图(据汤中立等,1995)

Fig. 1 Geological map of ultramafic intrusion and the plan (a) and sections (b,c) of the orebodies of Jinchuan
1—第四系;2—前寒武系;3—二辉橄榄岩;4—斜长二辉橄榄岩;5—橄榄二辉岩;6—二辉岩;7—浸染状矿石;8—海绵状富矿;9—氧化矿石;10—交代型矿石;11—块状硫化矿石;12—悬挂式浸染状矿石;13—岩浆岩岩相接触界线;14—不同阶段岩相接触界线;15—断层
1—Quaternary; 2—Precambrian; 3—herzolite; 4—plagioclase herzolite; 5—olivine websterite; 6—websterite; 7—disseminated ore; 8—net-textured ore; 9—oxidized ore; 10—altered ore; 11—massive sulfide; 12—hanging disseminated ore; 13—igneous rock facies boundary; 14—different stage facies boundary; 15—faults

产有海绵陨铁状矿石为主的富矿石;第四期是指晚期硫化物矿浆沿岩体原生构造裂隙和其他构造裂隙贯入形成的块状金属硫化物矿石。其中,第二、三期侵入相中产出的浸染状贫矿、海绵陨铁状富矿构成了金川的主矿体。铂族元素的研究证明金川矿床是二次熔离的硫化物聚集—再次侵位的结果,致密块状矿石和稠密浸染状矿石还经历了硫化物熔浆的结晶分异(Song et al. , 2006 , 2009)。

2 6行富铜(铂族)矿体特征及与1号矿体的对比

2.1 6行富铜(铂族)矿体产出特征

6行富铜(铂族)矿体产于金川矿区中段的二矿区1号矿体含矿岩体西端北侧,二者在深部以断层破碎带接触,接触部位的超基性岩有明显蚀变。北侧为F₁₆断层相截,东侧与白家咀子组片麻岩、大理岩等呈侵入接触关系(图2)。

6行富铜(铂族)矿体总体位于1号矿(岩)体下盘,平面上东起 矿区5+20行,西至 矿区8+15行;剖面上主要分布在1400~1130 m水平之间,向

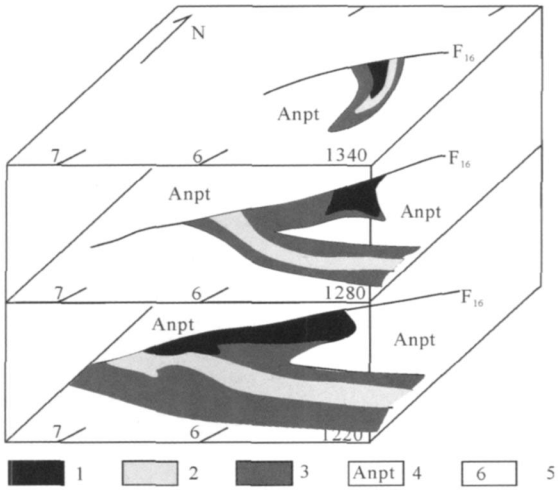


图 2 6行富铜矿体立体透视示意图
Fig. 2 Three-dimensional sketch of Line-6 copper-rich orebody

1—富铜矿体;2—正常矿体;3—超基性岩;
4—前元古宙地层;5—勘探线编号
1—Line-6 copper-rich orebody; 2—No. 1 orebody; 3—ultrabasic rock; 4—Pre-Preterozoic strata; 5—exploration lines

下逐步尖灭。

矿体形态呈透镜状、囊状,走向总体为南北向,倾向西,倾角 70°左右,平均厚度为 32 m。矿体受构造应力作用强烈,矿石十分破碎,由大小不等的透镜体构成,片理化发育。整个矿体几乎全由富矿组成,Ni、Cu 含量相对其他矿体较高,而 Cu 含量相对 Ni 高,Ni 平均品位 1.81%,Cu 平均品位 2.43%,且伴生 Pt、Pd、Au、Ag 等元素含量明显高于周围其他矿体。

不少研究者认为 6 行富铜矿体的形成是由后期热液作用形成的(黄满湘,2005)。而热液成因的观点却不能很好地解释以下现象:

(1) 6 行富铜(铂族)矿体具有一定规模,矿体长约 70 m,垂向延伸约 270 m,热液作用要形成如此规模的矿体,应有明显的热液活动痕迹,而矿体中

并没有发现较大的脉状矿化,且脉状矿化不发育。

(2) 矿石的构造类型仍以海绵陨铁状和变海绵陨铁状构造为主,与岩浆熔离型的 1 号矿体一致,且铜、镍、铂族在矿体范围内的分布比较均匀,非热液矿化的特点。

(3) 限制岩体边界的断裂构造是热液活动的理想通道,而在断裂中未见矿化加强或热液活动迹象增多的现象。

2.2 6 行富铜(铂族)矿体与 1 号矿体的地质特征对比

主要从矿体空间分布及规模、含矿岩石及蚀变、矿石类型、矿石结构构造、矿物组合、主要元素及伴生元素、脉岩及围岩、矿化特征等方面,将 6 行富铜矿体与 1 号矿体进行了对比(表 1)。

表 1 6 行富铜(铂族)矿体与 1 号矿体主要地质特征对比

Table 1 The geology comparation between Line-6 copper(PGE)-rich orebody and No.1 orebody								
矿体	矿体空间分布及规模	含矿岩石及蚀变	矿石类型	矿石结构构造	主要金属矿物	主要有益、伴生、有害元素	脉岩及围岩	矿化特征
6 行富铜矿体	呈透镜状产出,沿走向长 170 m,倾向延伸约 300 m,最大厚度在 40 m,规模较小	含矿岩相为含辉橄榄岩和滑石菱镁岩。含辉橄榄岩蛇纹石、绿泥石、透闪石化;滑石菱镁岩主要由菱镁矿、滑石、金云母组成,岩体强度低。滑石菱镁岩和含辉橄榄岩相间出现	以超基性岩型硫化镍富矿为主,主要分布在矿体上盘和底部,而贫矿仅分布矿体上部南端和矿体下盘	矿石主要为变海绵陨铁状、局部海绵陨铁状、斑杂状矿石构造,以自形—他形粒状结构为主,还有乳滴状、火焰状、格子状、叶片状等固熔体分离结构	磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿为主,有少量方黄铜矿、墨铜矿。贵金属矿物相对较多,主要有碲银矿、碲铂矿、银金矿等	主要组分 Ni、Cu;主要伴生组分:Pt、Pd、Os、Rh、Ru、Ir、Au、Ag、Co、Se、Te、S、Cr、Ge、In、Ta,有害组分(As、P、F、Zn、MgO 等)的含量均不高,Pt、Pd、Au、Ag、Se、Te 等含量明显高于其他矿体	花岗斑岩、煌斑岩等脉岩主要产于矿体上盘,围岩有片麻岩、斜长角闪岩、大理岩等	矿化总体均匀,矿石中铜含量显著高于镍,Cu/Ni 值约为 1.74~1;富含 Au、Ag、Pt、Pd 等元素
1 号矿体	金川矿床最大的矿体,占全区总储量的 76.45%。分布于 I 矿区 4 行至 I 矿区 28 行间,最大平均厚度 98 m,其中富矿长 1300 m,厚 69 m,矿体呈“似层状”产出。	以含辉橄榄岩相为核心,向外侧为二辉橄榄岩、橄榄辉石岩、斜长二辉橄榄岩、辉石岩、蛇纹石透闪石、绿泥石片岩。富矿体主要赋存在含辉橄榄岩相中,贫矿赋存于二辉橄榄岩相中	超基性岩型硫化镍富矿(SN-A1)、超基性岩型硫化镍贫矿(SN-A2)、超基性岩型硫化镍表外矿(SN-B)。矿体的中心为富矿,边部为贫矿,贫矿体较小	矿石构造主要为海绵陨铁状,局部为半海绵陨铁状或星点状;以自形—他形粒状结构(中粗粒结构)和不等粒结构为主,也有交代熔蚀作用形成的网状结构	呈半自形—他形晶结构或乳浊状、火焰状、格子状、叶片状等固熔体分离结构;磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿,少量方黄铜矿和黄铜矿	主要组分 Ni、Cu;主要伴生组分:Pt、Pd、Os、Rh、Ru、Ir、Au、Ag、Co、Se、Te、S、Cr、Ge、In、Ta,有害组分(As、P、F、Zn、MgO 等)的含量均不高	矿体中常见闪长斑岩、细粒闪长岩、闪斜煌斑岩、辉绿岩等多种中—基性脉岩夹石,呈透镜体状产出于矿体中或边部,围岩主要有大理岩、条带状混合岩以及少量二辉橄榄岩、蛇纹石透闪石、绿泥片岩	沿走向、垂向矿化均一,Cu 含量沿走向自东向西、垂向由上而下有增高趋势。总体镍含量高于铜,局部铜高于镍,如 II 矿区 8~12 行

对比结果显示,两个矿体除在矿体规模、形态、富矿的空间分布及 Cu、Ni、PGE 含量有差异外,其他方面基本相似,两者在地质特征方面的相似性暗示了成矿作用的一致性,即属于含矿岩浆熔离成矿的。

2.3 6 行富铜(铂族)矿体与 1 号矿体的地球化学对比

主要从铂族元素、稀土元素和硫同位素等方面将 6 行富铜矿体与 1 号矿体进行了比较。

在 6 行富铜(铂族)矿体选择了一条代表性穿脉,自东而西按 2 m 长度进行了连续取样;在二矿区 1 号矿体同样选择一条代表性穿脉,自上盘向下盘方向按 2 m 长进行取样。由于样品太多,所以,考虑不同岩相、不同矿化类型等因素在上述两矿体取样中各抽取部分样品,委托云南省地质矿产勘查开发局中心实验室对铂族和稀土元素进行分析,结果见表 2、3。

表 2 6 行富铜矿体与 1 号主矿体 PGE 含量
Table 2 The platinum group element content of Line-6 copper-rich orebody and No. 1 orebody

序号	样号	Pt ($\times 10^{-6}$)	Pd ($\times 10^{-6}$)	Os	Ru ($\times 10^{-9}$)	Rh ($\times 10^{-9}$)	Ir	采 样 位 置	
1	TAS0412	0.14	0.54	61.2	59.2	5.18	5.00		0 ~ 2 m
2	TAS0414	0.05	0.64	22.1	13.8	4.24	4.40		4 ~ 6 m
3	TAS0416	8.25	0.26	27.4	20.4	7.95	9.11		8 ~ 9 m
4	TAS0418	0.28	0.68	0.62	0.35	0.30	0.10	首矿 906B 1203 m 水平分层道的 6B 矿体由东向西 取样,起点通风井东壁	13 ~ 15 m
5	TAS0420	0.21	0.44	1.70	0.98	0.80	0.89		17 ~ 19 m
6	TAS0422	0.20	0.60	0.78	0.76	0.46	0.67		21 ~ 23 m
7	TAS0424	2.34	0.42	0.86	0.68	0.60	1.20		25 ~ 27 m
8	TAS0426	0.73	0.46	0.80	0.50	0.84	0.50		29 ~ 31 m
9	-TAS0401	0.012	0.16	76.0	80.9	9.12	30.0		0 ~ 2 m
10	-TAS0404	1.45	0.28	87.4	99.6	19.8	50.0		6 ~ 8 m
11	-TAS0407	0.034	0.09	109	112	11.5	40.0	二矿区 1118 m 水平 2 盘区 5 分层穿脉道,自上盘向 下盘取样,起点为中点 B 向上盘方向 5 m 位置	13 ~ 15 m
12	-TAS0410	0.17	0.10	79.0	88.7	7.60	21.6		19 ~ 21 m
13	-TAS0413	0.036	0.17	70.8	74.7	8.92	23.9		25 ~ 27 m
14	-TAS0415	0.40	0.10	34.1	35.0	10.7	33.0		29 ~ 31 m
15	-TAS0416	0.13	0.26	31.8	26.0	5.24	5.79		1 ~ 2 m
16	-TAS0419	0.39	0.09	88.2	93.0	15.9	40.0		6 ~ 8 m
17	-TAS0422	0.59	0.37	65.4	71.0	17.8	45.0	二矿区 1118 m 水平 2 盘区 5 分层穿脉道,自上盘向 下盘取样,起点为中点 D	12 ~ 14 m
18	-TAS0425	0.094	0.067	77.0	78.6	9.43	9.78		18 ~ 21 m
19	-TAS0428	0.27	0.18	25.2	22.0	8.45	18.9		32 ~ 34 m
20	-TAS0430	0.034	0.12	12.7	10.4	3.74	8.40		36 ~ 38 m
21	-TAS0433	0.068	0.060	12.0	10.5	2.90	4.20		42 ~ 44 m

注:序号 1~8 样品取自 6 行富铜矿体,序号 9~21 样品取自 1 号矿体。分析单位:云南省地质矿产勘查开发局中心实验室。

2.3.1 铂族元素特征

铂族元素 Pt、Pd、Os、Ir、Ru、Rh 等不仅是镁铁质—超镁铁质岩类重要的成矿元素,而且,由于其对岩浆演化物理化学条件变化的敏感性也被越来越多的学者用作指示地质过程特征的示踪剂。

Francis(1990)、Fleet 等(1991,1999)曾对铂族等元素在液态硫化物—硅酸盐间的分配系数进行了研究,Fleet 等(1993)、Barnes 等(1999)对铂族元素在单硫化物—液态硫化物间的分配系数进行了研究,结果见表 4 和表 5。

从表 4 可见,铂族元素在液态硫化物—硅酸盐间的分配系数明显高 Ni、Cu 一个数量级;而对于 Ni、Cu 而言,Cu 在液态硫化物—硅酸盐间的分配系数为 913~1383,显著地大于 Ni 的 315~836;而 Pt、

Pd 相对于 Os、I、Ru 等元素在液态硫化物—硅酸盐间的分配系数也较高。上述表明,铂族元素相对 Ni、Cu 更易于从液态硅酸盐中进入液态硫化物中,其中 Pt、Pd 相对于 Os、I、Ru 在液态硫化物中的富集能力更强;而对于 Cu、Ni,Cu 比 Ni 更易自液态硅酸盐进入液态硫化物中而产生富集。

另外,Sattari P(2002)实验结果也表明,铂族金属在硫化物熔体与硅酸盐熔体的平衡系统中的分配系数(D)多在 $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^6$ 之间,所以有强烈在硫化物熔体中富集的趋势。各铂族金属分配系数大小的排序: Pd > Rh > Pt > Ru > Os > Ir(转引苏尚国等,2006)。

从表 5 可见,在硫饱和条件下,铂族元素在单硫化物固溶体/硫化物熔体中分配系数为: D(Ir) = 3.4

~ 11, $D(\text{Os}) = 4.3$, $D(\text{Ru}) = 4.2$, $D(\text{Rh}) = 1.17 \sim 3.03$, $D(\text{Pt}) = 0.05 \sim 0.2$, $D(\text{Pd}) = 0.09 \sim 0.2$, 各铂族元素分配系数大小的顺序为: $\text{Ir} > \text{Os} > \text{Ru} > \text{Rh} \gg \text{Pt} \sim \text{Pd}$ 。也就是说,在硫饱和条件下, Os 、 Ir 、 Ru 、 Rh 优先进入单硫化物固溶体,而 Pt 、 Pd 优先保留于残留硫化物熔体中。一般在贫硫条件下,各铂族元素在单硫化物固溶体/硫化物熔体中分配系数比硫饱和条件下略低。

表 3 6 号富铜(铂族)矿体与 1 号矿体稀土元素含量($\times 10^{-6}$)
Table 3 The rare earth element content ($\times 10^{-6}$) of Line-6 copper(PGE)-rich orebody and No.1 orebody

序号	样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	REE	LREE		Eu	Ce
1	TAS0412	2.74	4.11	0.41	2.13	0.41	0.13	0.45	0.085	0.38	0.078	0.23	0.034	0.23	0.029	1.50	12.946	3.292	0.921	0.821	
2	TAS0414	1.86	2.68	0.17	0.69	0.23	0.10	0.25	0.049	0.23	0.054	0.18	0.024	0.16	0.026	1.02	7.723	2.875	1.268	0.888	
3	TAS0416	1.47	1.92	0.14	0.68	0.18	0.042	0.12	0.023	0.16	0.043	0.13	0.014	0.13	0.015	3.01	8.077	1.216	0.824	0.798	
4	TAS0418	1.79	2.77	0.24	1.04	0.34	0.11	0.42	0.071	0.30	0.067	0.18	0.021	0.16	0.030	1.20	8.739	2.568	0.889	0.873	
5	TAS0420	1.24	2.15	0.21	0.72	0.23	0.078	0.29	0.045	0.23	0.060	0.18	0.022	0.14	0.013	12.5	18.108	0.343	0.923	0.915	
6	TAS0422	5.46	8.60	0.94	4.24	0.89	0.19	0.68	0.110	0.59	0.092	0.22	0.038	0.27	0.045	9.33	31.695	1.786	0.719	0.827	
7	TAS0424	4.24	4.39	0.41	1.42	0.49	0.069	0.45	0.057	0.29	0.050	0.11	0.016	0.16	0.019	1.12	13.291	4.850	0.442	0.631	
8	TAS0426	2.60	3.10	0.28	0.70	0.21	0.074	0.31	0.057	0.31	0.057	0.16	0.024	0.15	0.030	1.16	9.222	3.084	0.885	0.710	
9	-TAS0401	3.20	3.44	0.22	0.74	0.23	0.12	0.39	0.057	0.40	0.110	0.26	0.040	0.28	0.039	13.0	22.526	0.545	1.215	0.696	
10	-TAS0404	1.90	2.95	0.28	1.13	0.34	0.14	0.45	0.060	0.44	0.087	0.21	0.032	0.24	0.039	2.41	10.708	1.699	1.094	0.854	
11	-TAS0407	1.66	1.92	0.21	0.67	0.23	0.094	0.21	0.028	0.19	0.035	0.09	0.016	0.15	0.018	1.06	6.583	2.659	1.285	0.663	
12	-TAS0410	2.35	3.32	0.41	2.19	0.37	0.094	0.34	0.057	0.36	0.043	0.11	0.016	0.18	0.028	3.39	13.258	1.931	0.797	0.738	
13	-TAS0413	1.28	2.44	0.28	1.05	0.28	0.086	0.33	0.046	0.26	0.070	0.16	0.024	0.16	0.019	3.87	10.355	1.097	0.863	0.922	
14	-TAS0415	13.6	22.2	2.97	14.2	2.58	0.73	2.96	0.510	3.28	0.650	1.95	0.240	1.30	0.19	13.8	81.160	2.262	0.805	0.790	
15	-TAS0416	2.31	3.02	0.34	1.00	0.23	0.097	0.35	0.057	0.32	0.069	0.20	0.028	0.16	0.020	1.18	9.381	2.935	1.042	0.719	
16	-TAS0419	1.61	2.63	0.25	0.82	0.23	0.058	0.33	0.057	0.37	0.069	0.19	0.028	0.19	0.024	1.54	8.396	2.001	0.643	0.885	
17	-TAS0422	1.91	2.76	0.24	1.27	0.35	0.093	0.45	0.057	0.38	0.087	0.26	0.040	0.18	0.019	4.82	12.916	1.052	0.716	0.829	
18	-TAS0425	2.86	3.26	0.40	1.74	0.52	0.10	0.46	0.071	0.42	0.085	0.20	0.032	0.21	0.030	1.94	12.328	2.575	0.612	0.636	
19	-TAS0428	4.61	5.45	0.55	2.31	0.73	0.14	0.49	0.085	0.50	0.078	0.23	0.036	0.24	0.033	4.19	19.672	2.344	0.676	0.687	
20	-TAS0430	5.67	6.67	0.48	2.25	0.50	0.14	0.57	0.085	0.48	0.088	0.33	0.034	0.29	0.045	4.85	22.482	2.320	0.799	0.735	
21	-TAS0433	3.99	5.89	0.55	2.64	0.52	0.17	0.59	0.110	0.72	0.110	0.34	0.048	0.32	0.053	3.06	19.111	2.571	0.935	0.827	

注:序号 1~8 样品采自 6 行富铜矿体,序号 9~21 样品采自 1 号矿体。分析单位:云南省地质矿产勘查开发局中心实验室。

表 4 金属元素在液态硫化物—硅酸盐间的分配系数
Table 4 Partition coefficient of metals between sulfide liquid and silicate melts

Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	Au	Ni	Cu	资料来源
							315	913	Francis(1990)
							424	1006	Francis(1990)
					23000	15000~18000	575~836	1383	Peach 等(1990)
3700	3200	4400		4600	5000	3000			Fleet 等(1991)
10000	51000	3500		13000	25000	1200			Fleet 等(1999)

表 5 金属元素在单硫化物—液态硫化物间的分配系数
Table 5 Partition coefficient of metals between Mss and sulfide liquid

Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	Au	Ni	Cu	资料
4.3	3.6	4.2	3.03	0.2	0.2	0.09	0.84	0.27	Fleet 等(1993)
	3.4~11		1.17	0.05	0.09		0.36	0.2	Barnes 等(1999)

分析 6 行富铜矿体及 1 号矿体矿石 PGE 含量并标准化后,绘制了分布曲线(图 3)。

对比两个矿体矿石的 PGE 分布曲线可以看出以下特征:

(1) 6 行富铜矿体 Pt 、 Pd 含量明显高于 1 号矿体,而 Os 、 Ir 、 Ru 、 Rh 的含量明显低于 1 号矿体。

(2) 6 行富铜矿体靠近东侧的 3 件样品(TAS0416、TAS0414、TAS0412)的铂族元素含量

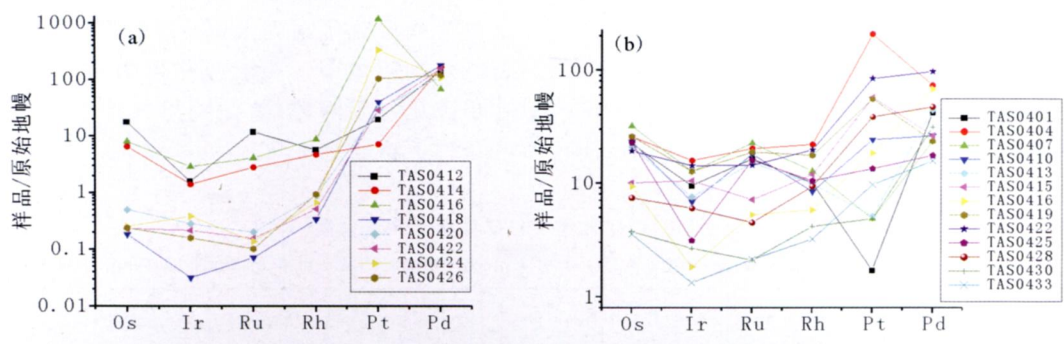


图 3 6 行富铜矿体及 1 号矿体矿石 PGE 曲线
Fig. 3 PGE curves of Line-6 copper-rich orebody and No. 1 orebody
(a) —6 行富铜矿体样品; (b) —1 号矿体样品
(a) —The samples from Line-6 copper-rich orebody; (b) —the samples from No. 1 orebody

与 1 号矿体的接近, Os、Ir、Ru、Rh 4 个元素的含量明显高于 6 行富铜矿体中其他样品的含量。

(3) 6 行富铜矿体东侧 3 件样品 (TAS0416、TAS0414、TAS0412) 中除 TAS0416 外, 另两件样品的 Pt、Pd (尤其 Pt) 含量低于该矿体中的其他样品。

6 行富铜矿体部分样品的铂族元素特征与 矿区 1 号矿体相似的元素分布曲线特征, 指示二者可能是同源、同演化阶段的产物。

根据铂族元素在液态硫化物—硅酸盐间以及在单硫化物固溶体—硫化物熔体间的分配系数特征, 随着液态硫化物中单硫化物的晶出, Pt、Pb 在残存的液态硫化物中越来越富集, 而 Os、Ir、Ru、Rh 随着硫化物结晶分异的进行选择进入单硫化物固溶体, 在残存液态硫化物中的含量逐步降低。6 行富铜矿体相对 1 号矿体高 Pt、Pd 含量、低 Os、Ir、Ru、Rh 含量的特征显示, 两矿体间存在硫化物分异的差异, 6

行富铜矿体所包含的残存液态硫化物时间较长, 而 1 号矿体相对前者总体结晶较早。

2.3.2 稀土元素特征

对 6 行富铜 (铂族) 矿体和 1 号矿体的样品稀土元素标准化后, 绘制了标准稀土配分曲线 (图 4), 并对比了两者的稀土特征值。可见如下主要特征:

(1) 6 行富铜矿体的 REE 最小 7.72, 最大 31.70, 平均 13.73, LREE/HREE 的平均值为 2.5; 1 号矿体除去 1 件样品 (TAS0415) 的稀土总量异常偏高 (81.16×10^{-6}) 外, REE 最小 6.58, 最大 22.53, 平均 13.98, LREE/HREE 平均值为 2.0。两个矿体的稀土总量差异不大, 配分曲线都显示右倾的轻稀土富集型特征, 6 行富铜矿体的轻、重稀土的分异较 1 号矿体略显著。

(2) 6 行富铜矿体的 Eu 最小 0.44, 最大 1.27, 平均 0.86; 1 号矿体的 Eu 最小 0.61, 最大 1.29, 平均 0.88; 6 行富铜矿体的 Ce 最小 0.63, 最大 0.92, 平

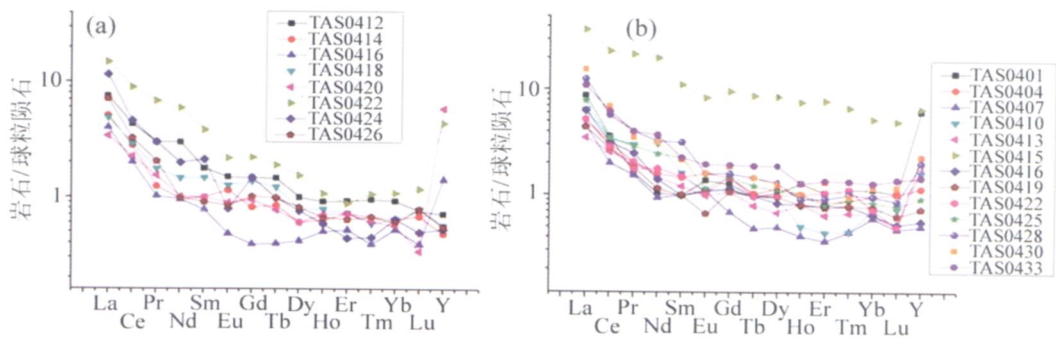


图 4 6 行富铜矿体及 1 号矿体全岩稀土配分曲线
Fig. 4 Whole rock REE curves of Line-6 copper-rich orebody and No. 1 orebody
(a) —6 行富铜矿体样品; (b) —1 号矿体样品
(a) —The samples from Line-6 copper-rich orebody; (b) —the samples from No. 1 orebody

均 0.81;1 号矿体的 Ce 最小 0.64,最大 0.92,平均 0.77。两个矿体的 Eu 和 Ce 特征非常接近,都具有弱的 Eu 和 Ce 负异常,表明两个矿体的岩浆演化过程相近,在岩浆结晶演化中分异不强烈。

对 6 行富铜矿体的成因,部分学者认为热液作用起主导作用,因为热液作用可以致使铜和铂族元素的富集,但根据 6 行富铜矿体和 1 号矿体的稀土元素特征看,热液作用对 6 行富铜矿体的作用有限。首先 6 行富铜矿体与 1 号矿体稀土配分曲线、稀土特征值等相近,且两个矿体内并没有发现明显的热液活动迹象;其次,6 行富铜矿体的 Eu 显示较弱的负异常。热液和交代流体常使岩石的矿物成分和化学成分发生很大的改变,对岩石中稀土元素的迁移性也有很大的影响。这种作用的发生常造成岩石中稀土总量增加,且出现明显的正 Eu 异常(李昌年,1992)。这明显与实际情况不同。

6 行富铜矿体和 1 号矿体的稀土特征也表明,两者在成矿物质来源和岩浆演化过程等方面具有一致性,表明为同一成矿岩浆相近演化阶段的产物。

2.3.3 稳定硫同位素

对 6 行富铜(铂族)矿体和 1 号矿体按矿化类型进行了观察并取样,委托中国地质科学院矿产资源研究所分析了硫同位素组成(表 6),并将本次和前人测得金川岩、矿样品的 ^{34}S 汇总绘制了直方图(图 5)。

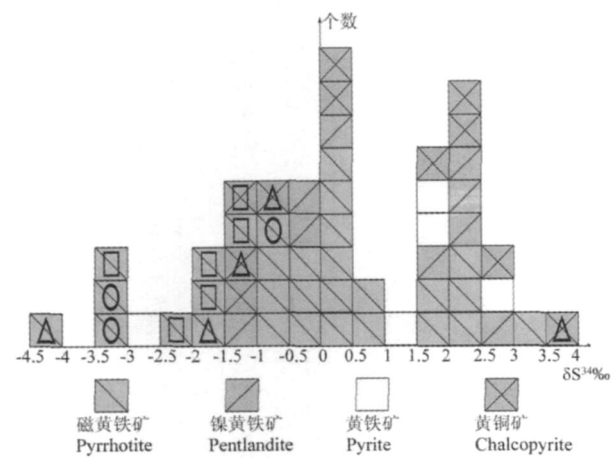


图 5 金川硫化铜镍矿床矿石矿物硫同位素组成
Fig. 5 Sulfur isotope composition of the minerals in Jinchuan deposit

—2 号矿体样品; —1 号矿体样品; —6 行富铜矿体样品
—Samples from No. 2 orebody; —samples from No. 1 orebody;
—samples from Line-6 copper-rich orebody

从表中可以看出:在 55 个不同类型的矿石样品

中,硫化物的 ^{34}S 值分布在 $-4.0\text{‰} \sim +3.6\text{‰}$ 之间,大部分样品的 ^{34}S 值在 $-1.5\text{‰} \sim 2.5\text{‰}$,在 0‰ 和 2.5‰ 附近具有两个主要峰值,变化范围较小,表明金川矿床的原生硫化物主要是在较高温度下形成的,同位素交换反应中的硫同位素分馏效应不显著。

金川铜镍矿床中最主要的原生硫化物组合为磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿,从图 5 可见,各种矿石类型的硫化物中硫同位素组成相近和变化范围不大,说明成矿物质的均一化程度很高。

55 件不同类型矿石中硫化物的硫同位素平均值 0.254‰ ,接近 0 值,表明金川铜镍硫化矿床中的硫源于地幔。在岩浆上侵的过程中,也有部分地壳物质带入的可能,但地幔硫是最主要的原生硫。但又由于 ^{34}S 值的变化具有一定范围($-4.0\text{‰} \sim +3.6\text{‰}$),可能与金川矿床成矿演化的多阶段性及各矿化阶段的矿物叠加有关。

从本次测得的 6 行富铜矿体、1 号和 2 号矿体的硫同位素组成可见,除 2 件 6 行富铜矿体样品的 ^{34}S 值分别为 -4.0‰ 和 3.6‰ 外,3 个矿体的其他样品的硫同位素组成较一致,反映了 3 个矿体具有一致的硫源,6 行富铜矿体可能有壳源硫加入。

3 6 行富铜(铂族)矿体与 1 号矿体时空地质关系探讨

通过 6 行富铜(铂族)矿体与 1 号矿体对比可见,两者具有非常一致的地质和地球化学特征,表明具有相同的成矿物质来源和相似的成矿环境。6 行富铜(铂族)矿体的地质特征也表明,它经历的后期热液活动强度不大,那是何原因导致了几乎整个该矿体明显富集 Cu、Ni、Pt、Pd、Au、Ag 等元素,而 Os、Ir、Ru、Rh 等又明显低于周围其他矿体(如 1 号矿体)?

根据汤中立等(1995)对金川铜镍矿床成矿岩浆的岩相期次划分,形成 6 行富铜(铂族)矿体和 1 号矿体的主要为第二、三期含矿岩浆,其中,前者更以第三期含矿岩浆为主。由 Cu、Ni、Pt、Pd、Os、Ir、Ru、Rh 等元素在液态硅酸盐岩浆—液态硫化物、固态单硫化物—液态硫化物之间的分配系数可知,Cu、Pt、Pd、Au、Ag 等元素主要富集于岩(矿)浆结晶分异残余液态硫化物中。由此分析 6 行富铜(铂族)矿体和 1 号矿体的成矿时空演化过程如下。

3.1 含矿岩浆分期贯入阶段

形成金川矿床的第二期含硫化物岩浆,含 Ni、Cu 较高,在第一期岩浆演化晚期开始大规模沿第一

表 6 金川铜镍硫化物矿床不同类型矿石、矿物硫同位素组成

Table 6 Sulfur isotopes of the sulfides in different types of ores in Jinchuan deposit

序号	样号	采集位置	矿石类型	矿物	³⁴ S(‰)
1	-TO0436	1 号矿体 1118 m 水平 2 号穿脉	细—中粒纯橄榄岩富矿	Po	- 0.9
2	-O-1	1 号矿体 1118 m 水平 38 # 进路	中粒纯橄榄岩富矿	Po	- 3.0
3	-O-7	1 号矿体 1118 m 水平 22 # 进路	细—中粒海绵状富矿	Po	- 3.2
4	-TO0402	富铜矿体 1301 m 水平 9 # 进路	粗粒海绵晶铁状富矿	Cp	+ 3.6
5				Po	- 0.8
6	-TO0408	1319 m 水平 6 # 进路断裂带	致密块状矿石	Po	- 1.9
7				Cp	- 1.1
8	F TO0423	富铜矿体 1301 m 水平 6 # 进路	海绵晶铁状富矿	Po	- 4.0
9	CBZHS-7 *	-50 线 ZK71	局部海绵状	Po	+ 2.16
10	N063- Po *	-37 线 1250 m 水平	局部海绵状	Po	+ 0.05
11	N169- Po *	-38 线 1250 m 水平	海绵状	Po	+ 0.33
12	CBZHS-4 *	-12 线 ZK22	海绵状	Pn	+ 2.08
13	CBZHS-5-1 *	-12 线 ZK22	海绵状	Pn	- 0.32
14	CBZHS-5-2 *	-12 线 ZK22	海绵状	Py	+ 2.53
15	CBZHS-6 *	-12 线 ZK22	海绵状	Pn	+ 2.44
16	CNZHS-8 *	-50 线 ZK71	海绵状	Py	+ 1.04
17	CBZHS-10-1 *	-8 线 ZK36	变海绵状矿石	Pn	+ 2.53
18	CBZHS-10-2 *	-8 线 ZK36	变海绵状矿石	Cp	+ 2.44
19	CBZHS-11-1 *	-14 线 ZH51	变海绵状矿石	Cp	+ 2.71
20	CBZHS-11-2 *	-14 线 ZH51	变海绵状矿石	Po	+ 3.07
21	N060- Po *	-35 线 1250 m 水平	块状	Po	+ 0.19
22	N060- Po *	-43 线 1250 m 水平	块状	Pn	- 1.06
23	CBZHS-14 *	-36 线竖井	块状	Pn	+ 1.67
24	CBZHS-15 *	-46 线 ZH98	块状	Po	+ 1.85
25	CBZHS-16 *		块状	Po	+ 2.3
26	CBZHS-16-1 *	-36 线 ZH93	浸染状矿石	Py	+ 1.85
27	CBZHS-16-2 *	-36 线 ZH93	浸染状矿石	Py	- 2.6
28	CBZHS-20 *	-24 线 1616 水平	浸染状	Po	+ 1.85
29	CBZHS-18 *	-11 线 CK53	斑染状	Po	+ 2.26
30	CBZHS-19 *	-CK55	脉状	Py	+ 1.85
31	* *		细脉浸染型矿石	Cp	+ 2.15
32	* *		致密块状特富矿石	Cp	+ 0.21
33	* *		致密块状特富矿石	Po	- 0.3
34	* *		致密块状特富矿石	Po	- 0.75
35	* *		致密块状特富矿石	Po	+ 0.68
36	* *		致密块状特富矿石	Cp	+ 0.29
37	* *		致密块状特富矿石	Cp	- 0.73
38	* *		交代型矿石	Po	+ 0.67
39	* *		交代型矿石	Cp	- 1.05
40	* *		二辉橄榄岩	Po	- 0.56
41	* *		纯橄榄岩富矿石	Cp	+ 1.53
42	* *		纯橄榄岩富矿石	Po	- 0.06
43	* *		含辉橄榄岩富矿石	Po	+ 0.48
44	* *		含辉橄榄岩富矿石	Po	+ 0.39
45	* *		含辉橄榄岩富矿石	Po	+ 0.2
46	* *		铂矿体变晶富矿石	Po	- 0.21
47	* *		铂矿体变晶富矿石	Pn	- 0.36
48	* *		铂矿体变晶富矿石	Pn	+ 0.45
49	* *		含铂族硫化物石英脉	Pn	+ 2.41

注:序号 1~3 样品采自 1 号矿体,序号 4~8 号样品采自 6 行富铜矿体。带 * 的数据据甘肃省地质矿产局第六地质队,1984;带 * * 的数据据杨合群,1989;梁有彬等,1997。Po—磁黄铁矿;Py—黄铁矿;Pn—镍黄铁矿;Cp—黄铜矿。分析单位:中国地质科学院矿产资源研究所,采用 CDT 国际标准,质谱计型号为 MAT 251EM,分析精度 ±0.2 ‰。

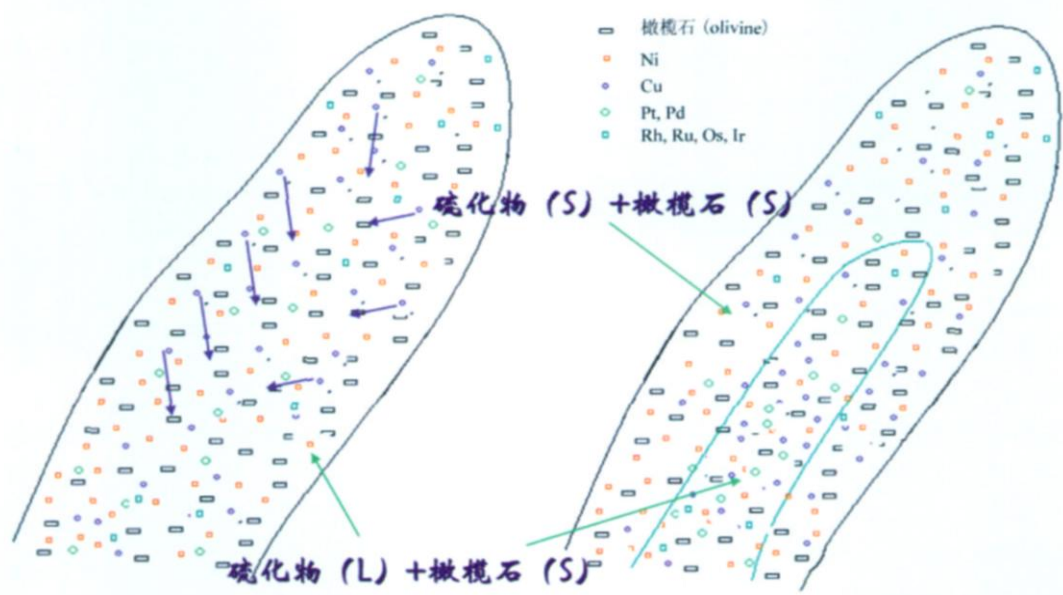


图 6 富硫化物矿浆结晶分异过程中元素迁移富集示意

Fig. 6 Sketch of the elements concentration during the crystalizing process of sulfide liquid rich silicates

期形成的岩石底部上侵,并发生硫化物就地熔离作用,形成悬浮于岩浆岩中的小型低品位矿体,其他大部分硫化物液滴下沉到岩浆的底部,由于本期的岩浆熔离出的硫化物较少,导致硫化物在岩浆底部分布不连续,在局部可形成海绵状富矿体,但大部分为局部海绵状、半海绵状的贫矿体。这期侵入作用构成 1 号矿体的贫矿主体。

第三期为位于地壳中间岩浆房下部的富硫化物与橄榄石的岩浆,上侵后几乎全部形成高品位矿石,构成了 1 号矿体富矿的主体。

3.2 富矿岩浆中硫化物结晶分异阶段

第三期的富含液态硫化物和橄榄石晶体的岩浆上侵就位后,发生了硫化物的结晶分异作用,导致了矿床元素的分带性和元素的空间分布变化。

随着温度的降低,液态硫化物开始发生结晶分异作用。根据 Kullerud (1963) 编制的 1100 、 1000 、 900 、 650 和 550 温度条件下的 Ni-Fe-S 体系的相图(转引赵伦山等,1988)资料了解,形成铜镍硫化物矿石的硫化物熔体的成分点都落在单硫化物固溶体相(相当于磁黄铁矿固溶体)的稳定场内,说明在 500 ~ 1100 的温度范围内,在形成铜镍硫化物矿石的熔体中,只能产生一个均匀的相——单硫化物固溶体相(Mss)。

根据硫过饱和条件下亲铜元素的地球化学特性,在首先晶出的单硫化物中除了 Fe 以外,Ir、Os、Ru、Rh 和 Ni 等元素产生富集,Cu、Pt、Pd 等的含量

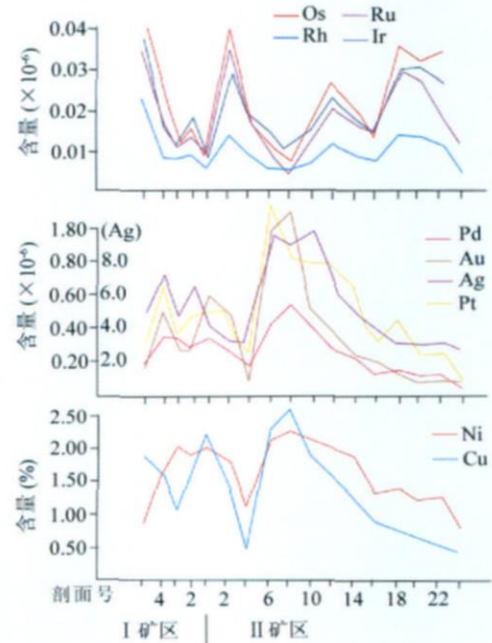


图 7 金川 、 矿区矿体元素含量变化图

(据甘肃省地质矿产局地质六队资料整理)

Fig. 6 Elements content variation curves of the orebodies in mining area and mining area of Jinchuan (Data recomposed is from the No. 6 Geology Brigade of Gansu Bereau of Geology and Mineral Resources)

较低;而在与这些高温结晶单硫化物处于平衡的剩余液态硫化物中,Cu、Pt、Pd 等元素产生显著富集,

而 Ir、Os、Ru、Rh 等元素含量较低,由于 Ni 的共价半径较大同样在剩余液态硫化物中含量较高。含硫化物岩浆上侵就位后,与冷围岩接触的上、下盘接触带部分温度下降较快而首先结晶,而在中间靠下的部分,尤其靠近岩浆上升通道的部位,温度下降相对较慢,因此,液态硫化物在这些部位残留时间最长,Cu、Pt、Pd 也就相对在此最富集(图 6)。

3.3 构造物理搬运作用阶段

在岩浆通道部位的第三期富硫化物岩浆最晚固结形成矿体,由于矿体所处部位是岩浆通道,因此,后期构造最易在此部位活化,当受到后期活化断层构造作用强大的压力作用时,这些矿体的一部分则沿断层构造底辟上升位移,形成了如 6 行富铜(铂族)矿体等类似的矿体。这类岩浆通道型矿体的边界往往以断层构造为界,矿体受构造作用特征显著,如矿体强烈透镜体化、矿石挤压破碎、片理化等,在地球化学方面,以富含 Cu、Ni、Pt、Pd、Au、Ag,贫 Os、Ir、Ru、Rh 等元素为标志性特征。

4 找矿预测

对金川铜镍矿床历史地质资料进行了系统收集和整理,对占矿床主体的、矿区的矿(岩)体绘制了元素含量变化曲线图(图 7)。从图中可以发现,在 1 号矿体中西矿段的 6~10 行线之间是 Cu、Ni、Pt、Pd、Au、Ag 最富集,而 Os、Ir、Ru、Rh 含量最低的地段。根据前述岩浆通道型矿体的标志特征,表明该区段是寻找岩浆通道型矿体的有利靶区,认为金川矿床 1 号矿体中—西矿段的深部具有较大的找矿潜力。

参 考 文 献

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. 北京:地质出版社.
李昌年. 1992. 火成岩微量元素岩石学. 武汉:中国地质大学出版社.
梁有彬,朱文凤,宋国仁,宋恕夏. 1997. 金铜镍型铂族元素矿床地质

地球化学特征. 矿产与地质, 11(1): 1~13.
宋谢炎,李士彬,王玉山,把多恒,陈烈猛. 2005. 含矿岩浆通道对于岩浆铜镍硫化物矿床找矿工作的意义. 矿物岩石地球化学通报, 21(4): 293~298.
苏尚国,周美夫,漆亮,等. 2006. 甘肃金川铜镍铂矿床铂钯富集体富集机理(第八届全国矿床会议论文集). 北京:地质出版社, 238~241.
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.
杨合群. 1989. 金川铜镍矿床硫同位素地球化学. 西北地质, (2): 20~23.
赵伦山,张本仁. 1988. 地球化学. 北京:地质出版社.
Barnes S J, Maier W D. 1999. The fraction of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulfide liquids. In: Keays R R, Leshner C M, Lightfoot P C, et al., ed. Dynamic Processes in Magmatic Ore Deposits and Their Application in Mineral Exploration. Geological Association of Canada, Short Course, 13: 69~106.
Chai Gang, Naldrett A J. 1992. Characteristics of Ni-Cu-PGE mineralization and genesis of the Jinchuan deposit, Northwest China. Econ. Geol., 87: 1475~1495.
Fleet M E, Crocket J H, Liu M, et al. 1999. Laboratory partitioning of platinum-group elements (PGE) and gold with application to magmatic sulfide-PGE deposits. Lithos, 47(1~2): 127~142.
Fleet M E, Stone W E. 1991. Partitioning of platinum-group elements in Fe-Ni-S system and their fractionation in nature. Geochimica et Cosmochimica Acta, 55: 245~253.
Li C, Naldrett A J, Ripley E M. 2001. Critical factors for the formation of a nickel-copper deposit in an evolved magma system: lessons from a comparison of the Pants Lake and Voisey's Bay sulfide occurrences in Labrador, Canada. Mineralium Deposita, 36: 85~92.
Song Xieyan, Zhou M F, Wang Y C, Qi L, Zhang C J. 2006. Role of crustal contamination in formation of the Jinchuan intrusion and its world-class Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, northwestern China. International Geology Review, 48: 1113~1133.
Song Xieyan, Keays R R, Zhou M F, Qi L, Ihlenfeld C, Xiao J F. 2009. Siderophile and chalcophile elemental constraints on the origin of the Jinchuan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, NW China. Geochimica et Cosmochimica Acta, 73: 404~424.

Geological and Geochemical Characteristics of the Magma Conduit-Type Orebodies of Jinchuan Cu-Ni Sulfide Deposit

TIAN Yulong¹⁾, BAO Guozhong¹⁾, TANG Zhongli²⁾, WANG Yushan¹⁾

1) *Jinchuan Group Ltd., Jinchang, Gansu, 737102;*

2) *The Land Resources Institute of Chang'an University, Xi'an, 710054*

Abstract

The line-6 copper (PGE)-rich orebody of Jinchuan Cu-Ni sulphide deposit is considered as the product of post magmatic hydrothermal superimposed mineralization by some researchers. From study, the orebody is controlled by fault structure in space and it is same with adjacent magma liquation 1[#] orebody in aspects as ore fabric, mineral composition and sulfur isotopic composition. The orebody shows characteristics of magmatic mineralization. In element geochemistry, prospecting line 6 copper (PGE)-rich orebody Cu, Ni, Pt and Pd contents and Cu/Ni value appears obviously higher than 1[#] main orebody, whileas, Os, Ir, Rh and Ru contents appears obviously lower than the latter. Comparatively, the former has rich LREE and differentiation of light and heavy lanthanon is higher than the latter. Based on Metal Elements distribution rules and lanthanon characteristics during the period of sulfide crystallization differentiation, this paper demonstrated prospecting line 6 copper-rich (PGE) orebody as magma conduit type orebody, it is the products of the late stage crystallization of liquid magmatic sulfide. In the Midwest of the mining area, Cu, Ni, Pt, Pd and Au contents are high. In the zone of Os, Ir, Rh and Ru low contents where is the advantage location to prospect for magma conduit type orebody.

Key words: Jinchuan Cu-Ni sulfide deposit; magma conduit; sulfide crystallization differentiation; prognosis