



金川铜镍硫化物矿床铂族元素地球化学 差异及其演化意义

曾认宇^{1,2}, 赖健清^{1,2}, 毛先成^{1,2}, 赵莹^{1,2}, 刘嫔^{1,2}, 朱佳玮^{1,2}, 岳斌³, 艾启兴³

- (1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;
3. 金川集团股份有限公司 镍钴研究设计院, 金昌 737104)

摘 要: II-2号矿体为金川铜镍硫化物矿床的第二大矿体, 位于II矿区30行以东。为了解II-2号矿体母岩浆在演化过程中的特殊性, 采用镍钨试金 ICP-MS 法分析金川矿床II-2号矿体各类矿石的Cu、Ni、S及铂族元素(PGE)含量, 研究其特征, 并与II-1号矿体矿石进行对比。结果表明: 矿石 Σ PGE含量变化较大($44.6 \times 10^{-9} \sim 8526.7 \times 10^{-9}$), Pd/Ir 介于1.25~26.55之间, 为典型的岩浆型成因。海绵陨铁状矿石和局部海绵陨铁状矿石为II-2号矿体主要的矿石类型, 其PGE配分模式极为相似, 且为渐变过渡的接触关系, 说明二者为同一期岩浆侵位的产物。富铜矿石与块状硫化物矿石、含细脉状矿石的配分模式有互补的特征, 富铜矿石具有极高的 Σ PGE(8526.7×10^{-9})和Cu/Ni(5.46), 块状硫化物矿石和含细脉状矿石相对富集IPGE(Σ PPGE/ Σ IPGE <1), 这三者与海绵陨铁状及局部海绵陨铁状矿石的区别明显, 为岩浆演化到后期的产物, 而从相互的接触关系来看, 块状硫化物矿先于富铜矿侵位。通过研究II-2号矿体与II-1号矿体海绵陨铁状矿石的铂族元素及Cu、Ni特征, 发现二者母岩浆均为地幔中等熔融形成的高MgO苦橄质玄武岩, 具有相同的源区特征; 由二者的铂族元素分异情况、Cu/Ni、Cu/Pd及Ir与Ru、Rh、Pt、Pd的相关性, 研究二者的母岩浆在液态硫化物-硅酸盐体系和单硫化物固溶体-液态硫化物体系中的演化特征, 认为II-1号矿体和II-2号矿体中的硫化物是先后从母岩浆中熔离, 且分离后具有不同步的演化特征; 通过II-2号矿体的地球化学剖面及金川矿床的Cu、Ni品位纵剖面及XOY平面投影等值线图, 证明这种先后熔离作用发生在深部岩浆房中, 而后II-2号矿体和II-1号矿体的成矿岩浆分别进入两条相对独立的岩浆通道, 最后由不同的岩浆通道中心侵位到最终的成矿空间, 形成II-2号矿体与II-1号矿体。

关键词: 金川; 铜镍硫化物矿床; 铂族元素; 岩浆通道; 成矿过程

中图分类号: P581; P611.11

文献标志码: A

岩浆通道系统作为一种开放性的系统, 巨量的岩浆在其中发生深部熔离的预富集作用, 这为如金川、喀拉通克等矿床在较小的岩体中形成大规模的矿床提供了可能^[1-4], 因此, 浆通道系统成为了近些年来研究岩浆型铜镍硫化物矿床的热点^[5-8]。由于铂族元素具有强烈的亲硫性和亲铁性, 其配分模式受后期蚀变影响较小, 而主要由母岩浆的成分及岩浆演化所决定, 故在研究与基性-超基性岩有关矿床的岩石原岩、演化、成因及成矿预测等方面具有广泛的应用^[9-10]。卢宜冠等^[11]对产于辉石橄榄岩中的滇西金宝山铂钯矿进行铂族元素研究后认为, 该矿床的形成经历了早期地壳混染、晚期地壳S加入而造成的两期硫化物熔离作用;

徐刚^[12]在研究甘肃黑山铜镍硫化物矿床过程中, 通过铂族元素(PGE)得到其母岩浆的组分, 并认为该母岩浆为较低程度地幔部分熔融形成的; 柴凤梅等^[13]通过PGE计算出新疆北山地区两个镁铁质-超镁铁质岩浆的R值(硅酸盐熔体/硫化物熔体的比值), 据此推测该岩体有达到中型Ni矿床的潜力。

金川矿床产出于古大陆内基性-超基性岩墙中^[14], 为世界在采的第三大铜镍硫化物矿床, 其成矿岩体很小, 产出面积仅为1.34 km², 却具有极高的矿化率(47.8%), 故受到中外学者的高度关注^[1, 15-16]。随着金川矿床岩浆通道成矿理论研究的深入, 通过铂族元素来进一步探讨矿床的岩浆通道系统, 成为不断深

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41172297, 41472301)

收稿日期: 2015-01-30; **修订日期:** 2015-10-20

通信作者: 赖健清, 教授, 博士; 电话: 13875983805; E-mail: lj@csu.edu.cn

化成矿岩浆在深部演化的必经途径。近些年来,前人通过分别对位于Ⅲ、Ⅰ矿区的西岩体和位于Ⅱ、Ⅳ矿区的东岩体,以及西岩体上、下两个岩相单元的铂族元素等地球化学、岩相学、矿区构造等方面的研究,认为这些岩体虽然有相同的母岩浆,但东、西岩体是独立的两个侵入体,且西岩体上、下两个单元的矿浆也是经不同的深部岩浆房演化形成的^[17-18]。因此,形成金川矿床的岩浆通道系统,在横向上是由多个并列的、具有独立演化特征的岩浆通道组成的复杂系统。位于矿床中部的Ⅱ-2号矿体为金川矿区的第二大矿体,其与Ⅱ-1号矿体一同产出于东岩体中,二者在形态、铂族元素等方面也表现出了明显的差异性^[8, 15, 19],但通常被认为是通过同一岩浆通道侵位形成的。本文作者通过系统地采集Ⅱ-2号矿体各类型的矿石,研究其铂族元素地球化学特征,探讨Ⅱ-2号矿体中各类型矿石之间生成及演化关系,并与Ⅱ-1号矿体进行对比,由母岩浆在源区、中途岩浆房及侵位过程中的特点,探讨二者成矿母岩浆在岩浆通道中相互间的关系和独立性。

1 地质背景

金川铜镍硫化物矿床位于华北板块西南缘的龙首山隆起带内,含矿岩体呈岩墙状侵入于前长城系白家嘴子组中。白家嘴子组主要由混合岩、片麻岩和大理岩组成,为一套深变质岩,其中大理岩和混合岩为含矿岩体的主要围岩^[15]。含矿岩体长约6500 m,宽20~500 m,走向NW、倾角50°~80°,延深可达千余米。矿区经历了长期的地质构造运动,断层纵横交错^[20],其中NEE向扭性断层F₈、F₁₆₋₁、F₂₃把矿床自西向东分为Ⅲ、Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ这4个相对独立的矿区,并改造了矿体的原始形态^[21]。Ⅱ-1、Ⅱ-2、Ⅰ-24、Ⅳ-1、Ⅳ-26、Ⅲ-1号矿体为矿区主要矿体,占全矿区镍金属量的87.82%。

Ⅱ-2号矿体为仅次于Ⅱ-1号矿体的金川矿区第二大矿体,其位于Ⅱ矿区30行以东,长约1700 m,平均厚度91 m,其产状受底盘起伏影响变化较大,倾角在25°~65°间,相对Ⅱ-1号矿体,Ⅱ-2号矿体倾角较缓,且矿体形态复杂,沿走向、倾斜多呈分支尖灭,膨缩变化显著。F₁₇断层位于Ⅱ-2号矿体中部,现表现为一正平移断层,破坏了矿体的完整性。矿体内后期的岩脉极为发育,主要有煌斑岩、辉绿岩、花岗闪长斑岩等。矿体总体品位较低,围岩主要为二辉橄榄岩,其次为斜长二辉橄榄岩、大理岩、混合岩和辉石岩等。

2 样品特征及分析方法

金川矿石的划分方式有多种,本实验中采用结构构造的分类方式,把矿石分为块状硫化物矿石、海绵陨铁状矿石、局部海绵陨铁状矿石、含细脉状矿石,以富铜(Cu含量>Ni含量)特点命名的富铜矿,可以为上述任意一种结构构造,由于其具有重要的研究意义,故单独立出来。F₁₇断层以东的1150 m中段和F₁₇断层以西的1450 m中段为Ⅱ-2号矿体正在开采的两个主要中段。本研究中样品均采自这两个中段内,其中J2-11(富铜矿石)、J2-16(块状硫化物矿石)和J2-17(含细脉状矿石)采集于F₁₇断层附近,而海绵陨铁状矿石和局部海绵陨铁状矿石分别沿Ⅱ-2号矿体的走向连续采集于F₁₇断层的東西两侧,并确保同类矿石为同一期次侵位的岩浆形成的(见图1(c))。

块状硫化物矿石中,金属硫化物含量通常>60%,少数可达90%以上,Ni含量>3%,主要矿物为磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿,这三者体积相对比值为7.0:2.5:1.0,并含有少量的黄铁矿及磁铁矿(见图2(a)和(b)),金属硫化物多呈半自形-他形结构,其中黄铁矿主要为磁黄铁矿次生蚀变而成,而磁铁矿沿后期裂隙充填;该类型矿石在金川矿区较为少见,主要呈不规则的细脉状(宽从几十厘米到20余米)或扁豆状成群产出于Ⅱ-2号矿体中部F₁₇断层附近。海绵陨铁状和局部海绵陨铁状矿石为组成金川矿床的主要矿石类型,二者硫化物含量分别介于15%~30%和8%~15%之间,Ni含量分别介于1.0%~3.0%和0.3%~1.0%之间,金属硫化物主要由镍黄铁矿、磁黄铁矿、黄铁矿和黄铜矿组成,其体积相对比值为3.5:2.5:1.5:1.0,可见少量的磁铁矿,其常环绕铜镍硫化物呈环边结构;海绵陨铁状矿石中金属矿物均匀且紧密地充填于呈自形-半自形的以橄榄石为主的脉石矿物间隙,呈连续的网络,橄榄石蛇纹石化、碳酸盐化强烈,且常被溶蚀呈浑圆状(见图2(c)和(d));局部海绵陨铁状矿石的金属硫化物呈半自形-他形,不均匀分布,未形成连续的网脉状(见图2(e))。以镍黄铁矿、黄铁矿为主的后期金属硫化物细脉沿裂隙穿插于早期形成的海绵陨铁状矿石,形成含细脉状矿石(见图2(f)和(g)),该类型矿石一般产出在块状硫化物矿石附近。富铜矿石主要特点是黄铜矿含量高,黄铜矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿的体积相对比值约为3.0:2.5:1.0,脉石矿物以橄榄石为主(见图2(h));富铜矿体分布极少,被认为对岩浆通道中心有指示意义^[17, 22],主要产于Ⅰ矿区6行富铜的隐伏矿体

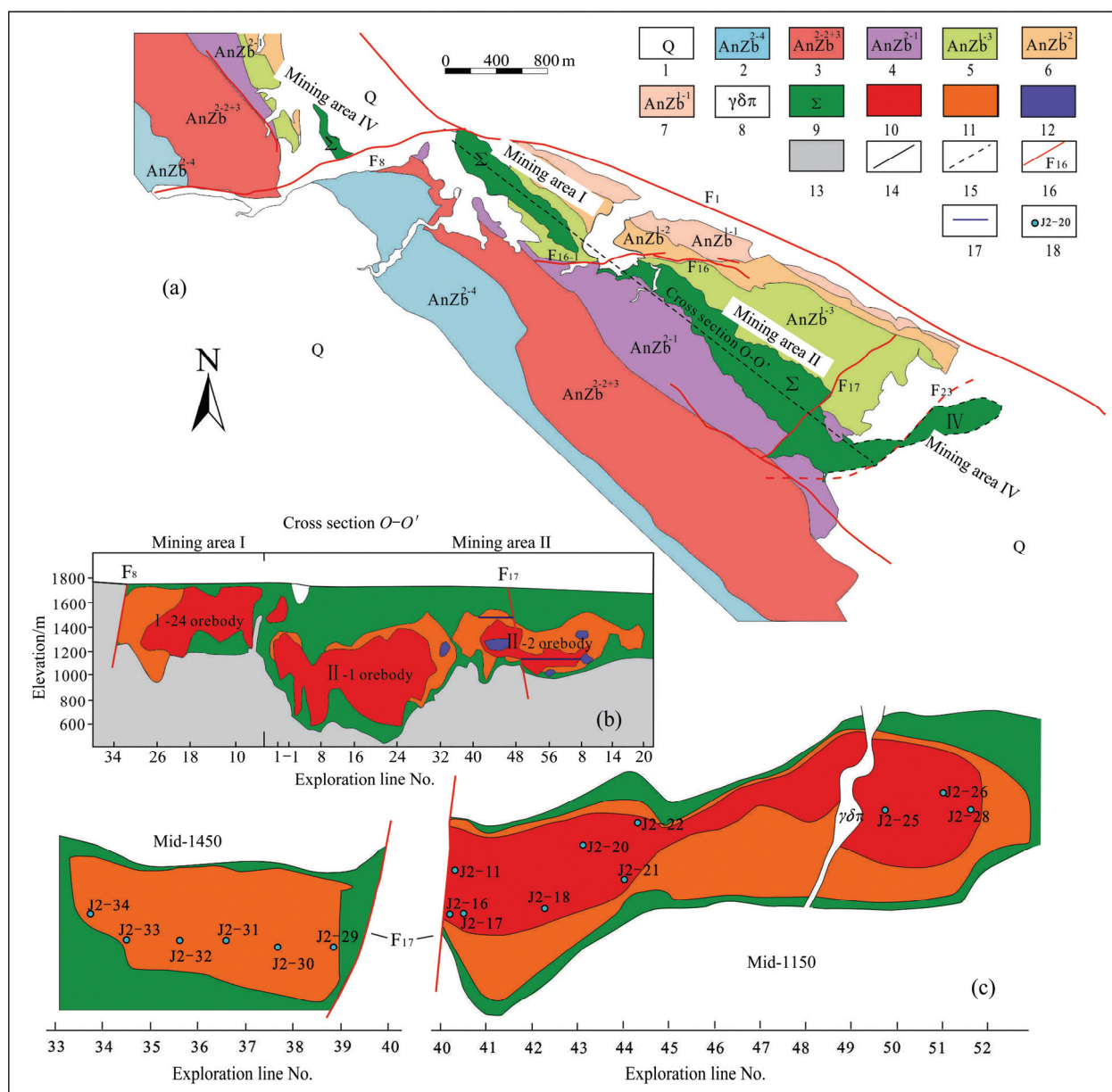


图 1 金川铜镍矿床地质构造简图(a)、主矿体纵断面图(b)及矿体中段图(c): 1—第四系; 2—蛇纹石大理岩中部分夹条痕状混合岩; 3—绿泥石英片岩+含榴二云片麻岩; 4—条带—均质混合岩; 5—蛇纹大理岩; 6—黑云斜长片麻岩; 7—角砾状混合岩—均质混合岩; 8—花岗闪长斑岩; 9—超基性岩; 10—富矿体; 11—贫矿体; 12—块状硫化物矿石; 13—围岩; 14—地质界线; 15—推测地质界线; 16—断层及隐伏断层; 17—采样中段; 18—采样点及样号

Fig. 1 Geological structure sketch map (a), main cross sections (b) and mining level (c) of Jinchuan ore-bearing ultramafic intrusions: 1—Quaternary; 2—Serpentinized marble interlarded with streaky migmatite; 3—Chlorite schist and Garnet bearing bi-mica gneisses; 4—Banded migmatites-homogeneous migmatite; 5—Serpentinized marble; 6—Plagioclase biotite gneiss; 7—Agmatite- homogeneous migmatite; 8—Granodiorite porphyry; 9—Ultrabasic rock; 10—Rich orebody; 11—Lean orebody; 12—Massive sulphide orebody; 13—Surrounding rock; 14—Measured geological boundary; 15—Inferred geological boundary; 16—Measured and buried fault; 17—Sampling levels; 18—Sampling point and sample number

中, 本研究中, 在 II-2 矿体中部的 F_{17} 断层附近同样发现了富铜矿体(见图 2(i))。

样品铂族元素及 Cu、Ni、S 含量的测试工作, 在

有色金属桂林矿产地质测试中心进行, PGE 采用镍铈试金—电感耦合等离子体质谱法(GB/T17418.7-2010), 分析原理如下: 取试料与适量的混合溶剂按比例混合,

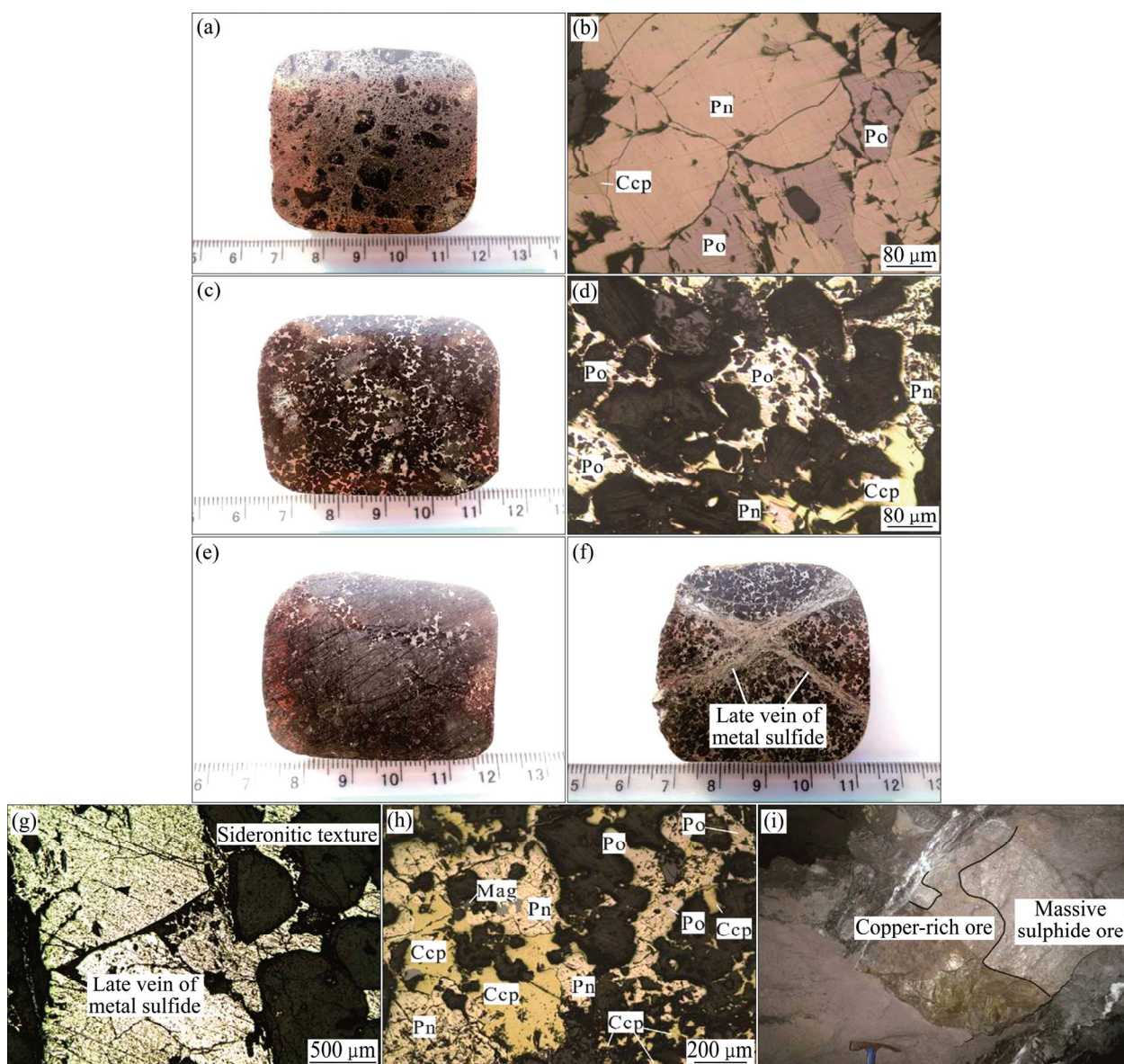


图 2 金川矿床矿石结构构造特征: (a) 块状硫化物矿石; (b) 块状硫化物矿石: 几乎全部由金属硫化物及少量磁铁矿组成(-); (c) 海绵陨铁状矿石; (d) 海绵陨铁状矿石: 磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿为主的金属硫化物均匀充填于橄榄石及少量辉石间(-); (e) 局部海绵陨铁状矿石: 金属硫化物不均匀分布, 未形成连续的网脉; (f) 含细脉状矿石; (g) 含细脉状矿石: 后期金属硫化物矿脉穿插于海绵陨铁状矿石中(-); (h) 富铜矿石: 黄铜矿含量高(-); (i) 富铜矿体穿插块状硫化物矿体, 二者界限截然。((-) 单偏光; 矿物缩写: Po—磁黄铁矿; Pn—镍黄铁矿; Ccp—黄铜矿; Mag—磁铁矿)

Fig. 2 Texture and structure characteristics of ores in Jinchuan Ni-Cu-(PGE) deposit: (a) Massive sulphide ore; (b) Massive sulphide: Almost entirely consists of metal sulfides and minor magnetite(-); (c) Sideronitic ore; (d) Sideronitic ore: Metal sulfides which are mainly composed of pyrrhotite, pentlandite and chalcopyrite are uniformly filled into crack of olivine and minor pyroxene (-); (e) Partial sideronitic ore: Metal sulfides are locally distributed in gangue mineral, it does not form a conspicuous network (-); (f) Vein interpenetration ore; (g) Vein interpenetration ore: Late vein of metal sulfides interspersed in sideronitic ore(-); (h) Copper-rich ore: High content of chalcopyrite(-); (i) Copper-rich orebody interspersed in massive sulphide orebody completely. ((-) Plane polarized light; Abbreviations for minerals: Po—Pyrrhotite; Pn—Pentlandite; Ccp—Chalcopyrite; Mag—Magnetite)

于 1100 °C 的马弗炉中熔融; 贵金属通过镍钨捕集与其他元素分离, 用盐酸溶解镍钨扣, 抽滤, 沉淀和滤膜

转入封闭溶样器中, 用王水溶解; 在 ICP-MS 上直接测定铂族元素, 其中钨用同位素稀释法测定。

3 II-2 号矿体铂族元素地球化学特征

样品的原始数据列于表 1。II 矿区矿石 Σ PGE 含量在 $44.6\times 10^{-9}\sim 8526.7\times 10^{-9}$ 之间, 变化幅度很大, 其中富铜矿石高于其他矿石 1~2 个数量级; Σ IPGE 含量在 $3.4\times 10^{-9}\sim 255.8\times 10^{-9}$ 之间, 而 Σ PPGE 含量在 $27.3\times 10^{-9}\sim 8480.9\times 10^{-9}$ 之间, Σ PPGE/ Σ IPGE 比值介于 0.5~185.0 之间, 除块状硫化物矿石体及含细脉状矿石外, 均强烈富集 PPGE, 显示演化过程中铂族元素发生了强烈的分异。样品的 Pd/Ir 介于 1.25~26.55

之间, 大于原始地幔中的 1.21, 而远小于 100, 显示样品受热液作用极少, 属于典型的岩浆型矿石^[23]。

在 100%硫化物(含义及计算方法详细见文献[12])PGE 原始地幔标准化模式图解上(见图 3), 海绵陨铁状、局部海绵陨铁状、块状硫化物和含细脉状矿石具有相似的配分型式, Ni-Ir 向右倾, Ir-Rh 为左倾, 而其中 Pt 变化较大, 部分具有明显的负异常, 这种现象无法用 R 因素控制的硫化物分离进行解释, 而可能与硫化物分离前的 Pt-Fe 合金的分离作用有关^[18]。富铜矿石则差别较大, Cu、Pt 极为富集, 且 Ir 向上凸起, 与其他矿石中的相反。

富铜矿石(J2-11)富含 Cu、Pt、Pd, Cu/Ni 为 5.46,

表 1 金川矿床的 PGE、Cu、Ni 元素含量及比值

Table 1 Contents of PGE, Ni, Cu in Jinchuan deposit

Sample No.	Ore type	w(B)/10 ⁻⁹						w(B)/%		
		Pt	Pd	Rh	Ir	Ru	Os	Cu	Ni	S
J2-11	1	8416	36.1	28.8	16.4	16.7	12.7	7.54	1.38	14.6
J2-16	2	63.8	53.5	34.3	42.6	129.3	83.9	2.93	7.16	31.23
J2-17	3	11.1	26.3	12.1	16	41.2	33.4	0.71	2.52	15.35
J2-18	4	17.2	34.9	3.9	2.3	4.5	3.4	0.92	2.28	10.58
J2-20	4	102.7	142.3	7.5	8.7	23	18.3	0.35	2.68	12.82
J2-21	4	11.4	59.7	2.3	2.2	4.7	4.3	0.68	1.52	8.71
J2-22	4	191.1	39.3	9.4	10.2	30	21.2	1.62	1.47	8.83
J2-25	4	3.9	59.7	5.3	4.1	9.7	5.9	1.01	2.04	10.02
J2-26	4	30.4	9.3	1.6	1.8	3.3	3.2	0.25	0.91	3.2
J2-28	4	32.8	16.7	3.3	2.9	4	3.9	0.46	0.96	3.59
J2-29	5	9.2	25.3	2.5	2	3.4	2.3	0.72	0.61	2.67
J2-30	5	20.7	27	1.1	1.2	2.8	1.9	0.24	0.55	2.32
J2-31	5	256.2	27.6	1.8	1.3	3	2.2	0.07	0.64	2.43
J2-32	5	25.3	33.6	2.8	4.3	6.3	4.9	0.52	0.5	2.26
J2-33	5	124.4	61.7	3.4	7.5	11.6	9.8	0.2	0.58	2.21
J2-34	5	14	12.3	1	0.7	1.7	1	0.05	0.22	0.65
II 14-19	4	33.3	199.8	12.8	25.8	23.8	28.9	1.11	1.44	3.18
II 14-30	4	139.8	28 4.8	7	5.9	2.6	5.5	1.27	1.71	3.12
II 14-25	4	686.6	295.4	4.2	3.8	2.2	4.4	0.67	1.92	3.5
II 14-26	4	96.1	199.8	6.7	4.6	2	5.1	1.82	2.18	3.83
II 14-15	4	20.8	308.8	28.2	67.7	57.6	41.4	0.67	2.63	4.4

1—富铜矿石; 2—块状硫化物矿石; 3—含细脉状矿石; 4—海绵陨铁状矿石; 5—局部海绵陨铁状矿石。J2—样品为 2 号矿体样品, 测试分析由有色金属桂林矿产地质测试中心完成; II 14 为 II-1 号矿体样品, 数据来源于文献[26]。

$$(\delta Ir = \frac{Ir_N}{\sqrt{Os_N \cdot Ru_N}}、\delta Ru = \frac{Ru_N}{\sqrt{Ir_N \cdot Ru_N}})$$

1—Copper-rich ore; 2—Massive sulphide ore; 3—Rein interpenetration ore; 4—Sideronitic ore; 5—Partial sideronitic ore. J2—Sample collected from II-2 orebody, test unit is China Nonferrous Metals (Gulin) Geology and Mining Co. Lte; II 14—Sample collected from II-1 orbody, and data are from Ref. [26]

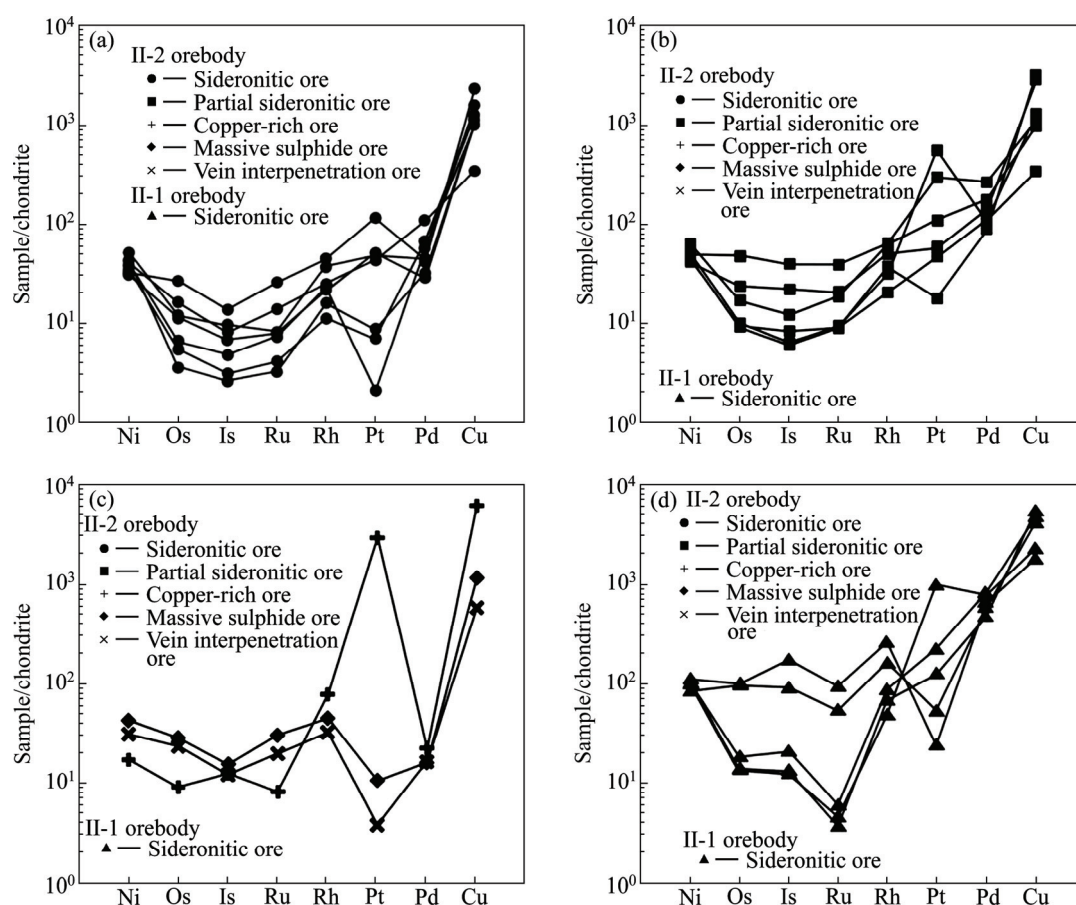


图3 金川矿床不同类型矿石 100%硫化物中铂族元素原始地幔标准化图解(原始地幔值引自文献[24])

Fig. 3 100% sulfide primitive mantle normalized patterns of different types of ores in Jinchuan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit(primitive mantle values were cited by Ref. [24])

远高于金川矿床 Cu/Ni 的平均比值 0.5, PGE 中最活泼的 Pt 比其他元素高 2 个数量级,其特征与 6 行富铜隐伏矿体类似,参照前人对 6 行富铜隐伏矿体的研究,该富铜矿体应该为岩浆演化到后期的产物^[7, 22]。块状硫化物矿石(J2-16)的 Cu/Ni 为 0.4, PPGE 小于 IPGE,与富铜矿石的配分模式有互补的关系(见图 3(c)),而从井下富铜矿体和块状硫化物矿体接触关系来看,二者界限截然,块状硫化物矿体被富铜矿体穿插(见图 2(f)),推测二者为不同期次侵位,并且块状硫化物矿先于富铜矿。含细脉状矿石(J2-17)为金属细脉穿插于海面陨铁状矿石形成,其 Pt/Ir 为 1.64,说明细脉与热液活动无关;而产出位置靠近块状硫化物矿体,且 PGE 配分模式图与块状硫化物矿石极为相似(见图 3(c)),二者以 $\Sigma\text{PPGE}/\Sigma\text{IPGE}<1$ 、 $\delta\text{Ru}>1$ 的特点明显区别于其他矿石,说明该金属细脉可能是形成块状硫化物矿石的矿浆在末端沿岩石裂隙贯入形成的。海绵陨铁状矿石和局部海绵陨铁状矿石的 PGE 配分曲线极为相似(见图 3(a)和(b)),且在井下发现二者没有截然的界线,反

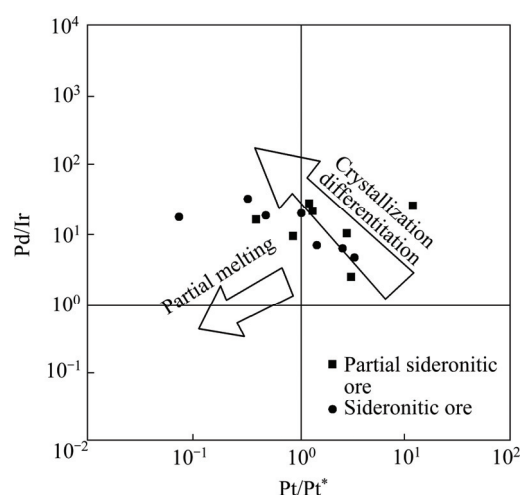


图4 金川 II-2 号矿体海绵陨铁状矿石和局部海绵陨铁状矿石 Pd/Ir-Pt/Pt*图解(据文献[25]改编) ($\text{Pt}/\text{Pt}^* = \text{Pt}/8.3/(\text{Rh}/1.6 \times \text{Pd}/4.4)^{1/2}$)

Fig. 4 Pd/Ir-Pt/Pt* diagram of net-structured ores and partly net-structured ores in Orebody II-2, Jinchuan deposit (modified from Ref. [25])

而存在几米到十几米宽的渐变过渡带,显示二者为相同演化阶段形成、同一期侵位的产物;而在图4中,海绵陨铁状矿石与局部海绵陨铁状矿石各自均显示结晶分异的演化关系,暗示矿石结晶时,存在结晶分异作用。

4 讨论

4.1 母岩浆及源区特征

金川矿床 II-2 号矿体中的海绵陨铁状矿石和局部海绵陨铁状矿石的 $(Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru)$ 介于 3.0~25.9 之间,平均为 5.8, $Pt/(Pt+Pd)$ 均介于 0.09~0.73 之间,平均值为 0.39;而 II-1 号矿体中海绵陨铁状矿石的 $(Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru)$ 介于 1.98~94.4 之间,平均值为 31.0, $Pt/(Pt+Pd)$ 均介于 0.06~0.70 之间,平均值为 0.32。NALDRETT^[27] 研究认为,与玄武质岩浆和与科马提岩有关的铜镍硫化物矿床的 $(Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru)$ 分别介于 5.7~55.6 和 1.3~3.5 之间, $Pt/(Pt+Pd)$ 分别介于 0.28~0.72 和 0.36~0.38 之间;因此,II-2 号矿体和 II-1 号矿体均更接近于与玄武质岩浆有关的铜镍硫化物矿床。岩浆部分熔融程度与 Pd/Ir 成反比,与 Ni/Cu 成正比^[25]。II-2 号矿体海绵陨铁及半海绵陨铁矿石 Pd/Ir 介于 3.853~27.136 之间,均值为 13.692, Ni/Cu 介于 0.847~9.143 之间,均值为 3.198;II-1 号矿体海绵陨铁矿石 Pd/Ir 介于 4.560~78.355 之间,均值为 36.559, Ni/Cu 介于 1.198~3.925 之间,均值为 2.127;二者的 Pd/Ir 值均要低于玄武岩的范畴,与金川 I 矿区含硫化物较少的岩体($Pd/Ir=5.579\sim14.129$)^[28] 一样介于苦橄岩的范围内(见图5); Ni/Cu 远远低于原始地幔(77.8)和科马提岩(>7),而与母岩浆为玄武岩浆的 Sudbury 和 Noril'sk 矿床相似(<3)^[17, 29-30]。由 II-2 和 II-1 号矿体的 Pd/Ir 和 Ni/Cu 比值可知,形成二者的母岩浆均为地幔中等熔融形成的苦橄质玄武岩浆^[31],这与曾认宇等^[32] 通过微量元素特征得出 II-1 号及 II-2 号矿体的母岩浆均为石榴子石二辉橄榄岩经过 30%~40% 的分离熔融形成的结论相一致。BARNES 等^[9] 研究表明, $Pd/Ir-Ni/Cu$ 和 $Ni/Pd-Cu/Ir$ 可以用来判断原始岩浆属性及岩浆演化。在 $Ni/Pd-Cu/Ir$ 和 $Pd/Ir-Ni/Cu$ 原始岩浆判别图解中(见图6),除极少数点外,II-1 号及 II-2 号矿体的样品均落入高 MgO 玄武岩中,暗示二者的母岩浆均具有高 MgO 的特征(在本次研究中,高 MgO 玄武岩定义为原始岩浆 MgO 含量介于 12%~18%)。因此,II-2 和 II-1 矿体的母岩浆具有同源的特征,为地幔经过中等熔融形成的高 MgO 的苦橄质玄武岩。

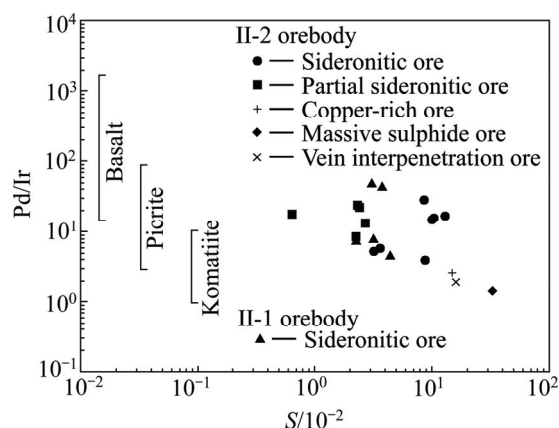


图5 金川矿体 $Pd/Ir-S$ 图(底图据文献[28])

Fig. 5 $Pd/Ir-S$ diagram of Jinchuan ore body (based on Ref. [28])

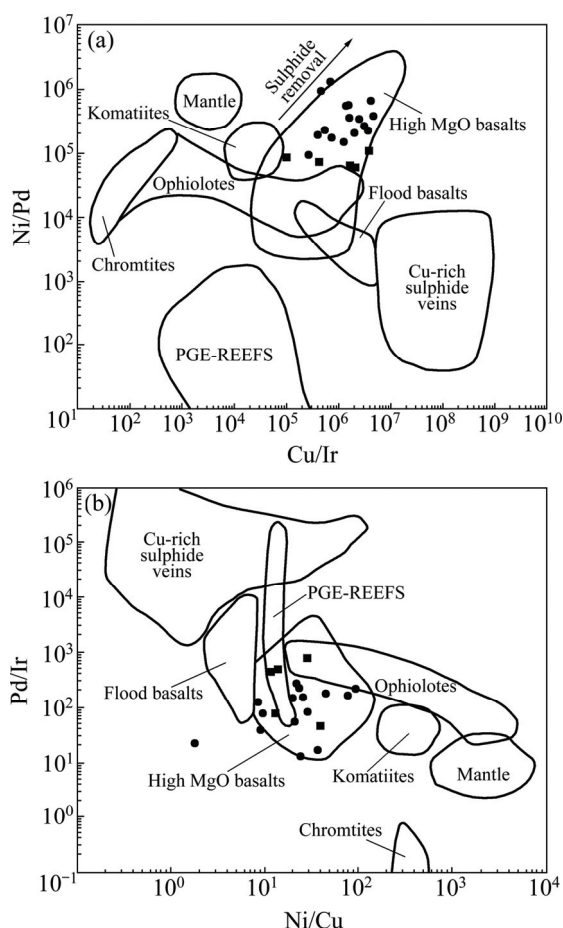


图6 金川矿体 $Cu/Ir-Ni/Pd$ 和 $Ni/Cu-Pd/Ir$ 图^[9]

Fig. 6 $Cu/Ir-Ni/Pd$ and $Ni/Cu-Pd/Ir$ diagram of Jinchuan ore body^[9] (■ II-1 orebody's sideronitic ore; ● II-2 orebody's sideronitic ore and partial sideronitic ore)

4.2 中途岩浆房演化特征

由图3可知,II-2号矿体与II-1号矿体的海绵陨铁状矿石的配分曲线有明显区别:①II-2号矿体的配

分曲线一致性较高,而II-1号矿体海绵陨铁状矿石配分曲线可以分为2类,一类IPGE明显亏损,另一类整体曲线较为平坦,但是其凹凸的形式又相似;②II-2号矿体 δIr 均小于1,平均值为0.745,表现为Ir负异常,而II-1号矿体Ir为正异常,其 δIr 均大于1,平均值为1.700;③II-2号矿体 δRu 介于0.435~1.041之间,平均值为0.697,而II-1号矿体Ru处有一个明显的下凹趋势, δRu 介于0.121~0.447之间,平均值为0.267,可见II-2号矿体Ru的负异常程度明显小于II-1号矿体。综合上述3点,可以认为形成II-2号、II-1号矿体的岩浆应该经历过不同的演化史。

当原始岩浆进入岩浆房后,成矿物质可能会经历两个体系,首先为液态硫化物-硅酸盐岩浆体系,该体系是硫化物从硅酸盐岩浆中熔离出来,并在重力作用下向下聚集;另一个为单硫化物固溶体(MSS)-液态硫化物体系,这是在硫化物熔离出来后,随着温度的降低液态硫化物会分离结晶出单硫化物固溶体^[33]。以下根据这两个体系来探讨II-2与II-1矿体矿浆的演化关系。

4.2.1 液态硫化物-硅酸盐体系

II-2号矿体海绵陨铁状矿石的Cu/Pd介于24595~412213之间,平均值为218253,而II-1号矿体海绵陨铁状矿石的Cu/Pd介于21696~91091之间,平均值为47123,均远大于原始地幔中Cu/Pd值(6500),说明二者的母岩浆同样经历了强烈的硫化物熔离^[9, 34]。在Pd-Cu/Pd图解中(见图7)II-2号矿体与II-1号矿体的海绵陨铁状矿石均位于PGE亏损地幔中^[35],表明II-2号矿体和II-1号矿体的成矿母岩体在深部岩浆房中均

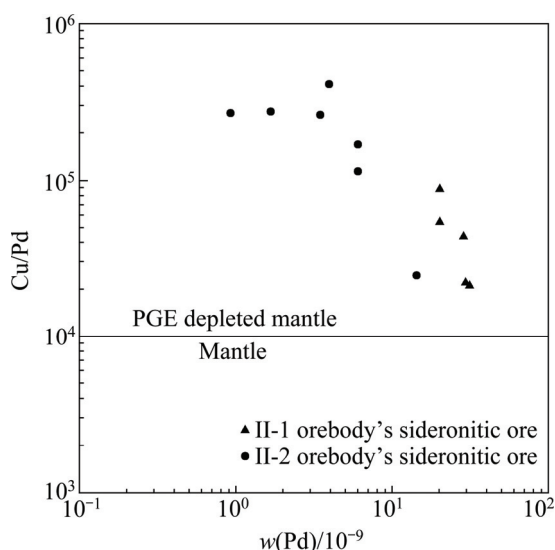


图7 金川岩体Pd-Cu/Pd图解(底图据文献[35])

Fig. 7 Pd-Cu/Pd diagram of Jinchuan rock mass (based on Ref. [35])

经历了硫化物的初步饱和,而亏损了PGEs^[36];而II-2号矿体的Cu/Pd明显高于II-1号矿体的,在图7中前者普遍位于后者的左上方,暗示二者硫化物是从PGE亏损程度不同的母岩浆中熔离出来的^[23, 35]。

II-2号矿体中海绵陨铁状矿石 $\Sigma\text{PGE}_{\text{sul}}$ (有此下标的表示经过100%硫化物计算的值)介于 235.4×10^{-9} ~ 1278.1×10^{-9} 之间,平均为 620.6×10^{-9} ;而II-1号矿体海绵陨铁状矿石 $\Sigma\text{PGE}_{\text{sul}}$ 介于 2774.0×10^{-9} ~ 9987.9×10^{-9} 之间,平均值为 5076.7×10^{-9} ;II-2号矿体 $\Sigma\text{IPGE}_{\text{sul}}$ 和 $\Sigma\text{PPGE}_{\text{sul}}$ 的平均值分别为 110.8×10^{-9} 和 509.8×10^{-9} ,而II-1号矿体平均值分别为 509.5×10^{-9} 和 4566.9×10^{-9} ,很明显同是海绵陨铁状矿石,PGE_{sul}总含量II-1号矿体是II-2号的数倍,但是二者的 $\Sigma\text{IPGE}_{\text{sul}}$ 含量区别较小,总量上的区别主要体现在 $\Sigma\text{PPGE}_{\text{sul}}$ 上。可见,虽然均是由PGE亏损的玄武岩演化而成,但相对于II-2号矿体,II-1号矿体较富集铂族元素,特别是PPGE,Cu与Ni相比富集Cu。由FLEET等^[37]的研究表明,在液态硫化物-硅酸盐体系中,虽然Cu、Ni及铂族元素均极易进入液态硫化物相中,但其分配系数存在区别:Cu、Ni的分配系数远小于铂族元素的,且 D_{Cu} 大于 D_{Ni} , D_{Pt} 、 D_{Pd} 大于 D_{Os} 、 D_{Ir} 、 D_{Ru} 、 D_{Rh} 。所以,虽然随着硫化物的不断熔离,在剩余岩浆中无论Cu、Ni还是铂族元素,其含量均会不断降低,但分配系数较高的元素相对于分配系数较低的元素下降速度更快^[2]。因此,较之而言熔离出II-2号矿体硫化物的母岩浆此前经历过更多的硫化物熔离,而造成了更强烈的在液态硫化物-硅酸盐体系中分配系数较高元素的亏损。

由于II-2号矿体和II-1号矿体的母岩浆的源区特征相同,因此造成这差异的原因很可能与形成II-2号矿体的岩浆晚于II-1号矿体的岩浆从原始岩浆中分离出来,多经历了一次硫化物的熔离作用有关。在图6(a)中,样品点的演化趋势与硫化物熔离趋势相似,且II-1号矿体的样品的Ni/Pd值明显小于II-2号矿体的,位于硫化物熔离曲线的始端,同样印证了该观点,至于二者Cu/Ir的差异不大的原因,在4.2.2节中将会进行讨论。

4.2.2 单硫化物固溶体-液态硫化物体系

铂族元素、Cu和Ni在液态硫化物-硅酸盐岩浆和单硫化物固溶体-液态硫化物这两个体系中有不同的性质。在液态硫化物-硅酸盐岩浆体系中,铂族元素及Cu和Ni均趋向于在液态硫化物中富集;而在单硫化物固溶体-液态硫化物体系中,元素性质较为复杂,随着氧逸度、硫逸度、温度的变化其分配系数也会发生改变,但是Cu、Pt和Pd始终表现为强不相容性,

Ir、Rh 和 Ru 始终表现为相容性^[38-39]。

因此, 根据在这两个体系中元素的性质差异, 做 $\text{Ir}_{\text{sul}}\text{-Pt}_{\text{sul}}$ 、 $\text{Ir}_{\text{sul}}\text{-Pd}_{\text{sul}}$ 、 $\text{Ir}_{\text{sul}}\text{-Rh}_{\text{sul}}$ 和 $\text{Ir}_{\text{sul}}\text{-Ru}_{\text{sul}}$ 的关系图(见图 8)。如图 8 所示, II-2 号矿体的海绵陨铁状和局部海绵陨铁状矿石 Ir_{sul} 与 Pt_{sul} 、 Pd_{sul} 、 Rh_{sul} 和 Ru_{sul} 均表现为良好的正相关性, $\text{Ir}_{\text{sul}}\text{-Pt}_{\text{sul}}$ 斜率最大, 反映了在液态硫化物-硅酸盐岩浆中 Pt 为分配系数最高的元素, 因此当海绵陨铁状及局部海绵陨铁状矿石的矿浆侵位时, 在形成 II-2 号矿体的岩浆通道中的液态硫化物没有分离结晶出单硫化物固溶体, 还没有演化到单硫化物固溶体-液态硫化物体系, 这同王亮等^[40]根据 II-2 号矿体海绵陨铁状矿石和侵染状矿石的亲铜元素与 Pd/Ir 比值相关图得出的结论相一致; 而 II-1 号矿体海绵陨铁状矿石的 Ir_{sul} 与 Pt_{sul} 呈负相关、 Ir_{sul} 与 Pd_{sul} 关系也与 II-2 号矿体明显不同呈轻微的负相关, Ir_{sul} 与 Ru_{sul} 、 Rh_{sul} 仍然为正相关, 正体现了在单硫化物固溶

体-液态硫化物体系中 Pt、Pd 与 Ir、Ru 和 Rh 不同的性质。因此, 在岩浆通道中岩浆演化出形成海绵陨铁状矿石矿浆, 并向上侵位的这个阶段, 形成 II-1 号矿体的岩浆比形成 II-2 号矿体的岩浆演化彻底, 前者的岩浆通道中已经演化出了单硫化物固溶体。由于单硫化物固溶体在深部岩浆房形成, 在单硫化物固溶体-液态硫化物体系中表现出相容性属性的元素会在液态硫化物中亏损, 这也就造成了 II-1 号矿体与 II-2 号矿体矿石相比, Pd/Ir、Cu/Ir 未显示如 Ni/Pd 这样的分异特征原因(见图 6(a)), 因为在单硫化物固溶体-液态硫化物体系中, II-1 号矿体母岩浆中的部分 Ir 优先赋存到了单硫化物固溶体中, 造成液态硫化物中 Ir 的相对亏损, 这样其与 II-2 号矿体母岩浆在液态硫化物-硅酸盐体系中形成的 Pd/Ir、Cu/Ir 差异, 又被拉平了。苏尚国等^[33]研究表明, II-2 号矿体的块状矿石为单硫化物固溶体结晶分异后聚集而成的, 故在形成 II-2 号

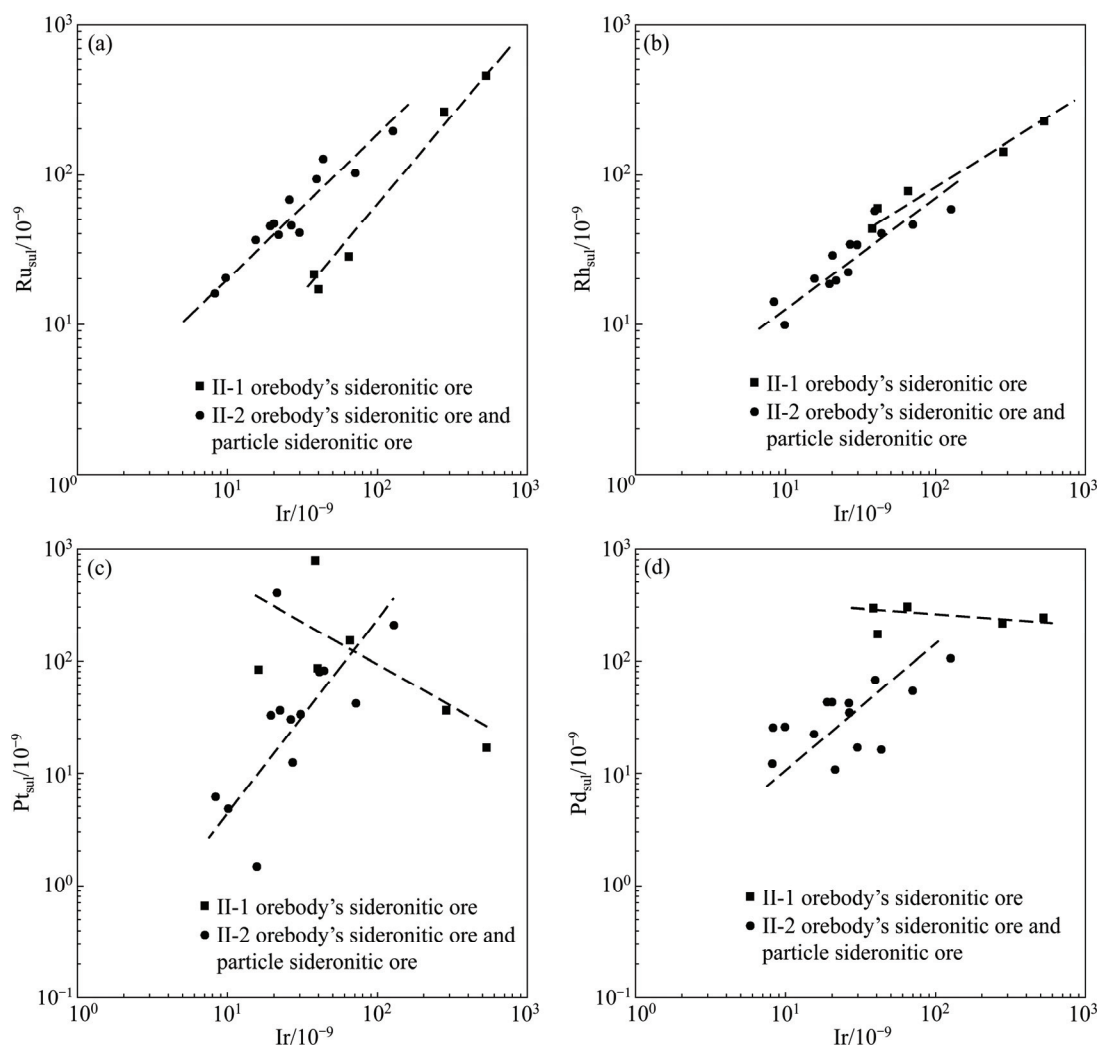


图 8 金川 1 号及 2 号矿体矿石 Ir 与 Ru、Rh、Pt、Pd 的 100%硫化物相关图

Fig. 8 100% sulfide correlograms of Ir-Ru (a), Ir-Rh (b), Ir-Pt (c) and Ir-Pd (d) in Orebody II-1 and Orebody II-2 of Jinchuan deposit

矿体的岩浆通道中,当形成海绵陨铁状矿体的矿浆形成并侵位后,深部岩浆房中剩余的硫化物继续演化,分离结晶出了单硫化物固溶体。

4.3 侵位特征

由 4.2 节已经知道, II-2 号矿体中的硫化物晚于 II-1 号矿体的硫化物从母岩浆中熔离出来,并且熔离后的演化具有不同步性。对于这种现象,可能有两种不同的解释,其一是这种先后熔离作用是在侵位到最终的空间(也就是现在金川矿体的位置)后发生的,由于 II-1 号矿体的位置较之于 II-2 号矿体更靠近岩浆通道中心,因此成矿母岩浆先熔离出了 II-1 号矿体的成矿元素及硫化物,而后再融离出 II-2 号矿体的;另一种解释是,这种先后的熔离作用发生在深部岩浆房,而后形成 II-1 号矿体和 II-2 号矿体的母岩浆分别进入不同的岩浆通道,由不同的岩浆通道中心侵位到最终成矿空间造成的。

顺着 II-2 号矿体的走向,在 F_{17} 断层的西侧和东侧分别制作局部海绵陨铁状矿石和海绵陨铁状矿石的铂族元素、 Cu_{sul} 、 Ni_{sul} 及特征比值的地球化学剖面图

(均换算到 100%硫化物),其中图 9(a)、(c)、(e)、(g)和(i)所示分别为 F_{17} 断层西侧的局部海绵陨铁状矿石,图 9(b)、(d)、(f)、(h)和(j)所示分别为 F_{17} 断层东侧的海绵陨铁状矿石,图中横坐标为采样点投影于与勘探线垂直的直线上后各采样点的相对距离,而横坐标的 0 m 位置为最靠近 F_{17} 断层的采样点位置。在图 9(a)~(f)中,无论是铂族元素 Pt 亚族中的 Pd_{sul} 、 Pt_{sul} , Ir 亚族中的 Ir_{sul} 、 Rh_{sul} , 还是 Cu_{sul} 、 Ni_{sul} , 在矿体的走向上并不存在规律性变化;已知 $(Pt+Pd)/(Os+Ir+Ru)$ 、 Cu/Ni 以及 Cu/Pd 这 3 个比值,可以反映硫化物析出的早晚^[41],在图 9(g)~(j)中,沿着矿体的走向同样未表现出明显的变化规律。因此,成矿岩浆在侵位到最终的成矿空间后,沿着矿体走向或者说沿着超基性岩墙的走向硫化物中的成矿元素并没有明显的分异现象,故第一种解释不是引起 II-1 号矿体和 II-2 号矿体铂族元素差异的主要原因。

I、II 矿区的结合部(II 矿区西北侧)被公认为是一个岩浆通道入口^[7-8, 19, 22],在 Cu、Ni 品位 XOY 平面投影等值线图 and 纵剖面投影等值线图中(见图 10)(为了真实地反映成矿时成矿元素分布形态,该图已依据

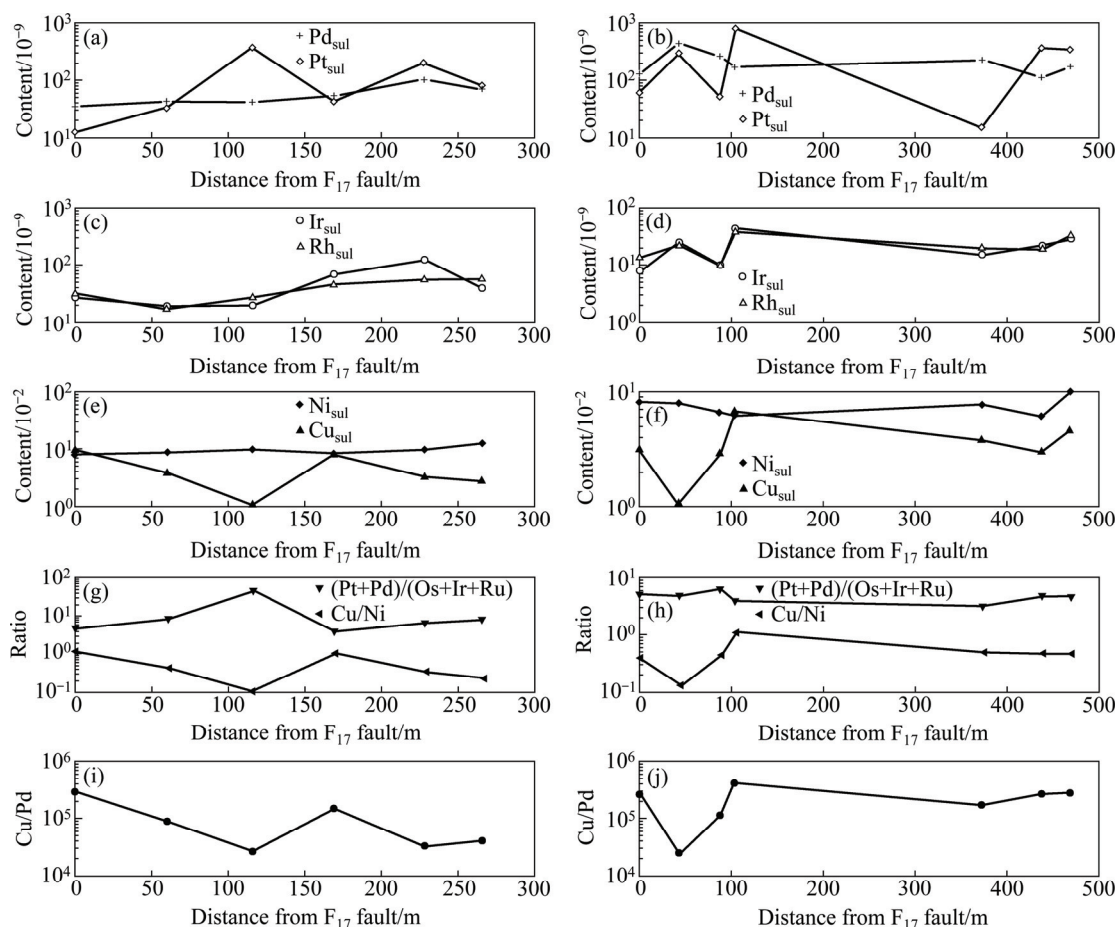


图 9 II-2 矿体铂族元素、Cu、Ni 及其比值的变化趋势

Fig. 9 Variation of PGEs, Cu, Ni and ratios in II-2 orebody

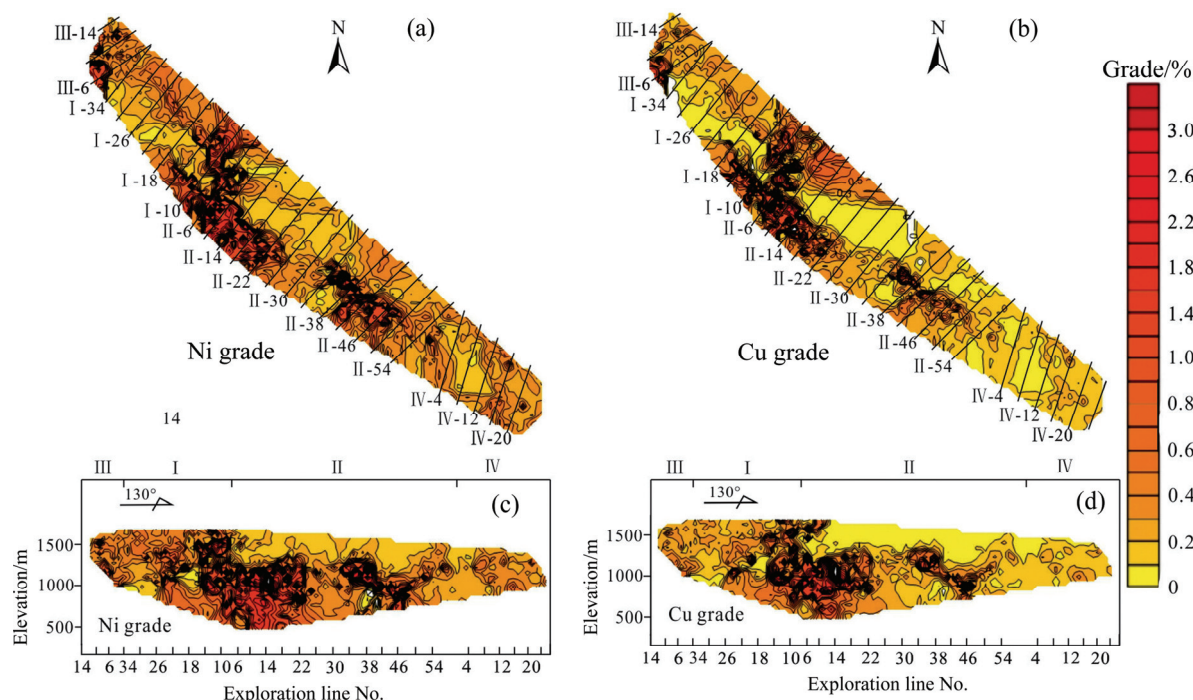


图 10 II、IV 矿区 Ni、Cu 品位 XOY 平面投影等值线图 and 纵剖面投影等值线图

Fig. 10 Contour map of XOY plane projection ((a), (b)) and longitudinal section projection ((c), (d)) of Ni and Cu grade in II and IV mining area

文献[20]还原了 F_8 、 F_{16} 、 F_{17} 、 F_{23} 断层在成矿后对矿体的破坏, 因此部分勘探线发生了重合), 在 I、II 矿区的结合部(I-18 行~II-22 行)Ni、Cu 均具有一个明显的高值区(见图 10(a)、(b)), 且在纵剖面投影等值线图中(见图 10(c)、(d)), II-6 行~II-14 行间存在一个由异常高值组成从深部升到浅部, 然后分叉的现象, 形象地显示了岩浆通道中心部位的岩浆涌入, 并向四周扩散。与之对应的, 在 II-2 矿体中部的 II 34 行~II 50 行间, Ni 与 Cu 同样有这样一个高值区(见图 10), 在 XOY 平面投影等值线图中(见图 10(a)和(b))该高值区呈带状, 并未同 I、II 矿区的结合部的高值区连接在一起, 且在纵剖面投影等值线图中(见图 10(c)和(d))II 42 行~II 50 行附近的高值区也具有由深到浅, 然后分叉的现象, 显示在该区域存在另一个岩浆通道入口。本研究中, 在 II-2 号矿体中部同样发现了与 I、II 矿区结合部产出的 6 行富铜隐伏矿相类似的富铜矿体, 同样印证了该观点。曾认宇等^[32]通过对比 II-1、II-2 两个矿体的主微量元素的特征, 发现二者的母岩浆本是在同一岩浆通道中演化, 受到地壳混染后, 在冷凝过程中发生了分离, 而后在横向上并列的两个岩浆通道中分别演化并成矿。综上可知, 造成 II-1、II-2 两个矿体铂族元素差异的熔离作用发生在深部岩浆

房, 分离后两个矿体的母岩浆各自演化, 并由 II-2 矿体中部和 I、II 矿区结合部的两个岩浆通道入口侵入到现存空间。

5 结论

1) II-2 号矿体主要由海绵陨铁状及局部海绵陨铁状矿石组成, 而在 II-2 矿体中部的 F_{17} 断层附近发育有富铜矿石、含细脉状矿石及块状硫化物矿石。除富铜矿石 ΣPGE 含量高达 8580.9×10^{-9} 外, 远高于其余矿石的 $\Sigma\text{PGE}(44.6 \times 10^{-9} \sim 407.3 \times 10^{-9})$; ΣPPGE 与 ΣIPGE 比值介于 $0.5 \times 10^{-9} \sim 185.0 \times 10^{-9}$ 之间, 除块状硫化物矿石和含细脉状矿石外, 其余均相对富集 PPGE 亚族; Pd/Ir 介于 1.25~26.55 之间, 属于岩浆型矿石。

2) II-2 号矿体块状硫化物矿体与富铜矿体直接接触, 为岩浆演化到后期不同期次侵入形成的, 而富铜矿晚于块状硫化物矿; 含细脉状矿石与块状硫化物矿石有极为相似的铂族元素特征, 是形成块状硫化物矿石的岩浆沿早期形成的矿石裂隙贯入而成; 海绵陨铁状矿石与局部海绵陨铁状矿石的配分曲线相似, 且

为过渡的接触关系,显示二者为同一期次矿浆侵位的产物。

3) 形成Ⅱ-2号矿体与形成Ⅱ-1号矿体的岩浆具有相同的母岩浆性质及源区特征,为地幔中等熔融形成的高MgO苦橄质玄武岩浆,并共同经历了Pt-Fe合金的分离和硫化物的初步熔离,但是二者具有不同的演化历史。形成Ⅱ-2号矿体的岩浆是由深部岩浆房中初步熔离出Ⅱ-1号矿体的部分硫化物后,成矿元素再次亏损的上层岩浆分离出来的,而后相对富集成矿元素的形成Ⅱ-1号矿体的岩浆与形成Ⅱ-2号矿体的岩浆在两条平行的岩浆通道中演化,最终分别由位于Ⅱ-2矿体中部和Ⅰ、Ⅱ矿区结合部的两个岩浆通道入口侵位到最终成矿空间,形成了Ⅱ-1号与Ⅱ-2号矿体。这两个岩浆通道演化形式基本相同,但不完全同步的,当海绵陨铁状矿石的这一期矿浆形成并侵位时,在中途岩浆房中,形成Ⅱ-1号矿体的岩浆通道中已经演化出了单硫化物固溶体;而形成Ⅱ-2号矿体的岩浆通道中,单硫化物固溶体是在这期矿浆侵位后演化而成。

4) 富铜矿和块状硫化物矿为最晚侵位的矿石类型,在时间上和空间上都有密切的联系;本次研究首次报导了在Ⅱ-2矿体中部F₁₇断层附近的块状硫化物矿体中发现了富铜矿体,但是相对于Ⅱ-1和Ⅰ-24号矿体来说,还未发现成规模的富铜矿体,因此在大量出现块状硫化物矿体的Ⅱ-2号矿体中部寻找富铜矿体,具有很好的找矿前景。而对岩浆通道系统成矿的矿床来说,顺着岩浆通道中心的位置向下探矿是最佳的方式,Ⅱ-2号矿体中部的这条岩浆通道还未引起人们的足够重视,其具有很好的勘探前景。

致谢: 野外工作期间得到金川集团股份有限公司王玉山、李德贤、陈兴义等同志的大力支持,张维、陶斤金、刘羽、鞠培娇等同学参加了部分工作,并得到了编辑和两位匿名外审专家的指导,在此谨向上述单位及个人表示诚挚的谢意!

REFERENCES

- [1] 陈列猛, 宋谢炎, DANYUSHEVSKY L V, 肖加飞, 朱 丹, 周国富, 官建祥, 刘世荣, 郑文勤. 金川岩体母岩浆成分及其分离结晶过程的熔浆热力学模拟[J]. 地质学报, 2009, 83(9): 1302-1315.
CHEN Lie-meng, SONG Xie-yan, DANYUSHEVSKY L V, XIAO Jia-fei, ZHU Dan, ZHOU Guo-fu, GUAN Jian-xiang, LIU Shi-rong, ZHENG Wen-qing. Correlation between Ni and MgO contents of olivine in Segment I of the Jinchuan intrusion, NW China, and its geological implication[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 83(9): 1302-1315.
- [2] 宋谢炎, 胡瑞忠, 陈列猛. 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[J]. 地质前缘, 2009, 16(4): 287-305.
SONG Xie-yan, HU Rui-zhong, CHEN Lie-meng. 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[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(4): 287-305.
- [3] NALDRETT A J, LIGHTFOOT P C, FEDORENKO V, DOHERTY W, GORBACHEV N S. Geology and geochemistry of intrusions and flood basalts of the Noril'sk region, USSR, with implications for the origin of the Ni-Cu ores[J]. Economic Geology, 1992, 87(4): 975-1004.
- [4] 汤中立, 钱壮志, 姜常义, 闫海卿, 焦建刚, 刘民武, 徐章华, 徐 刚, 王亚磊. 岩浆硫化物矿床勘查研究的趋势与小岩体成矿系统[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(1): 1-9.
TANG Zhong-li, QIAN Zhuang-zhi, JIANG Chang-yi, YAN Hai-qing, JIAO Jian-gang, LIU Min-wu, XU Zhang-hua, XU Gang, WANG Ya-lei. Trends of research in exploration of magmatic sulfide deposits and small intrusions metallogenic system[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(1): 1-9.
- [5] 戴塔根, 尹学朗, 张德贤. 喀拉通克铜镍矿成岩成矿模式[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(9): 2567-2573.
DAI Ta-gen, YIN Xue-lang, ZHANG De-xian. Diagenetic and metallogenic model of Kalatongke Cu-Ni deposit[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(9): 2567-2573.
- [6] 闫海卿, 王 强, 胡彦强, 吴君平, 贾慧敏, 谭雨婷. 金川铜镍硫化物岩浆矿床前锋岩浆与岩浆通道[J]. 中国地质, 2013, 40(3): 807-819.
YAN Hai-qing, WANG Qiang, HU Yan-qiang, WU Jun-ping, JIA Hui-min, TAN Yu-ting. Striker magma and magma channel in the Jinchuan copper-nickel sulfide magmatic deposit[J]. Geology in China, 2013, 40(3): 807-819.
- [7] 田毓龙, 包国忠, 汤中立, 王玉山. 金川铜镍硫化物矿床岩浆通道型矿体地质地球化学特征[J]. 地质学报, 2009, 83(10): 1515-1525.
TIAN Yu-long, BAO Guo-zhong, TANG Zhong-li, WANG Yu-shan. Geological and geochemical characteristics of the magma conduit-type orebodies of Jinchuan Cu-Ni sulfide deposit[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(10): 1515-1525.
- [8] 宋谢炎, 李世彬, 王玉山, 把多恒, 陈列猛. 含矿岩浆通道对于岩浆铜镍硫化物矿床找矿工作的意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2005, 24(4): 293-298.
SONG Xie-yan, LI Shi-bin, WANG Yu-shan, BA Duo-heny, CHEN Lie-meng. Significance of conduit of sulfide-bearing magma for exploration of magmatic sulfide deposit[J]. Bulletin

- of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2005, 24(4): 293–298.
- [9] BARNES S J, BOYD R, KORNELIUSSEN A, NILSSON L P, OFTEN M, PEDERSEN R B, ROBINS B. The use of mantle normalization and metal ratios in discriminating between the effects of partial melting, crystal fractionation and sulphide segregation on platinum-group elements, gold, nickel and copper: examples from Norway[M]. *Geo-platinum 87*. Netherlands: Springer, 1988: 113–143.
- [10] 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 龙灵利, 廖震, 张会琼, 唐萍芝. 新疆北部镁铁-超镁铁质岩的 PGE 成矿问题[J]. *地学前缘*, 2010, 17(1): 137–152.
- WANG Yu-wang, WANG Jing-bin, WANG Li-juan, LONG Ling-li, LIAO Zhen, ZHANG Hui-qiong, TANG Ping-zhi. PGE metallogenesis related to mafic-ultramafic complex in North Xinjiang[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(1): 137–152.
- [11] 卢宜冠, 赵凯, 熊伊曲, 李坡, 杜达洋, 袁明伟. 滇西金宝山铂钯矿床元素地球化学[J]. *岩石学报*, 2014, 30(9): 2681–2694.
- LU Yi-guan, ZHAO Kai, QIONG Yi-qu, LI Po, DU Da-yang, YUAN Ming-wei. Elements geochemistry of Jinbaoshan Pt-Pd deposit, western Yunnan, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(9): 2681–2694.
- [12] 徐刚. 甘肃北山地区黑山铜镍硫化物矿床成矿作用研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- XU Gang. The minerogenesis of Heishan Nickel-Copper sulfide deposit, Gansu Beishan, Chian[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [13] 柴凤梅, 夏芳, 陈斌, 卢鸿飞, 王恒, 李军, 严玉圃. 新疆北山地区两个含铜镍镁铁-超镁铁质岩体铂族元素地球化学研究[J]. *地质学报*, 2013, 87(4): 474–485.
- CHAI Feng-mei, XIA Fang, CHEN Bin, LU Hong-fei, WANG Heng, LI Jun, YAN Yu-pu. Platinum group elements geochemistry of two mafic-ultramafic intrusions in the Beichan Block, Xinjiang, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(4): 474–485.
- [14] 汤中立, 闫海卿, 焦建刚, 潘振兴. 中国小岩体镍铜(铂族)矿床的区域成矿规律[J]. *地学前缘*, 2007, 14(5): 92–103.
- TANG Zhong-li, YAN Hai-qing, JIAO Jian-gang, PAN Zhen-xing. Regional metallogenic controls of small- intrusion-hosted Ni- Cu(PGE) ore deposits in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(5): 92–103.
- [15] 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: 1–205.
- TANG Zhong-li, LI Wen-yuan. Mineralization model and geology of the Jinchuan PGE-bearing deposit[M]. Beijing: Geological publishing House, 1995: 1–205.
- [16] LI C, RIPLEY E M. The giant Jinchuan Ni-Cu-(PGE) deposit; tectonic setting, magma evolution, ore genesis, and exploration implications[J]. *Reviews in Economic Geology*, 2011, 17: 163–180.
- [17] SONG X Y, DANYUSHEVSKY L V, KEAYS R R, CHEN L M, WANG Y S, TIAN Y L, XIAO J F. Structural, lithological, and geochemical constraints on the dynamic magma plumbing system of the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, NW China[J]. *Mineralium Deposita*, 2012, 47(3): 277–297.
- [18] SONG X Y, KEAYS R R, ZHOU M F, QI L, IHLENFELD C, XIAO J F. 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.
- [19] 曾认宇, 赖健清, 毛先成. 金川铜镍硫化物矿床岩浆通道系统的成矿模式[J]. *矿产与地质*, 2013, 27(4): 276–282.
- ZENG Ren-yu, LAI Jian-qing, MAO Xian-cheng. Metallogenic model of magma conduit system of Jinchuan Cu-Ni sulfide deposit[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2013, 27(4): 276–282.
- [20] 余伟健, 高谦, 张周平, 靳学奇, 邓代强. 构造带围岩特性实验及流变规律分析[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2009, 40(4): 1086–1091.
- YU Wei-jian, GAO Qian, ZHANG Zhou-ping, JIN Xue-qi, DENG Dai-qiang. Characteristics experimental of surrounding rock mass in tectonic zone and its rheological law analysis[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2009, 40(4): 1086–1091.
- [21] 曾认宇, 赖健清, 毛先成, 陶斤金. 金川铜镍矿床中断裂系统的形成演化及对矿体的控制[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(9): 2574–2583.
- ZENG Ren-yu, LAI Jian-qing, MAO Xian-cheng, TAO Jin-jin. Evolution of fault system and its controlling on Jinchuan Cu-Ni(PGE) sulfide deposit[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(9): 2574–2583.
- [22] 高亚林, 汤中立, 宋谢炎, 田毓龙, 孟远志. 金川铜镍矿床隐伏富铜矿体成因研究及其深部找矿意义[J]. *岩石学报*, 2009, 25(12): 3379–3395.
- GAO Ya-lin, TANG Zhong-li, SONG Xie-yan, TIAN Yu-long, MENG Yuan-zhi. Study on genesis of the conealed Cu-rich ore body in the Jinchuan Cu-Ni deposit and its prospecting in depth[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(12): 3379–3395.
- [23] MAIER W D, BARNES S J, TEIGLER B, MITCHELL A A. Cu/Pd and Cu/Pt of silicate rocks in the Bushveld Complex: Impications for platinumgroup element exploration[J]. *Economic Geology*, 1996, 91(6): 1151–1158.
- [24] MCDONOUGH W F, SUN S S. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3–4): 223–253.
- [25] GARUTI G, FERSHTALER G, BEA F, MONTERO P, PUSHKAREV E V, ZACCARINI F. 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.
- [26] 徐 刚, 汤中立, 钱壮志, 范 新, 肖庆华, 苏本勋. 金川镍铜铂硫化物矿床矿石成因——来自铂族元素地球化学的证据[J]. *世界地质*, 2012, 31(3): 493–504.
- XU Gang, TANG Zhong-li, QIAN Zhuang-zhi, JIAO Jian-gang, WEI Xiang, WANG Shuo. Ores genesis in Jinchuan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit: Evidence from geochemistry of platinum group elements[J]. *Global Geology*, 2012, 31(3): 493–504.
- [27] NALDRETT A J. Nickel sulfides deposits: Classification, composition and genesis[J]. *Economic Geology*, 1981, 75: 628–685.
- [28] CHEN L M, SONG X Y, KEAYS R R, TIAN Y L, WANG Y S, DENG Y F, XIAO J F. Segregation and fractionation of magmatic Ni-Cu-PGE sulfides in the Western Jinchuan intrusion, Northwestern China: Insights from platinum group element geochemistry[J]. *Economic Geology*, 2013, 108(8): 1793–1811.
- [29] NALDRETT A J. Magamtic sulfide deposit: Geology, geochemisty and exploration[J]. Berlin: Springer, 2004, 137–277.
- [30] LIGHTFOOT P C, KEAYS R R. Siderophile and chalcophile metal variations in flood basalts from the Siberian trap, Noril'sk region: Implications for the origin of the Ni-Cu-PGE sulfide ores[J]. *Economic Geology*, 2005, 100(3): 439–462.
- [31] 柴凤梅, 夏 芳, 陈斌, 卢鸿飞, 王 恒, 李 军, 严玉圃. 新疆北山地区两个含铜镍镁铁—超镁铁质岩体铂族元素地球化学研究[J]. *地质学报*, 2013, 87(4): 474–485.
- CHAI Feng-mei, XIA Fang, CHEN Bin, LU Hong-fei, WANG Heng, LI Jun, YAN Yu-pu. Platinum group elements geochemistry of two-mafic-ultramafic intrusions in the Beishan block, Xinjiang, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(4): 474–485.
- [32] 曾认宇, 赖健清, 毛先成, 艾启兴, 岳斌. 金川铜镍硫化物矿床两个主要矿体的母岩浆在岩浆演化过程中的关系[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(3): 761–775.
- ZENG Ren-yu, LAI Jian-qing, MAO Xian-cheng, AI Qi-xing, YUE Bin. Relationship between two kinds of parental magma of main orebodies during magma evolution in Jinchuan Cu-Ni(PGE) sulfide deposit, China[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(3): 761–775.
- [33] 苏尚国, 汤中立, 周 岱. 金川含矿超镁铁岩侵入体侵位序列[J]. *地学前缘*, 2010, 17(2): 118–126.
- SU Shang-guo, TANG Zhong-li, ZHOU Dai. Emplacement sequence in the Jinchuan sulfide ore-bearing ultramafic intrusion, western China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(2): 118–126.
- [34] MAIER W D, BARNES S J, DE WAAL S A. Exploration for magmatic Ni-Cu-PGE sulphide deposits: A review of recent advances in the use of geochemical tools, and their application to some South African ores[J]. *South African Journal of Geology*, 1998, 101(3): 237–253.
- [35] BARNES S J, COUTURE J F, SAWYER E W, BOUCHAIB C. 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[J]. *Economic Geology*, 1993, 88(6): 1402–1418.
- [36] 苟体忠, 钟 宏, 朱维光, 漆 亮, 冷成彪, 吴孔文. 川西冷水箐 Cu-Ni 硫化物矿床的 PGE 和 Re-Os 同位素地球化学特征及成矿意义[J]. *岩石学报*, 2010, 26(11): 3363–3374.
- GOU Ti-zhong, ZHONG Hong, ZHU Wei-guang, QI Liang, LENG Cheng-biao, WU Kong-wen. Geochemical characteristics of platinum-group elements and Re-Os isotope of the Lengshuiqing Cu-Ni sulfide deposit in western Sichuan Province and implications for mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(11): 3363–3374.
- [37] FLEET M E, CROCKET J H, LIU M, STONE W E. Laboratory partitioning of platinum-group elements (PGE) and gold with application to magmatic sulfide-PGE deposits[J]. *Lithos*, 1999, 47(1–2): 127–142.
- [38] MUNGALL J E, ANDREWS D A, CABRI L J. Partitioning of Cu, Ni, Au, and platinum-group elements between monosulfide solid solution and sulfide melt under controlled oxygen and sulfur fugacities[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(17): 4349–4360.
- [39] 孙 赫, 唐冬梅, 秦克章, 范 新, 肖庆华, 苏本勋. 亲铜元素的地球化学行为研究进展及其在岩浆硫化物矿床中的应用[J]. *地质论评*, 2009, 55(6): 840–850.
- SUN He, TANG Dong-mei, QIN Ke-zhang, FAN Xin, XIAO Qing-hua, SU Ben-xun. Advances of geochemical behavior of chalcophile elements and applocations in metallogeny of magmatic Cu-Ni-PGE sulfide deposits[J]. *Geological Review*, 2009, 55(6): 840–850.
- [40] 王 亮, 陈列锰, 宋谢炎, 江金进, 符志强, 王玉山, 潘小平. 金川铜镍硫化物矿床 2 号矿体铂族及亲铜元素地球化学特征[J]. *矿床地质*, 2014, 33(4): 727–741.
- WANG Liang, CHEN Lie-meng, SONG Xie-yan, JIANG Jin-jin, FU Zhi-qiang, WANG Yu-shan, PAN Xiao-ping. Geochemical characteristics of platinum-group and chalcophile elements in No.2 orebody of Jinchuan Cu-Ni sulfide deposit[J]. *Mineral Deposits*, 2014, 33(4): 727–741.
- [41] 王瑞廷, 毛景文, 赫 英, 王东生, 汤中立. 金川超大型铜镍硫化物矿床的铂族元素地球化学特征[J]. *大地构造与成矿学*, 2004, 28(3): 279–286.
- WANG Rui-ting, MAO Jing-wen, HE Ying, WANG Dong-sheng, TANG Zhong-li. Geochemical characteristics of platinum group elements in Jinchuan super-large sulfide copper-nickel deposit, Jinchang city, Gansu Province, China[J]. *Geotectonica Et Metallogenia*, 2004, 28(3): 279–286.

Distinction of platinum group elements geochemistry in Jinchuan Cu-Ni sulfide deposit and its implication for magmatic evolution

ZENG Ren-yu^{1,2}, LAI Jian-qing^{1,2}, MAO Xian-cheng^{1,2}, ZHAO Yin^{1,2},
LIU Pin^{1,2}, ZHU Jia-wei^{1,2}, YUE Bin³, AI Qi-xing³

- (1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals,
Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
3. Nickel Cobalt Research and Design Institute, Jinchuan Group Co., Ltd., Jinchang 737104, China)

Abstract: The II-2 orebody, which is located in the east of line II 30, is the second largest orebody of Jinchuan Cu-Ni (PGE) sulfide deposit. In order to find out the particularity of parental magma of II-2 orebody during evolution, the contents of platinum group elements(PGE), Cu, Ni and S in II-2 orebody were analyzed by using nickel sulphide fire assay technique ICP-MS. Its characteristics were researched and compared with that of II-1 orebody. Σ PGE contents of the II-2 orebody have large variation range (44.6×10^{-9} – 8526.7×10^{-9}). The data of Pd/Ir, which ranges from 1.25 to 26.55, indicates that the II-2 orebody is of magmatic origin. Sideronitic ore and partial sideronitic ore, which are the main ore types, have similar distribution patterns. Besides, sideronitic ore and partial sideronitic ore show gradual transition contact, which illustrates that the two ore types are products of the same emplacement period. Copper-rich ore, massive sulphide ore and vein interpenetration ore have complementary relations in the PGE distribution pattern diagram, and there is a clear distinction among these three ore types, sideronitic ore and partial sideronitic ore. The Σ PGE(8526.7×10^{-9}) and Cu/Ni(5.46) of copper-rich ore are extremely high, and massive sulphide ore and vein interpenetration ore have the feature of relative accumulation of the IPGE (Σ PPGE/ Σ IPGE < 1). Therefore, copper-rich ore, massive sulphide ore and vein interpenetration ore are formed in the late stage of magmatic evolution, and the contact relationship shows that emplacement of massive sulphide ore precedes copper-rich ore. Based on comparison of sideronitic ores' PGE, Cu and Ni features between II-2 and II-1 orebodies, parental magmas of these two ore bodies belong to high-MgO type tholeiitic basalt formed by moderate partial melting of mantle and have the same source characteristics. PGE distribution patterns, PGEs differentiation situation, Cu/Ni and Cu/Pd, and the relationship of Ir and Ru, Rh, Pt and Pd of sideronitic ores were used to study the parental magma of II-2 and II-1 orebodies in terms of sulfide liquid-silicate system and MSS-sulfide liquid system, it might be possible to deduce that sulfides of the two ore bodies are successively separated from the parental magma, with out-of-step evolution features. Based on the studies on geochemical section of II-2 orebody, the contour map of longitudinal section projection and XOY plane projection of Ni and Cu grade, the separation processes of the two orebodies sulfide occur in deep-seated magma chamber and intrude the pre-existing tensional rupture through different magma conduit systems, forming II-2 and II-1 orebodies.

Key words: Jinchuan; Cu-Ni sulfide deposit; platinum-group elements; magma conduit; metallogenic process

Foundation item: Projects (41172297, 41472301) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2015-01-30; **Accepted date:** 2015-10-20

Corresponding author: LAI Jian-qing; Tel: +86-13875983805; E-mail: ljq@csu.edu.cn

(编辑 龙怀中)