

金川铜镍硫化物岩浆矿床前锋岩浆与岩浆通道

闫海卿¹ 王 强¹ 胡彦强² 吴君平³ 贾慧敏⁴ 谭雨婷¹

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 华东冶金地质勘查局 815 地质队, 安徽 巢湖 238000;
3. 安徽省地质环境监测总站, 安徽 合肥 230001; 4. 河南省地质矿产勘查开发局第一地质矿产调查院, 河南 洛阳 471000)

摘要: 金川铜镍矿床是世界第三大镍、铜硫化物岩浆矿床, 长期以来备受国内外矿床地质学家的关注。金川铜镍矿床 IV 矿区是金川矿床的有机组成部分, 由于品位低 (Ni 0.71%、Cu 0.48%) 并且隐伏于地下 140 m 以下, 生产与研究相对滞后。由于 F23 断裂构造的影响, 金川矿床勘查以来, 研究者均将其作为 II 矿区 2# 岩体的东延部分。最近的详查钻探工程获得了较系统的样品测试, 结果显示 IV 矿区含矿岩体是一个具有单独演化过程的独立含矿岩体, 其 Ni/Cu 比值远高于其他矿区各个岩体, PGE 强烈亏损, 并且“R”因子数值低 (30), 微量、稀土元素配分也显示出独立的、复杂的演化过程, 岩石结构与岩相变化显著, 具有典型的岩浆通道前锋岩浆的特点。文章通过对比金川矿床几个主要含矿岩体的成矿元素与 PGE 特征, 初步确定了金川铜镍硫化物成矿岩浆通道的空间位置, 指出了金川深部资源勘查的关键问题与勘查方向。

关键词: 前锋岩浆; 岩石化学; 岩浆通道; 金川 IV 矿区

中图分类号: P618.41; P588.11⁺³ **文献标志码:** A **文章编号:** 1000 - 3657(2013)03-0807-13

金川矿床是世界第三大镍、铜硫化物岩浆矿床^[1-3], 其岩体出露面积小 (1.34 km²), 矿化率高 (47.8%), 岩相特征突出^[4], 长期以来备受国内外矿床地质学家的关注。近年来研究成果显著, 多集中在成岩时代、成矿机制和地球化学方面, 并取得广泛共识。目前关于岩体侵位机制和侵位过程仍然存在较大争议^[5-8], 争议的焦点主要集中在金川岩浆铜镍硫化物矿床的现存空间是岩浆通道还是终端岩浆房、成矿作用的过程是持续不断的即时成矿过程, 还是脉动式、间歇式成矿等。关于成矿过程与含矿岩体空间就位方式问题的不同认识会产生不同的找矿勘查指导思想, 因此, 金川含矿岩浆空间就位的方式对指导深部资源勘查有重要意义。

“岩浆通道式成矿”是 Tony Naldrett^[9-11]最早提出概念, 并指出“岩浆通道”在形成岩浆铜镍硫化物矿床中的巨大作用。Evans-Lamswood D M^[12],

Peter Lighfoot^[13]利用 Voisey's Bay Cu - Ni - PGE 矿床中矿体三维空间的分布特征, 详细论述了该矿床中“岩浆通道”的几何形态特征、“岩浆通道”的结构特征及“岩浆通道”各组成部分的地球化学特征。这些成果标志着“岩浆通道成矿”从理论阶段开始走向勘探实践应用阶段。本文是在前人勘查阶段的资料基础上, 于“金川铜镍矿集区大陆科学钻探选址预研究”项目研究过程中, 对金川矿区深部自西而东, 对 III 矿区 58# 矿体, I 矿区 24# 矿体 II 矿区 1#、2# 矿体和 IV 矿区 2# 含矿岩体进行了系统采样与岩石学与岩石化学分析研究, 特别是对 IV 矿区 2# 含矿岩体 (后文称为 IV 号含矿岩体) 的详勘钻孔岩心进行了系统的采样分析。初步研究表明 IV 矿区含矿岩体与 II 矿区 2# 含矿岩体岩石地球化学特征差异较大, 经历了更为复杂的结晶分异演化过程, 具有前锋岩浆的演化特征, 为岩浆通道空间的勘查和岩浆流向的确

收稿日期: 2013-01-27; 改回日期: 2013-05-21

基金项目: 国土资源部公益性行业基金项目 (201011058、200911007)、深部探测专项 (SinoProbe-05-01)、新疆东天山-北山地区铜镍矿勘查选区研究 (1212011085061) 和中央高校基金 (CHD2011TD007) 联合资助。

作者简介: 闫海卿, 男, 1963 年生, 博士, 副教授, 主要从事地质矿产勘查与矿床学研究; E-mail: haiqingy@chd.edu.cn。

定提供了佐证。

1 地质背景

金川铜镍硫化物矿床位于金昌市区南部, 岩体走向 310°, 产状 220°∠ (50°~ 80°), 长 6 500 m, 宽 20~527 m, 出露面积约 1.34 km², 最大延深大于 1 100 m, 呈 NW 向不规则岩墙状产出, 地表呈透镜

状, 与围岩呈侵入接触关系, 接触边缘缺失冷凝边, 多见接触交代蚀变和剪切变形。围岩为古元古代龙首山岩群白家嘴子组混合花岗岩, 片麻岩, 大理岩、斜长角闪岩、变粒岩等。后期 NE 向断裂将金川岩体切割成几段, 勘探者根据硫化铜镍矿体被发现和勘探先后, 由西向东依次划分为 III、I、II、IV 四个矿区^[14] (图 1)。前人对 III、I、II、IV 矿区内的主要含矿岩体的

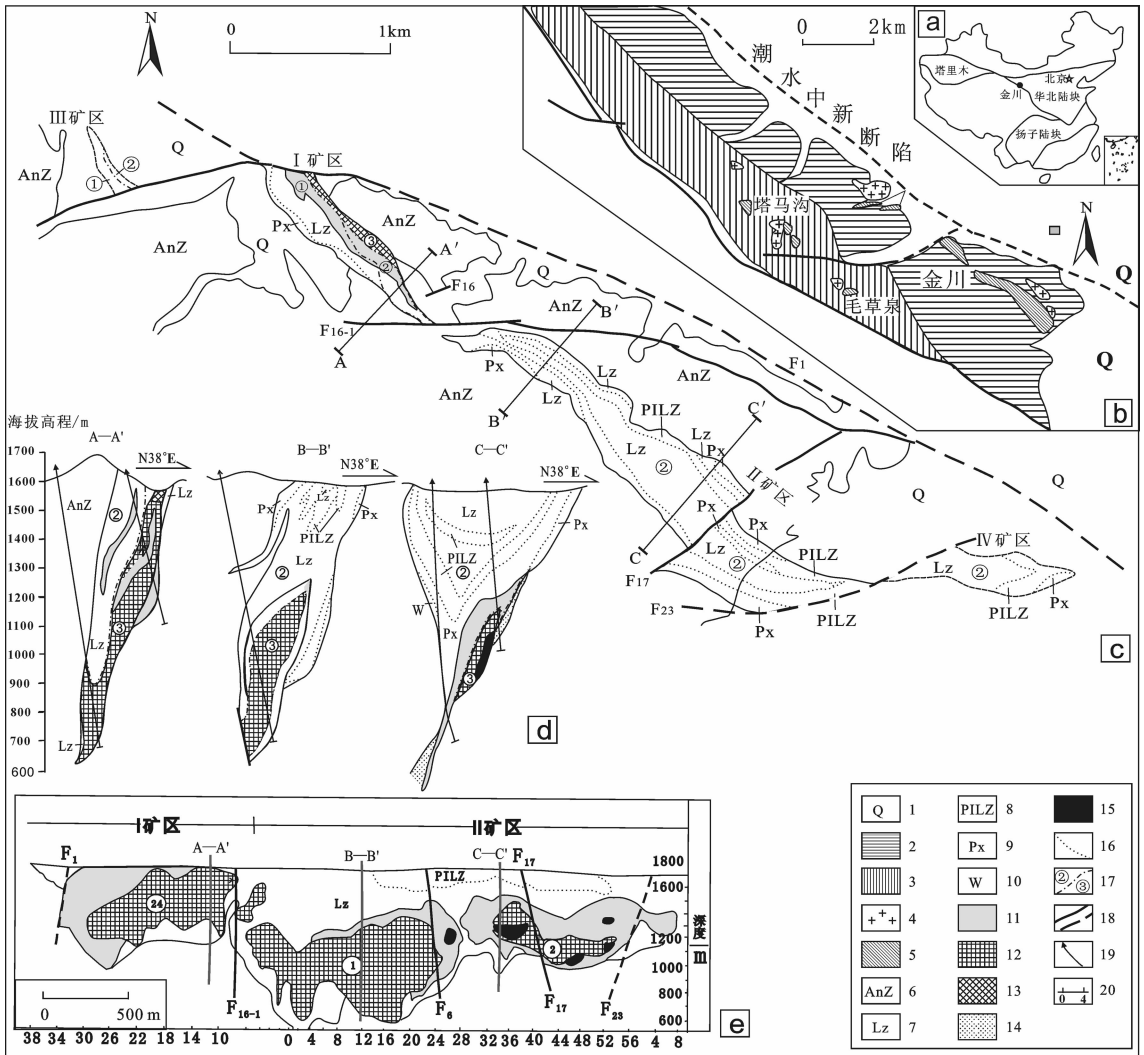


图 1 金川岩体平面(a,b,c)及剖面(d,e)地质略图(据文献[14])

- 1—第四系; 2—龙首山群白家嘴子组; 3—龙首山群塌马子沟组; 4—花岗岩; 5—镁铁-超镁铁岩体;
- 6—前寒武系; 7—二辉橄岩; 8—含斜二辉橄岩; 9—橄橄二辉岩; 10—二辉岩; 11—浸染状矿体;
- 12—海绵陨铁状矿体; 13—氧化矿体; 14—接触交代型矿体; 15—块状矿; 16—岩相界线; 17—矿体编号;
- 18—实测/推测断层; 19—钻孔; 20—勘探线编号

Fig.1 Geological sketch plane (a, b, c) and section (d, e) of the Jinchuan intrusion [14]

- 1—Quaternary; 2—Baijiazuizi Formation of Longshoushan Group; 3—Tamazigou Formation of Longshoushan Group; 4—Granite; 5—Mafic-ultramafite; 6—Precambrian; 7—Lherzolite; 8—Plagioclase lherzolite; 9—Olivine websterite; 10—Websterite; 11—Disseminated ore; 12—Sideronitic iron ore body; 13—Oxidized ore; 14—Contact metasomatic ore body; 15—Massive sulfide ore; 16—Lithofacies boundary; 17—Serial number of ore body; 18—Measured and inferred fault; 19—Drill hole; 20—Serial number of exploration line

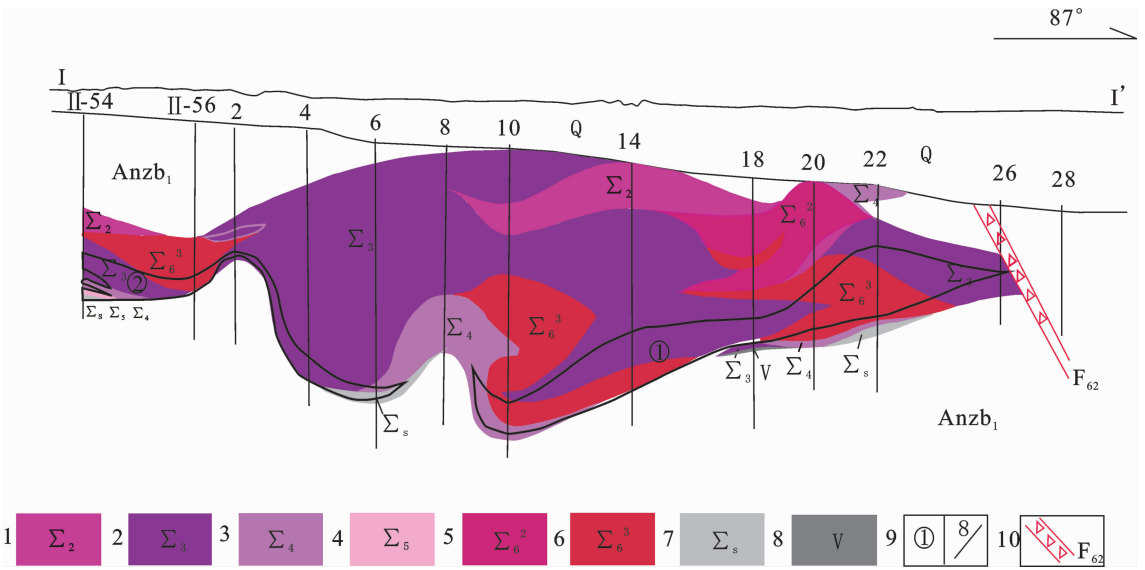


图 2 IV 号岩体地质纵剖面图(据文献[22])

1—含辉橄榄岩;2—二辉橄榄岩;3—橄辉岩;4—辉石岩;5—斜长含辉橄榄岩;6—斜长二辉橄榄岩;7—透闪石、绿泥石、滑石、蛇纹石片岩;8—辉长岩;9—矿体编号及勘探线编号;10—断层

Fig. 2 Geological longitudinal profile of IV pluton

1—Pyroxene-bearing olivine; 2—Lherzolite; 3—Olivine pyroxenite; 4—Pyroxenite; 5—Plagioclase pyroxene-bearing olivine; 6—Plagioclase lherzolite; 7—Tremolite, chlorite, talc, serpentine-schist; 8—Gabbro; 9—Serial number of ore body and exploration line; 10—Fault

岩石学、岩石化学特征已有较多的阐述 [15-18], 金川 IV 矿区含矿岩体位于金川铜镍硫化物矿床的东北端, 为一隐伏岩体。除了勘查阶段的地质研究以外, 少有研究者关注。前人一直将 IV 矿区隐伏岩体看作为 II 矿区 2# 含矿岩体的东延部分, 并没有对 IV 矿区隐伏岩体的岩石特征及成岩成矿过程进行详细研究。IV 矿区含矿岩体走向为北西—南东向, NW80°, 倾向南西, 倾角一般变化于 49°~60°之间, 4 号勘探线与 6 号勘探线附近岩矿体倾角较陡, 为 64°~67°, 西端向南偏转, 走向南西 58°, 东端稍向北偏转, 上接触界面倾角较缓, 接触面平直, 变化于 34°~58°之间, 一般为 40°左右。下接触界面上段较陡, 下段较缓, 因而中段向下突出。上段倾角变化于 67°~88°, 一般为 76°~88°, 下段倾角变化于 32°~50°, 一般为 39°~45°, 总的形态为岩墙状, 东西两头小, 中段大, 西端是个收缩趋势, 东端分叉尖灭(图 2) [22]。

2 岩石学、岩相学特征

为了与前人研究资料对比, 本次研究采用的岩相划分标准和岩石命名方案见表 1。该方案按主要造岩矿物橄榄石和辉石的相对含量命名, 含有斜长石时 3%~5%, 命名为“含斜长石”。当岩石中含有斜

表 1 岩相划分方案(据文献[23]修改)

Table 1 Lithofacies division scheme (modified after Tang Zhongli [23])

岩石名称	代号	主要矿物含量/%	
		橄榄石	辉石
含辉橄榄岩	Σ ₂	70~90	30~10
二辉橄榄岩	Σ ₃	30~70	70~30
橄辉岩	Σ ₄	5~30	90~70
辉石岩	Σ ₅	<5	>95
透闪石、绿泥石、滑石、蛇纹石片岩	Σ _s	透闪石、绿泥石、滑石、蛇纹石、阳起石等; 矿物强烈蚀变, 片理发育	

长石时一般 5%~10%, 统一命名为“斜长 XXX 岩”。根据上述划分原则, 结合 ZK16-2 钻孔岩相学特征, IV 号含矿岩体岩相划分为七种岩相, 各个岩相的上下接触关系如图 3 所示。

IV 矿区含矿岩体岩相自西向东空间变化(图 4), 主要岩相为二辉橄榄岩、含辉橄榄岩(图 5-a)、斜长二辉橄榄岩(图 5-b)、斜长含辉橄榄岩; 各岩相空间分布较杂乱, 规律性差, 钻孔垂向上有弱的结晶分异演化的特征, 但是空间上明显呈多期脉动式(涌动接触)就位的特点。矿体集中在岩体下部, 主要含矿

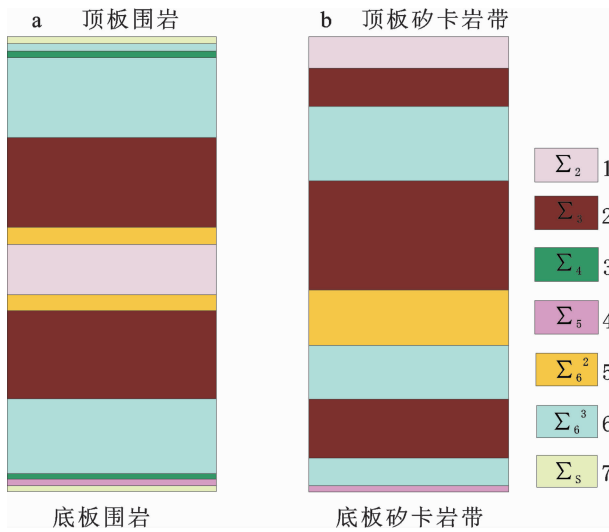


图3 IV号岩体各岩相柱状分布图

a—IV号岩体综合岩相柱状图(据文献[24]);

b—钻孔ZK16-2岩相分布图

1—含辉橄榄岩(Σ₂);2—二辉橄榄岩(Σ₃);3—橄辉辉石岩(Σ₄);4—辉石岩(Σ₅);5—斜长含辉橄榄岩(Σ₆²);6—斜长二辉橄榄岩(Σ₆³);7—透闪石、绿泥石、滑石、蛇纹石片岩(Σ_s)

Fig.3 Columnar section of IV pluton lithofacies

1—Pyroxene-bearing olivine; 2—Lherzolite; 3—Olivine pyroxenite; 4—Pyroxenite; 5—Plagioclase pyroxene-bearing olivine; 6—Plagioclase lherzolite; 7—Tremolite, chlorite, talc, serpentinite-schist

岩相为二辉橄榄岩和斜长二辉橄榄岩,金属矿相特点见图5-c、5-d。岩石学、岩相学研究表明金川IV号岩体的矿物的结晶顺序依次为:(尖晶石)橄榄石→斜方辉石→单斜辉石→斜长石。

3 岩石化学特征

3.1 微量、稀土元素特征

II矿区2#含矿岩体的与IV矿区2#含矿岩体稀土元素配分图(图6)显示稀土配分形式相似,IV号含矿岩体的ΣREE远高于II矿区2#含矿岩体,反映他们具有同源岩浆的特点。微量元素配分图(图7)显示Nb、Ta、Sr、Ti的负异常和Ce、Zr、Hf、Tb等元素正异常,但是异常的丰度差异较大,反映IV号含矿岩体的与II号岩体分异演化过程有较大差异。

3.2 铂族元素特征

IV号含矿岩体的PGE分析数据经百分百硫化物换算见表2,经原始地幔标准化(图8)显示IV号含矿岩体的PGE较II矿区2#含矿岩体铂族元素亏损;IV号含矿岩体与金川II矿区1#、2#含矿岩体铂族元素(PGE)以及Voisey bay矿床铂族元素100%

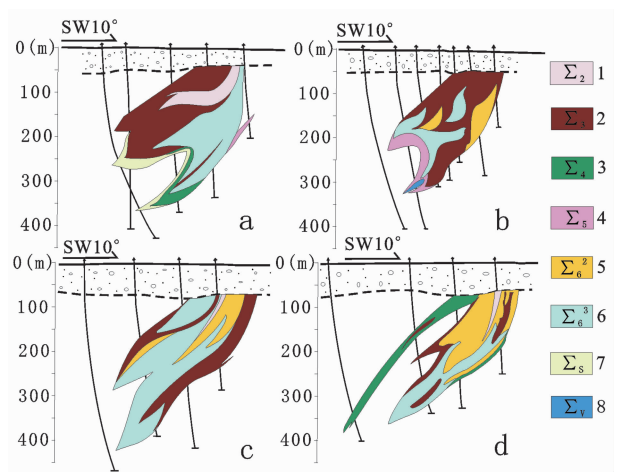


图4 IV号岩体勘探线剖面图(据文献[22])

a—10行勘探线剖面;b—14行勘探线剖面;c—18行勘探线剖面;d—20行勘探线剖面

1—含辉橄榄岩(Σ₂);2—二辉橄榄岩(Σ₃);3—橄辉辉石岩(Σ₄);4—辉石岩(Σ₅);5—斜长含辉橄榄岩(Σ₆²);6—斜长二辉橄榄岩(Σ₆³);7—透闪石、绿泥石、滑石、蛇纹石片岩(Σ_s)

Fig. 4 Geological section along the exploration line of IV pluton

1—Pyroxene-bearing olivine; 2—Lherzolite; 3—Olivine pyroxenite; 4—Pyroxenite; 5—Plagioclase pyroxene-bearing olivine; 6—Plagioclase lherzolite; 7—Tremolite, chlorite, talc, serpentinite-schist

硫化物换算后,经原始地幔标准化PGE配分曲线(图9),显示IV号含矿岩体PGE与Voisey bay特征相似^[23-24],其ΣPGE远远低于1#和2#含矿岩体的ΣPGE。

Naldrett^[1]利用“R”因子(R=sulfide/silicate or silicate/oxide mass ratio)来反映硫化物中亲铜元素的含量与硅酸盐岩浆的关系。“R”因子是通过改变与一定量硫化物发生反应的岩浆的量来改变硫化物中成矿元素的品位的。硫化物中Ni、Cu和PGE的含量可以根据公式表示^[25]:

$$C_i^{Sul} = C_i^{Sil} \times D_i^{Sul/Sil} \times (R+1) / (R+D_i^{Sul/Sil}) \quad (1)$$

C_i^{Sul}和C_i^{Sil}分别为元素i在硫化物熔浆和硅酸盐熔浆中的浓度,D_i^{Sul/Sil}为元素i在硫化物熔浆与硅酸盐熔浆之间的分配系数,R为硅酸盐熔浆/硫化物熔浆的比值。

如果D远远大于R,则(1)式可以近似变为:

$$C_i^{Sul} = C_i^{Sil} \times (R+1) \quad (2)$$

因此当已知D_i^{Sul/Sil} C_i^{Sul}和C_i^{Sil},应用该方程可以

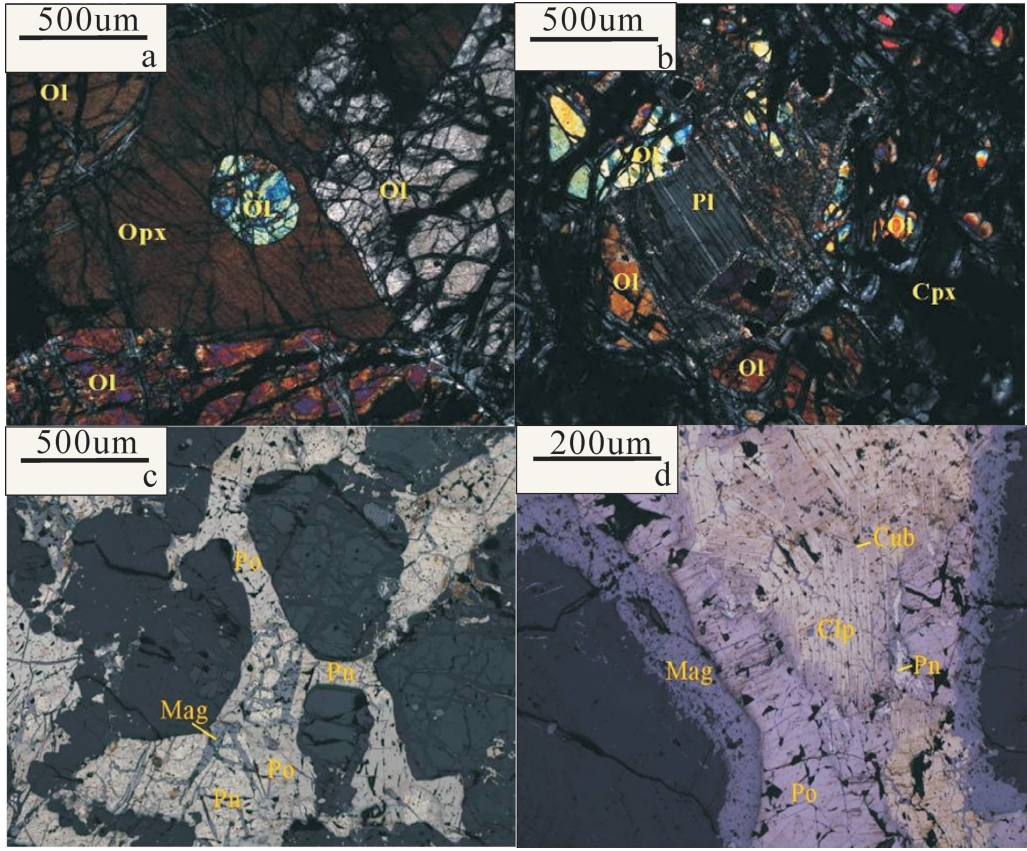


图 5 IV 矿区含矿岩体岩相学及金属矿相学特征

a—含辉橄岩(透射光,正交偏光);b—斜长二辉橄岩(透射光,正交偏光);c—局部海绵陨铁结构(反射光单偏光),金属矿物充填硅酸盐矿物间隙中;d—固溶体分离结构(反射光单偏光),磁黄铁矿,镍黄铁矿,黄铜矿固溶体分离

Fig.5 Lithofacies and metallic ore microscopic characteristics of ore-bearing pluton in IV mining area

a - Lherzolite (plainlight); b - Plagioclase lherzolite (crossed nicols); c - partial sideronitic structure (plainlight), metallic minerals filling gaps of silicate minerals; d - Exsolution structure (plainlight) exsolution of pyrrhotite, pentlandite, chalcocopyrite

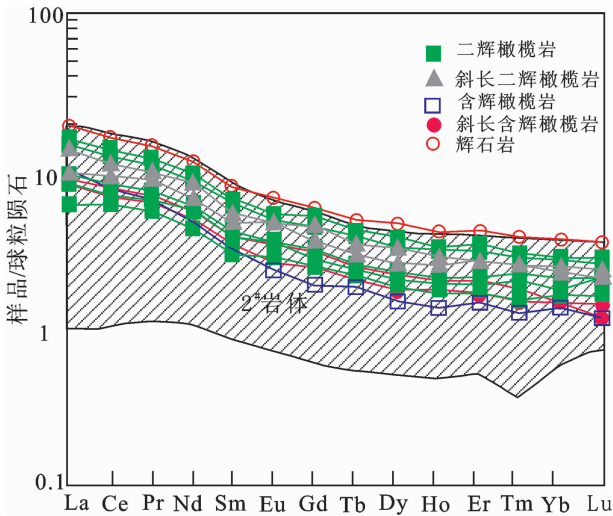


图 6 金川 IV 号岩体稀土元素配分图解^[15, 22]

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns of Jinchuan IV pluton

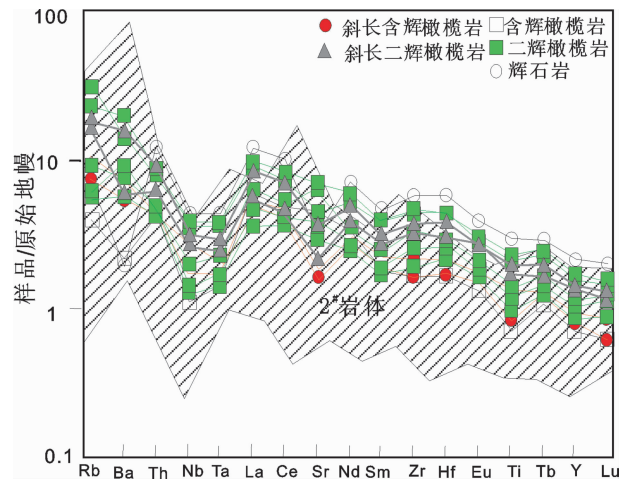


图 7 金川 II 号岩体、IV 号岩体微量元素配分图^[15, 22]

Fig.7 Trace elements partition diagram of Jinchuan II pluton, IV pluton

表 2 金川 IV 号岩体矿石中 S、Cu、Ni (%) 及 PGE (10⁻⁹) 元素 100% 硫化物换算结果
 Table 2 100% sulfide S, Cu, Ni and PGE elements conversion result of Jinchuan IV pluton ore

样品号	矿石分布特征	Ru	Rh	Pd	Ir	Pt	Os	ΣPGE	S	Cu	Ni
ZK16-2-38	星点状	9.97	4.77	79.52	7.00	111.96	14.74	227.95	1.38	4.24	10.44
ZK16-2-60	浸染状	5.09	2.24	30.72	3.25	40.48	14.44	96.22	0.73	4.07	5.19
ZK16-2-64	浸染状	4.19	2.05	22.56	2.91	19.91	13.70	65.32	1.75	2.56	7.80
ZK16-2-72	浸染状	7.14	4.45	75.62	6.02	58.38	9.92	161.53	1.60	5.10	7.52
ZK16-2-80	浸染状	21.79	8.16	32.86	17.68	229.38	32.06	341.93	2.24	1.86	6.68
ZK16-2-88	浸染状	15.60	5.02	23.22	13.70	35.33	59.01	151.88	3.70	3.04	8.11
ZK16-2-97	网状	1.17	0.79	32.55	0.74	9.04	6.13	50.42	10.45	2.22	9.87

注:样品由中国科学院广州地球化学研究所同位素实验室分析测试。

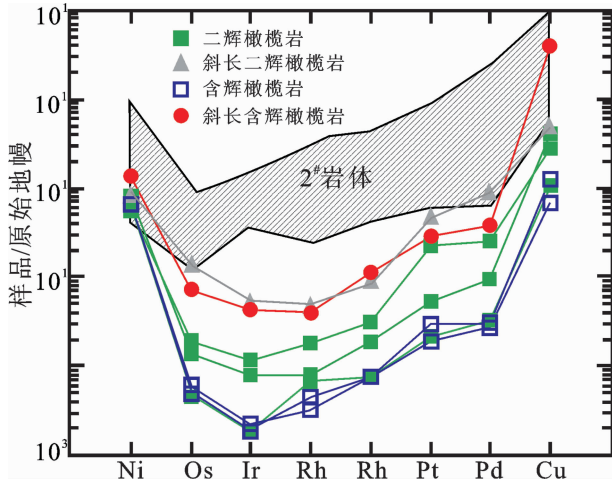


图 8 金川 IV 号岩体岩石 PGE 原始地幔标准化分配模式图
 Fig.8 PGE primitive mantle normalized patterns of Jinchuan IV pluton

大致推算 R , 进而可以判断岩浆的流动方向^[9], 因为远离补给通道的岩浆总是更亏损成矿元素, 而且岩浆通道中如果有新鲜的岩浆持续不断的通过“ R ”值可以视为无穷大。因此可以理解“ R ”因子数值越大, 通道中与硫化物发生反应流经的岩浆也越多; “ R ”因子数值越小, 与硫化物发生反应补给的新鲜岩浆越少, 同时也预示“ R ”因子数值小的区段位于岩浆通道的前缘地段。

利用 PGE 来拟合“ R ”因子可以看出金川含矿岩体自西向东, 由 58# 矿体→24# 矿体→富铜盲矿→1# 矿体→2# 矿体, 再到 IV 号含矿岩体, “ R ”因子从 600→200, 再到 IV 号含矿岩体“ R ”=30(图 10)(数据

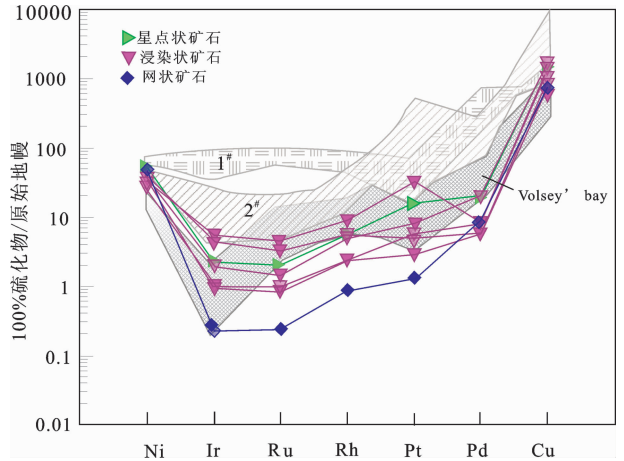


图 9 金川 IV 号矿体矿石 100%硫化物 PGE 原始地幔标准化分配模式图(1#、2# 矿体数据引自文献[26]; Volley's Bay 数据引自文献[27])

Fig.9 PGE primitive mantle normalized patterns of ore 100% sulfide of Jinchuan IV pluton (1,2 ore body data after Reference [26]; Volley's Bay data after Reference [27])

来源于本课题组承担的科研项目“金川铜镍矿床深边部找矿”项目, 部分成果待刊); 利用 Pt 与 Ir 相关性拟合“ R ”因子曲线也得到相同的结果(图 11)。

3.3 Ni、Cu 成矿元素

Ni、Cu 和 PGE 具有不同的单硫化物固溶体/硫化物熔浆分配系数, 因此, 它们也是硫化物熔浆结晶分异的重要示踪元素。

由于 Ni 和 IPGE 的 $D^{Ms/Sul}$ 大于 1, 而 Cu 和 PPGE 的 $D^{Ms/Sul}$ 小于 1, 因此, 单硫化物固溶体的分离结晶过程将导致 Cu 和 PPGE 在残余硫化物熔浆

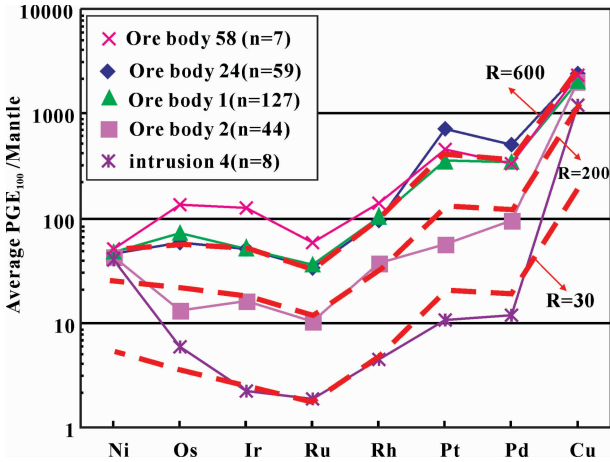


图 10 金川含矿岩体 PGE 丰度与“R”因子模拟曲线图
Fig. 10 PGE abundance "R" factor analog graph of Jinchuan ore-bearing pluton

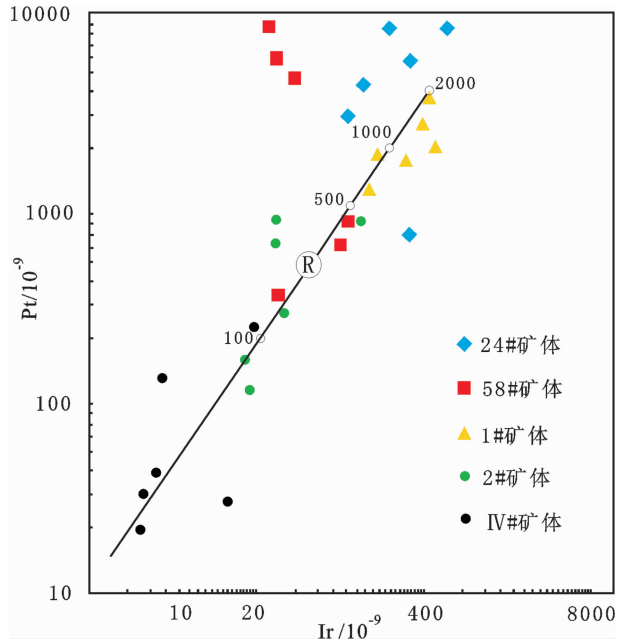


图 11 Pt-Ir 丰度相关性与“R”因子拟合线
Fig.11 Pt-Ir abundance correlation and "R" factor fitting line

中富集,造成硫化物矿石 IPGE 与 PPGE 以及 Ni 与 Cu 的分异。

金川矿床自西而东 6 个主要含矿岩体的 Ni、Cu 品位见表 3 (全部数据来源于本课题组承担的“金川深边部找矿项目”的分析数据),Ni/Cu 比的变化总体是自西而东逐渐变大,但是在 24# 矿体处有波动。金川 IV 号含矿岩体矿石中 Cu 为 0.22%~0.51%,Ni 为 0.519%~1.044%; 矿石 Ni/Cu 比值为 1.28~4.45,平均 2.23,均大于 1。反映出矿石中镍相对于铜更为富集的总体特征。根据 Ni、Cu 元素在硫化物熔体结晶分异作用中的地球化学行为,从 Ni/Cu 比值的角度来看,金川矿区各主要矿体就位的早晚顺序应该为:IV 号含矿岩体 > 2# 矿体 > 1# 矿体 >

富铜盲矿体 # 矿体,即 IV 号含矿岩体形成较早。

4 讨论

4.1 岩浆通道成矿

“岩浆通道成矿”是指在岩浆成矿系统中,岩浆演化晚期矿浆或含矿熔体运移和/或就位的空间。“岩浆通道”常常具有非常复杂的结构,因此,“岩浆通道成矿”也可称作“岩浆通道成矿系统”。

Evans-Lamswood (2000)^[12]详细阐述了加拿大 Voisey's Bay 铜镍矿床岩浆通道的特征。笔者 2011

表 3 金川矿区主要矿体与岩体 Ni、Cu 重量百分比值

Table 3 Ni, Cu weight percentage of major ore bodies in the Jinchuan ore district

矿体赋存位置	编号或名称	样品数	Ni/ %	Cu/ %	Ni/Cu	Pd/Ir
最西端	58#	8	8.55	6.9	1.24	3.11
西部	24#	12	2.40	0.73	3.92	1.94
中西结合部	富铜盲矿体	8	10.01	6.46	1.56	
中部	II 矿区 1#矿体	8	1.71	1.07	1.603	3.98
东部	II 矿区 2#特富矿	8	7.68	3.73	2.06	6.95
最东端	IV 号含矿岩体	13	0.53	0.22	2.33	9.46
岩体赋存位置	编号或名称	样品数	Ni/ %	Cu/ %	Ni/Cu	Pd/Ir
最西端	III 矿区岩体 58#	3	0.23	0.38	1.64	3.84
西部	I 矿区岩体 24#	13	0.42	0.25	1.73	11.55
中部	II 矿区西部 1#	12	0.14	0.14	1.01	12.63
东部	II 矿区东部 2#	8	0.61	0.23	2.67	8.92
最东端	IV 号岩体	7	0.16	0.46	2.87	17.85

年由“金川科钻选址项目”资助、考察了加拿大 Voisey’s Bay 铜镍矿床,该矿床具有“金川式”小岩体成大矿的特点,与我国金川铜镍矿床有许多的相似性和可比性。其岩浆通道具有如下特点(图 12):

(1)“Feeder”段:位于岩浆通道的前缘及边部;主要由贫硫化物的铁辉长岩岩石组成,常被视为边缘序列,常与侵位时原地的围岩发生强烈同化混染,弱矿化,处于矿化事件的边缘,是早期岩浆作用的产物;

(2)“Noisy”段:位于岩浆通道的中部;称之为“Noisy”是因为该地段岩石结构混杂,具有复杂岩浆的混合特征,包含较多的深部卷入的围岩(非就位原地的围岩)碎片。岩石以中粒结构为主,中等矿化(< 30%);岩性为橄榄辉长岩—橄长岩,是岩浆事件中后期岩浆作用的产物。

(3)“Quiet”段:位于岩浆通道的后端,称之为“Quiet”是因为该地段包含简单和一致硫化物结构,有橄长岩行成的豹纹结构(橄榄石斑晶和硫化物机制),可包含少量围岩碎片,矿化强烈(30%~60%)。为

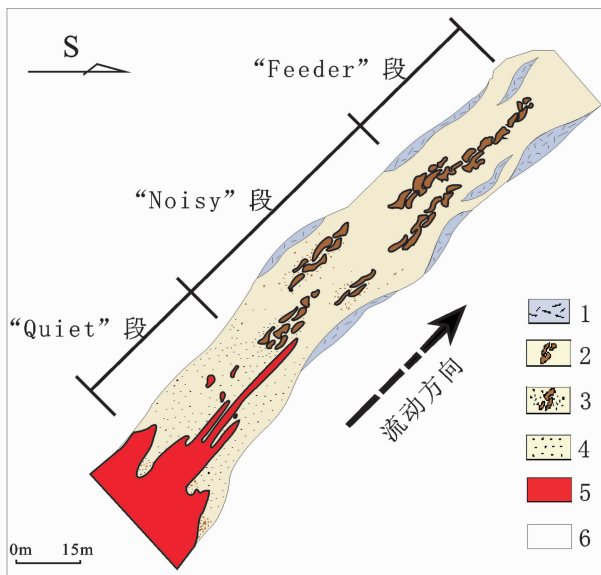


图 12 岩浆通道结构特征图(据文献[15]修改)

- 1—贫矿橄长岩—辉长岩序列,铁辉长岩及围岩;2—角砾,橄橄榄辉长岩/橄长岩,固结的硫化物,非原地碎片;3—豹纹结构硫化物伴随角砾岩;橄橄榄辉长岩/橄长岩伴随豹纹结构矿化细脉或角砾序列碎片;4—豹纹结构硫化物;橄长岩伴随豹纹结构矿化;5—块状—半块状硫化物;6—围岩

Fig.12 Characteristic diagram of magma channel structure

- 1 - Barren troctolite-gabbro; 2 - Breccia: olivine gabbro/troctolite; 3 - Leopard textured sulfides with breccia: olivine gabbro/troctolite with leopard textured mineralization veinlet or fragmental breccia sequence; 4 - Leopard textured sulfides; 5 - Massive to semi-massive sulfides; 6 - Country rock

最后一期矿化脉冲,也是最重要的一次矿化,是岩浆事件晚期岩浆作用的产物,常被岩脉或者半块状—块状硫化物(60%~100%)序列所穿插。

4.2 金川岩浆通道的判别

金川矿床矿体的就位空间上相对集中,矿体形成和岩浆就位后原始产状发生了变形和改造,恢复完整的岩浆通道,反演岩浆动态上侵过程存在很大难度,依据各个矿区岩相变化和岩(矿)石结构的变化,可以初步判定,金川铜镍矿床岩浆的流动过程不是一个简单的通道,而且每个岩矿体各个岩相有脉动式穿插和涌动式接触,甚至有部分岩相仅在深部呈现,地表出露很少。换言之,岩浆的流动不仅是自西向东,而且也存在自南西深部向北东浅部的流动。岩浆通道与流动方向的判断依据主要如下:

(1) I 矿区 24# 岩(矿)体:该岩矿体岩相稳定(变化少),主要岩相为二辉橄榄岩、含二辉橄榄岩、纯橄榄岩,橄橄榄辉石;矿石结构呈星点状结构和斑点状,局部海绵陨铁和块状矿脉穿插。岩石以粗粒堆晶

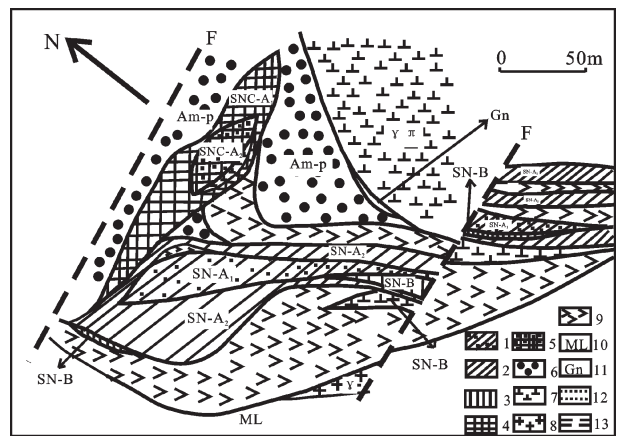


图 13 I 矿区富铜盲矿体 1 160 m 中段平面图

- 1—SN-A₁ 硫化镍表内富矿体;2—SN-A₂ 硫化镍表内贫矿体;3—SN-B 硫化镍表外矿体;4—SNC-A₁ 硫化铜表内富矿体;5—SNC-A₂ 硫化铜表内贫矿;6—Am-p 斜长角闪岩;7—γ π 花岗岩斑岩;8—γ 花岗岩;9—Σ₃ 二辉橄榄岩;10—大理岩;11—片麻岩;12—勘探线;13—断裂

Fig.13 Copper-rich blind ore body at 1160 m level

- 1 - SN-A₁ usable reserves of nickel sulfide rich ore body; 2 - SN-A₂ usable reserves of nickel sulfide lean ore body; 3 - SN-B useless reserves nickel sulfide ore body; 4 - SNC-A₁ usable reserves copper sulfide rich ore body; 5 - SNC-A₂ usable reserves copper sulfide lean ore body; 6 - Am-p plagioclase hornblende; 7 - γ, π granitic porphyry; 8 - γ granite; 9 - Σ₃ hercynite; 10 - Marble; 11 - Gneiss; 12 - Exploration line; 13 - Fault

结构为主,反映出岩浆结晶时温度较高,并且岩浆基本处于静止状态。后期虽然有块状矿脉穿插但是规模不大,不强烈的特点。矿体处于岩体的下方(图 1-d,剖面“A-A”)

(2) I、II 矿区的结合部(富铜盲)矿体:矿体 Ni/Cu 比值小,富铜及 PGE,矿体产状与岩体总体走向不一致,穿插早期的贫硫化物的纯橄橄榄岩相,甚至与围岩接触。呈现后期活动的特点(图 13)。

(3) II 矿区西部 1# 岩(矿)体:分布自 I 矿区 4 行勘探线至 II 矿区 28 行间的岩体深部,全长 1 600 m 左右。岩相变化增多,并且在西端深部有纯橄橄榄岩相出现。地表出露岩相主要为二辉橄橄榄岩、含二辉橄橄榄岩、斜长二辉橄橄榄岩。总体上以含二辉橄橄榄岩为核心向外依次过渡为斜长含二辉橄橄榄岩→二辉橄橄榄岩→斜长二辉橄橄榄岩→橄橄榄二辉岩→二辉岩→蛇纹石透闪石绿泥石片岩。自下而上,岩相有基性程度逐渐降低的趋势,矿体赋存在中下部,表现为重力分异和流动分异的特点(图 1-d,剖面“B-B”),西部以中粗粒结构为主,矿石以海绵陨铁(网状)结构为主。

(4) II 矿区东部 2# 岩(矿)体:自 II 矿区 30 勘探线以东为 2# 岩(矿)体的分布范围,长约 1 300 m 范围,主要岩相由二辉橄橄榄岩(约占 50%),斜长二辉橄橄榄岩(约占 25%),其次为橄橄榄辉石岩,斜长含辉橄橄榄岩,辉石岩组成。岩石结构以中细粒为主,岩相变化有自中间向两边对称式分异的特点(图 1-d,剖面

“C-C”),矿石类型有网状结构的富矿石,块状构造的特富矿以及浸染状的贫矿。贫矿体、富矿体与岩体(不含矿的岩体)复杂穿插(图 14),显示出岩浆活动频繁的“*Noisy*”段特征。

(5) IV 号含矿岩体:岩相为二辉橄橄榄岩、含辉橄橄榄岩、斜长二辉橄橄榄岩、斜长含辉橄橄榄岩;岩石呈细粒结构,各岩相空间分布较杂乱,规律性差,钻孔垂向上有弱的结晶分异演化的特征,但是空间上明显呈现多期脉动式(涌动接触)就位的特点。矿石以星点状和稀疏浸染状构造,斑杂状构造为主,局部以海绵陨铁结构为主,矿化弱。

4.3 前锋岩浆

前锋岩浆是指岩浆通道中远离后续岩浆补给通道,侵位较远的岩浆。按照岩浆通道成矿作用原理,若要成大矿、成富矿,必须得到持续的新鲜岩浆的补充,并且与硫化物发生反应。因此,前锋岩浆矿化一般较弱,甚至无矿。并且岩浆与外界围岩直接接触,同化混染强烈,岩浆温度较低,岩石结构较细。由于 PGE 在硫化物与硅酸盐中的分配系数差异很大,只要存在少量的硫化物发生了熔离,岩石中就会亏损 PGE^[26-27]。因此,前锋岩浆 PGE 亏损。

4.4 终端岩浆房

中国的铜镍硫化物岩浆矿床形成的大地构造背景差异大,岩石的类型也不同^[28-30],但是成矿的方式极其相似,均为小岩体成矿。因此,岩浆深部熔离-多期

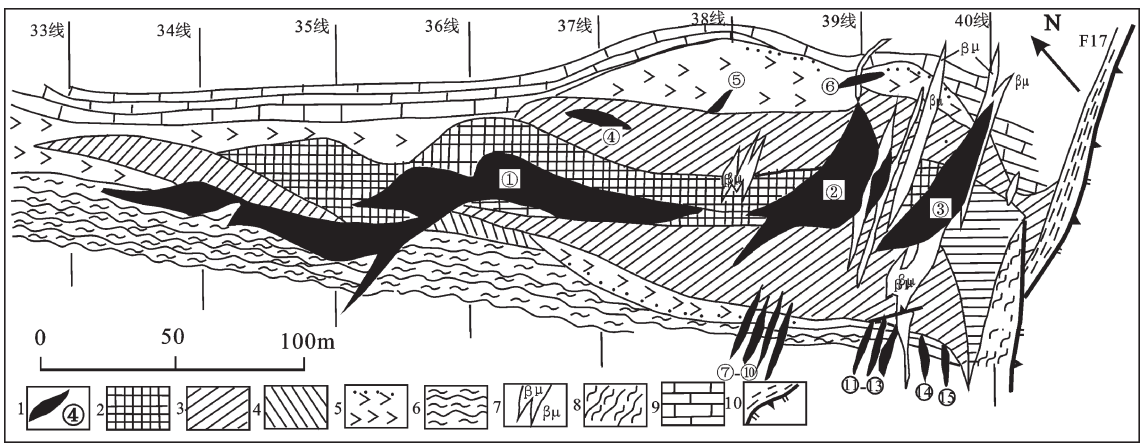


图 14 II 矿区东部 1 250 m 标高矿体分布平面示意图^[20]

1—晚期贯入型块状矿体;2—深熔-贯入型富矿体;3—深熔-贯入型贫矿体;4—接触交代型矿体;5—二辉橄橄榄岩及边缘蚀变;6—绿泥透闪石片岩;7—辉绿岩脉;8—混合花岗岩;9—大理岩;10—断层与断层泥

Fig.14 The distribution of ore bodies at the level of 1250 m in eastern II mining area ^[20]

1 - Late penetration massive ore body; 2 - Anatectic-penetration rich ore body; 3 - Anatectic-penetration lean ore body; 4 - Contact metasomatic ore body; 5 - Lherzolite; 6 - Chlorite tremolite schist; 7 - Diabase dike; 8 - Migmatite; 9 - Marble; 10 - Fault and fault gouge

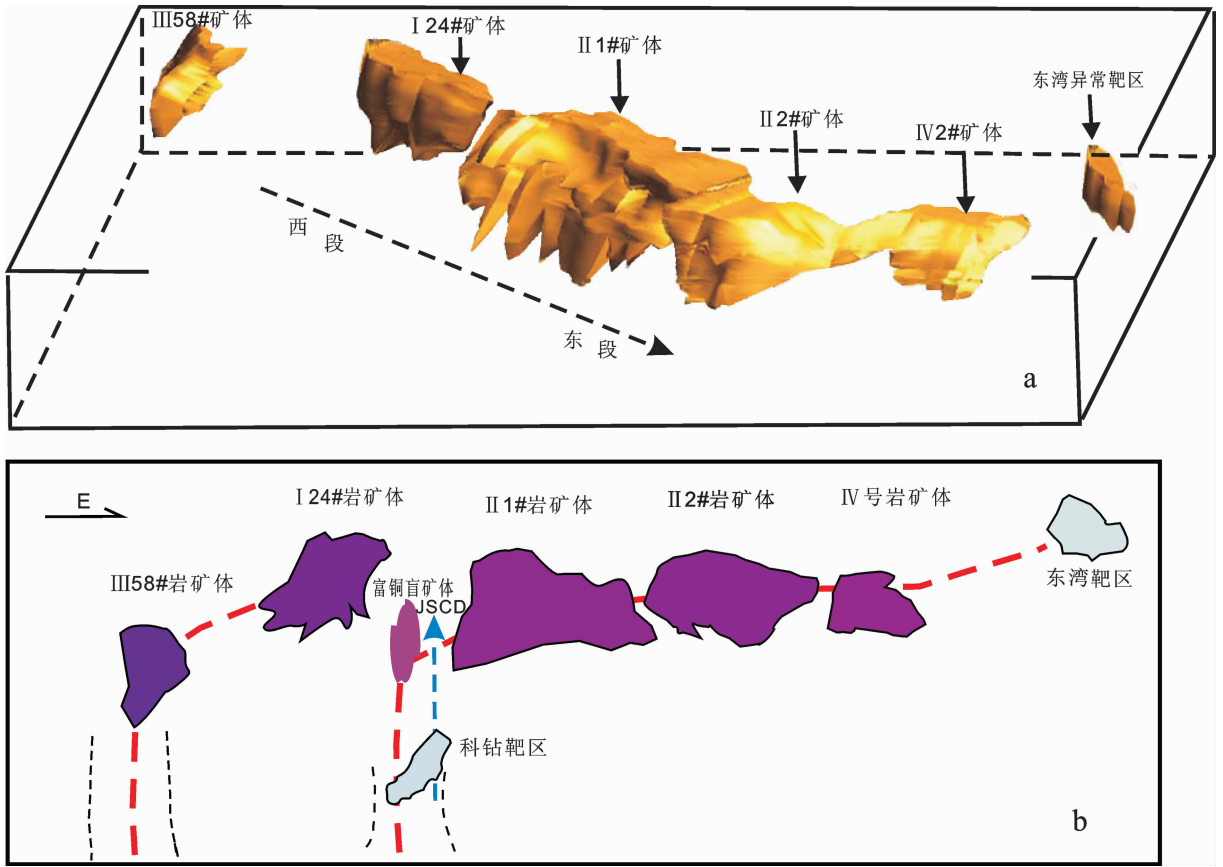


图 15 金川铜镍矿床岩浆通道与空间就位示意图

a—金川矿床各个矿区含矿岩体立体勘查模拟图; b—金川铜镍矿床岩浆通道剖面图

Fig.15 The location of magma channel space in the Jinchuan copper-nickel deposit

a - Stereo exploration simulation diagram of ore-bearing pluton in various mining areas of the Jinchuan ore deposit;

b - Magma channel section drawing of the Jinchuan copper-nickel deposit

贯入的成矿模式,广为大家接受。依据小岩体成矿理论模式,金川现存矿体空间为终端岩浆房,在深部中下地壳存在一个岩浆房,在那里岩浆硫化物达到过饱和并发生熔离。自上而下分离为岩浆、含矿岩浆(对应形成浸染状矿石)、富矿岩浆(对应形成网状矿石)和矿浆(对应形成块状矿石)四部分,岩浆的质量比其他三部分大得多,由于动力作用,从上而下依次上侵到地表或现存空间(终端岩浆房)成岩成矿^[31]。因此,岩浆深部熔离多期上侵,脉动式贯入是成大矿的条件。早期上来的岩浆比重轻不含矿或含贫矿可以定位到不同的空间,现存矿体赋存的空间可以是岩浆沿着一个通道,或多个分支通道就位。终端岩浆房的岩(矿)体之间物质组分不一定是连续的演化关系。前人对金川岩体与矿体的研究也发现金川矿体有先熔离分层后侵位分异演化的特点^[32-33],这也说明金川

矿床的岩浆通道是复杂的,不典型,每一个岩矿体存在独立演化的特征,可能不是完整的连续演化过程和一个岩浆通道。

5 结论

(1)金川 IV 矿区岩(矿)体的岩石学、岩石地球化学特征与 II 矿区 2# 岩(矿)体对比存在很大差异,IV 号岩体不是 II 矿区 2# 岩(矿)体的东延部分,他们是两个相对独立的岩体。

(2)IV 号岩体岩相变化大,细晶结构,斑杂状构造发育,“R”因子最小,反映该地段后续岩浆补给量(流过并与 IV 号岩体的硫化物发生反应的岩浆量)最少,处于岩浆运移的前缘部分,是金川含矿超镁铁岩浆的前锋岩浆产物。

(3)Ni/Cu、“R”因子对比特征显示,金川四个

矿区的岩浆自西而东运移,就位的先后顺序具有自东而西,即先由IV→II→I在到III矿区逐步侵位的特点。

(4)岩浆通道可能有两个,西部58#与24#岩体可能为一个岩浆通道,富铜盲矿及1#、2#、IV号岩(矿)体可能为另一个岩浆通道(图15)。

(5)深部资源勘查应考虑岩浆通道的下部(根部地带)是否存在盲矿体。同时也要考虑到主岩浆通道可能存在次一级通道分叉的可能性。摸清矿区,乃至矿田的导岩、导矿构造是此类矿床深部资源勘查,探边摸底的关键。

致谢:项目实施过程中得到金川集团有限公司王玉山,岳斌等高级工程师的大力支持,中国地质科学院深部探测专项首席科学家董树文研究员,专项办主任陈宣华研究员的关怀和指导,在此表示衷心的感谢。

参考文献(References):

- [1] Naldrett A J. Magmatic sulfide deposits [M]. New York Oxford University Press, 1989, 1-186.
- [2] Naldrett A J, Fedorenko VA, Asif M, et al. Controls on the composition of Ni-Cu sulfide deposits as illustrated by those at Noril'sk, Siberia[J]. Econ. Geol., 1996, 91:751-773.
- [3] Naldrett A J, Keats H, Sparkes K, et al. Geology of the Voisey's Bay Ni-Cu-Co deposit Labrador, Canada [J]. Explor. Mining Geol., 1996, 5:169-179.
- [4] Naldrett A J. Key factors in the genesis of Noril'sk, Sudbury, Jinchuan, Voisey's Bay and other world-class Ni-Cu-PGE deposits: Implications for exploration [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 1997, 44(3):283-315.
- [5] Naldrett A J. World-class Ni-Cu-PGE deposits: Key factors in their genesis[J]. Mineralium Deposita, 1999, 34(3):227-240.
- [6] Naldrett A J. A history of our understanding of magmatic Ni-Cu sulfide deposits[J]. Canadian Mineralogist, 2005, 43:2069-2098.
- [7] 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, 1995:1-208.
Tang Zhongli, Li Wenyuan. Mineralization Model and Geological Comparison of Jinchuan Cu-Ni-(Pt) Sulfide Deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995:1-208 (in Chinese with English abstract).
- [8] 宋谢炎,李士彬,王玉山,等. 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 Xieyan, Li Shibin, Wang Yushan, et al. 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 (in Chinese with English abstract).
- [9] 宋谢炎,肖家飞,朱丹,等. 岩浆通道系统与岩浆硫化物成矿研究新进展[J]. 地学前缘, 2010, 17(1):135-163.
Song Xieyan, Xiao Jiafei, Zhu Dan, et al. New insights on the formation of magmatic sulfide deposits in magma conduit system[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17 (1):135-163 (in Chinese with English abstract).
- [10] 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 Shangguo, Tang Zhongli, Zhou Dai. Emplacement sequence in the Jinchuan sulfide ore-bearing ultramafic intrusion [J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17 (2):118-126 (in Chinese with English abstract).
- [11] 汤中立,钱壮志,姜常义,等. 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 Zhongli, Qian Zhuangzhi, Jiang Changyi, et al. Trends of research in exploration of magmatic sulfide deposits and small intrusions metallogenic system [J]. Journal of Earth Science and Environment, 2011, 33(1):1-9 (in Chinese with English abstract).
- [12] Naldrett A J, Lightfoot P C, Fedorenkov, et al. Geology and geochemistry of intrusions and flood basalts of the Noril'sk region, USSR, with implication for the origin of the Ni-Cu-PGE ores[J]. Economic Geology, 1992, 87(4):975-1004.
- [13] Naldrett A J, Fedorenko V A, Lightfoot P C, et al. Ni-Cu-PGE deposits of Noril'sk region, Siberia: Their formation in conduits for flood basalt volcanism [J]. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy Section B: Applied Earth Science, 1995, 104:18-36.
- [14] Naldrett A J. World class Ni-Cu-PGE deposits: Key factors in their genesis[J]. Mineralium Deposita, 1999, 34(3):227-240.
- [15] Evans-Lamswood D M, Butt D P, Jackson R S, et al. Physical controls associated with the distribution of sulfides in the Voisey's Bay Ni-Cu-Co deposit, Labrador [J]. Economic Geology, 2000, 95:749-769.
- [16] Peter L, Reid R, et al. Saturation history of Nain Plutonic Suite mafic intrusions: Origin of the Voisey's Bay Ni-Cu-Co sulfide deposit, Labrador, Canada [J]. Mineralium Deposita, 2012, 47:23-50.
- [17] 汤中立. 中国岩浆硫化物矿床的主要成矿机制 [J]. 地质学报, 1996, 70(3):237-243.
Tang Zhongli. The main mineralization mechanism of magma sulfide deposits in China [J]. Acta Geologica Sinica, 1996, 70(3): 237-243 (in Chinese with English abstract).
- [18] 李士彬. 甘肃金川II号岩体岩浆演化及铜镍硫化物成矿过程探讨[D]. 贵阳:中国科学院地球化学研究所, 2008.
Li Shibin. Magmatic Evolution Processes of Segment II in the Jinchuan Ore-bearing Intrusion, Gansu Province [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [19] 高强祖,王玉山,黄满湘. 金川铜镍硫化物矿床I、II矿区矿体地质对比研究[J]. 矿产与地质, 2006, 23(6):514-518.

- Gao Qiangzu, Wang Yushan, Huang Manxiang. Geological comparison study of orebody in mining area I, II of Jinchuan copper-nickel-sulfide deposit [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2006, 23(6):514-518 (in Chinese with English abstract).
- [20] 王泸文, 汤中立, 闫海卿, 等. 金川铜镍硫化物矿床 1 号矿体矿石成因研究[J]. *西北地质*, 2012, 45(4):334-345.
- Wang Luwen, Tang Zhongli, Yan Haiqing, et al. Ore genesis of ore body #1 of the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit [J]. *North Western Geology*, 2012, 45(4):334-345 (in Chinese with English abstract).
- [21] 陈列猛. 金川 I 号岩体及其铜镍硫化物矿床特征和成因 [D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2009.
- Chen Liemeng. Characteristics and Genesis of Ore Body #1 of the Jinchuan Ni-Cu Sulfide Deposit [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2009 (in Chinese with English abstract).
- [22] 甘肃省地质局第六地质队. 甘肃永昌白家咀子铜镍矿第四矿区初步地质勘探报告[R]. 1974.
- No.6 Team of Gansu Province Bureau of Geology. Preliminary Geological Exploration Report in the Fourth Mining Area of Cu-Ni-Sulfide Deposits of Baijiazuzi Formation of Yongchang, Gansu Province[R]. 1974.
- [23] 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, 1995:1-208.
- Tang Zhongli, Li Wenyuan. Mineralizatic Model and Geological Comparison of Jinchuan Cu-Ni-(Pt) Sulfide Deposits [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995:1-208.
- [24] 甘肃省地质矿产局第六地质队. 白家咀子硫化铜镍矿床地质 [M]. 北京: 地质出版社, 1984:1-225.
- No.6 Team of Gansu Province Bureau of Geology. Geology of Cu-Ni-Sulfide Deposits of Baijiazuzi Formation [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984:1-225.
- [25] Taylor S R, McLennan S. The Continental Crust: Its Composition and Evolution [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985: 209-230.
- [26] Song XY, Keays RR, Zhou MF, et al. Siderophile and chalcophile elemental constrints on the origin of the Jinchuan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, NW China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(2): 404-424.
- [27] Naldrett AJ, Asif 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 [J]. *Economic Geology*, 2000, 95(4): 845-865.
- [28] Campbell I H, Naldrett A J. The influence of silicate: Sulfide ratios on the geochemistry of magmatic sulfides [J]. *Economic Geology*, 1979, 74(6): 1503-1506.
- [29] 孙赫, 唐冬梅, 秦克章, 等. 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 Dongmei, Qin Kezhang, et al. Advances of geochemical behavior of chalcophile elements and applications in metallogeny of magmatic Cu-Ni-PGE sulfide deposits[J]. *Geological Review*, 2009, 55(6):840-850(in Chinese with English abstract).
- [30] 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]. *地学前缘*, 2009, 16(4):287-305.
- Song Xieyan, Hu Ruizhong, Chen Liemeng. 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 (in Chinese with English abstract).
- [31] Yan Haiqing, Ding Ruiying, Tang Zhongli, et al. Zircon U-Pb age and geochemistry of the ore-hosting ultramafic complex of Zhouan PGE-Cu-Ni deposit, Henan Province, central China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(6):1479-1487.
- [32] 吕林素, 毛景文, 刘珺. 新元古代岩浆 Ni-Cu-(PGE) 硫化物矿床地质特征、形成时代及其地球动力学背景 [J]. *矿床地质*, 26 (4): 398-416.
- Lv Linsu, Mao Jingwen, Liu jun. Geological characteristics, geochronology and tectonic settings of Neoproterozoic magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposits in China [J]. *Mineral Deposits*, 2007, 26(4): 398-416 (in Chinese with English abstract).
- [33] Xie Wei, Song Xieyan, Deng Yufeng, et al. Geochemistry and petrogenetic implications of a Late Devonian mafic-ultramafic intrusion at the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Lithos*, 2012, 144-145:209-230.
- [34] Tang Zhongli, Yan Haiqing, Jiao Jianguang, et al. Classification of magmatic sulphide deposits in China and mineralization of small intrusion [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(3):412-419.
- [35] 赵振华, 钱汉东, 黄晟. 多元统计分析在金川铜镍矿床两类矿石中的应用 [J]. *高校地质学报*, 2007, 13(1):127-136.
- Zhao Zhenhua, Qian Handong, Huang Sheng. Application of multivariate statistic analysis to two kinds of ores in Jinchuan copper-nickel sulfide deposit [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(1):127-136(in Chinese with English abstract).
- [36] 赵振华, 钱汉东. 金川铜镍硫化物矿床两类矿石的稀土元素地球化学特征研究 [J]. *矿床地质*, 2008, 27(5):613-621.
- Zhao Zhenhua, Qian Handong. Geochemical REE study of two kinds of ores in Jinchuan copper-nickel sulfide deposit [J]. *Mineral Deposits*, 2008, 27(5): 613-621(in Chinese with English abstract).

Striker magma and magma channel in the Jinchuan copper–nickel sulfide magmatic deposit

YAN Hai–qing¹, WANG Qiang¹, HU Yan–qiang²,
WU Jun–ping³, JIA Hui–min⁴, TAN Yu–ting¹

(1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. No. 815 Geological Party, East China Metallurgical and Geological Exploration Bureau, Chaohu 238000, Anhui, China; 3. Geological Environment Monitoring Station of Anhui Province, Hefei 230001, Anhui, China; 4. No. 1 Institute of Geology and Mineral Resources Exploration and Development of Henan Province, Luoyang 471000, Henan, China)

Abstract: The Jinchuan copper–nickel deposit is the third largest nickel, copper sulfide magmatic deposit in the world, which has aroused much attention among deposit geologists both in China and abroad. The IV mining area is an component part of the Jinchuan copper–nickel deposit, but the production and research are rather insufficient due to the low grade (Ni 0.71%, Cu 0.48%) and the great buried depth (below the depth of 140 m). Owing to the impact of the F23 fracture structure, researchers have regarded it as the eastward extension of the No. 2 pluton of the II mining area since the beginning of the exploration work. However, recent detailed drilling investigation has obtained systematic test samples, and the results show that the ore–bearing pluton of the IV mining area is an independent ore–bearing pluton mass with its unique evolution process; its Ni / Cu ratio is by far higher than the Ni/Co ratios of other ore–related pluton; its PGE is strongly depleted, and its "R" factor value is low (30). Trace elements and REE distribution also shows independent complex evolution, and rock structures and lithofacies change significantly, with the characteristics of a typical striker magma of magma channel. A comparison of ore–forming elements and PGE characteristics between several major ore–bearing rock masses has led to the preliminary determination of the spatial location of the magma channel in the Jinchuan copper–nickel sulfide deposit; in addition, some key problems concerning the exploration of the Jinchuan deep resources and the exploration direction are also discussed in this paper.

Key words: frontiers of magma; lithochemistry; magma channel; Jinchuan IV mining area

About the first author: YAN Hai–qing, male, born in 1963, doctor, associate professor, mainly engages in the study of geology, mineral resources exploration and mineral deposits; E–mail: haiqingy@chd.edu.cn.