

文章编号: 0258-7106(2014)04-0727-15

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*

王亮¹, 陈列锰², 宋谢炎^{2*}, 江金进⁴, 符志强¹, 王玉山³, 潘小平³

(1 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 2 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 3 金川集团股份有限公司, 甘肃 金昌 737104; 4 贵州省国土资源勘测规划研究院, 贵州 贵阳 550004)

摘 要 系统分析了金川Ⅱ号岩体中2号矿体西端、中部和东端的硫化物矿石中的铂族元素(PGE)和亲铜元素地球化学特征,以期探讨这些元素的空间变化规律及其成因,以及对金川矿床成矿过程的指示意义。研究结果表明:100%硫化物中,PGE(Ir、Ru、Rh、Pt、Pd)总体从西端到东端逐渐降低,且浸染状矿石和海绵陨铁状矿石的100%硫化物中PGE和亲铜元素含量的变化特征相似。表明金川2号矿体硫化物矿石的PGE和亲铜元素的含量主要受硫化物熔离作用的约束,硫化物熔体分离结晶和后期热液蚀变影响不明显。2号矿体浸染状矿石的100%硫化物中,PGE和亲铜元素含量总体低于1号矿体浸染状矿石的含量,但是前者西端的样品与后者东端的样品,上述元素特征相似,暗示二者是同一岩浆通道系统中硫化物熔离的产物,并且硫化物熔离形成2号矿体时具有比1号矿体低的R值,这也暗示了含矿岩浆是自1号矿体向2号矿体流动的。

关键词 地球化学;铜镍硫化物;铂族元素;亲铜元素;金川矿床

中图分类号 P618.41; P618.63

文献标志码 A

Geochemical characteristics of platinum-group and chalcophile elements in No.2 orebody of Jinchuan Cu-Ni sulfide deposit

WANG Liang¹, CHEN LieMing², SONG XieYan², JIANG JinJin⁴, FU ZhiQiang¹,
WANG YuShan³ and PAN XiaoPing³

(1 College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2 State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China; 3 Jinchuan Group Co., Ltd., Jinchang 737104, Gansu, China; 4 Guizhou Land Survey and Plan Institute, Guiyang 550004, Guizhou, China)

Abstract

Geochemical characteristics of the platinum-group and chalcophile elements of sulfide ores sampled from the western, middle and eastern part of the No. 2 ore body in the Ⅱ segments of Jinchuan intrusion were systematically analyzed with the purpose of investigating their spatial variation regularity and genesis as well as their indicative significance for the ore-forming process of the Jinchuan deposit. The results imply that the values of PGE(Ir, Ru, Rh, Pt, Pd) on a 100% sulfide basis decrease gradually from the west to the east in general, and

* 本文受到中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室项目(编号:SKLDDG-ZY125-06)、中国科学院国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划“陆内成矿作用研究团队”(KZZD-EW-TZ-20)与国家自然科学基金(编号:40973038、41003022和41172090)资助

第一作者简介 王亮,男,1988年生,在读硕士研究生,地球化学专业,主要研究矿床地球化学。Email: wll-liang@126.com

** 通讯作者 宋谢炎,男,1962年生,研究员,研究方向为岩石与矿床地球化学,Email: songxieyan@vip.gyig.ac.cn

收稿日期 2014-06-10; 改回日期 2014-07-09。张绮玲编辑。

there is a similar variation of the concentrations of PGE and chalcophile elements on a 100% sulfide basis in both disseminated and net-textured sulfide ores. The characteristics indicate that the concentrations of PGE and chalcophile elements were restrained by the segregation of sulfides but little affected by fractional crystallization of sulfide melts and late-stage alteration. The concentrations of PGE and chalcophile elements of disseminated ores on a 100% sulfide basis in No. 2 orebody are lower than those in No. 1 orebody, but the values of these elements in the western part of No. 2 orebody are similar to those in the eastern part of the No. 1 orebody, which implies that both of the orebodies resulted from the segregation of sulfides in the same magma conduit, and during the rock-forming process the ore-bearing magma flowed from No. 1 to No. 2 orebody because of the lower R value of No. 2 than that of No. 1 in the process of segregation of sulfide melts.

Key words: geochemistry, Ni-Cu sulfide, platinum-group element, chalcophile elements, Jinchuan deposit

金川超大型 Ni-Cu-(PGE) 硫化物矿床位于华北克拉通西南部的阿拉善地块西南缘龙首山隆起带内,是仅次于俄罗斯 Noril'sk-Talnakh 和加拿大 Sudbury 之后的世界第三大、中国最大的在采岩浆铜镍硫化物矿床(Naldrett, 2004)。目前,金川矿床已探明的 Ni 金属资源量达到 558 万吨,其平均品位为 1.06%,Cu 资源量达到 354 万吨,其平均品位为 0.75%(甘肃省地矿局第六地质大队,1984;汤中立等,1995)。近年来,还不断有新的硫化物矿体被勘探发现(金川集团股份有限公司地质勘查院,2011)。金川超基性岩体出露面积仅有 1.34 km²,Ni-Cu 硫化物矿化率约为 50%,成为“小岩体成大矿”的典型代表(汤中立等,2006)。因此,金川矿床独特的地质特征、巨大的经济价值以及重要的找矿潜力引起中外地质学家们的密切关注(汤中立,1991;Chai et al., 1992a;1992b;汤中立等,1995;解广轰等,1998;Li et al., 2004;张宗清等,2004;Ripley et al., 2005;李士彬等,2007;Lehmann et al., 2007;陈列锰等,2008;2009a;2009b;Li et al., 2011)。近年来,金川含矿岩体的成因机制和成矿模型的研究取得了新的进展,特别是宋谢炎等(Song et al., 2006;2009;2012)和陈列锰等(Chen et al., 2013)通过对岩体系统的岩相学、矿物学、岩石地球化学、矿区构造以及铂族元素(PGE)地球化学研究,指出金川岩体原本由东、西 2 个独立的岩体组成,金川岩体目前的产状是后期构造活动挤压的结果,东、西 2 个岩体的成岩机制和成矿过程存在明显的差别。

尽管上述研究对于揭示金川矿床的成因机制具有重要意义,但是已有的研究样品大部分都采自单个钻孔或者地表,仅能反映元素地球化学纵向变化的特征,可能代表了硫化物分离结晶的空间效应,而对岩体的元素地球化学的横向变化规律缺乏系统探

讨,严重制约了对硫化物岩浆通道成矿作用的认识。此外,对金川矿床中与铜镍硫化物密切共存的亲铜元素(As、Bi、Sb、Se、Te)地球化学特征及其成因意义的研究鲜有涉及。鉴于此,本文在前人研究的基础上,通过分析金川 II 号岩体赋存的 2 号矿体沿走向不同部位的 Ni、Cu、PGE 和亲铜元素的地球化学特征,试图厘清这些元素的空间变化规律及其成因机制,进一步揭示 2 号矿体的硫化物岩浆通道的成矿作用。

1 金川岩体地质特征

金川超大型 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床(锆石 SHRIMP U-Pb 年龄(827±8)Ma, Li et al., 2005; 锆石 ID-TIMS U-Pb 年龄(831.8±0.6) Ma, Zhang et al., 2010)产于镁铁质-超镁铁质岩体中,岩体位于华北板块西侧阿拉善地块西南边缘的龙首山隆起带内(图 1a,汤中立等,1995;2000)。金川岩体侵入于古元古界白家咀子组云母石英片岩、黑云斜长片麻岩、白云质大理岩及条带状混合岩中(图 1b),岩体呈不规则岩墙状,长约 6.5 km,宽 20~527 m,最大垂直深度超过 1100 m,出露面积仅有 1.34 km²;岩体走向 NW50°,倾向 SW,倾角 50~80°。金川岩体被一系列 NEE 向断裂 F₈、F_{16.1}、F₂₃分割为 4 个岩体,从西向东依次为Ⅲ号、Ⅰ号、Ⅱ号、Ⅳ号岩体(图 1b)。

金川岩体主要由纯橄岩、二辉橄岩、橄榄二辉岩、辉石岩组成,局部含少量的斜长二辉橄岩。对金川岩体进行系统的岩相学、矿物学、岩石地球化学研究后,可将岩体以 F_{16.1}为界,划分为 2 个独立的岩体:西岩体(F_{16.1}以西部分,包括Ⅰ号和Ⅲ号岩体)和东岩体(F_{16.1}以东部分,包括Ⅱ号和Ⅳ号岩体)(Song et al., 2009; 2012; Chen et al., 2013)。金川西岩体

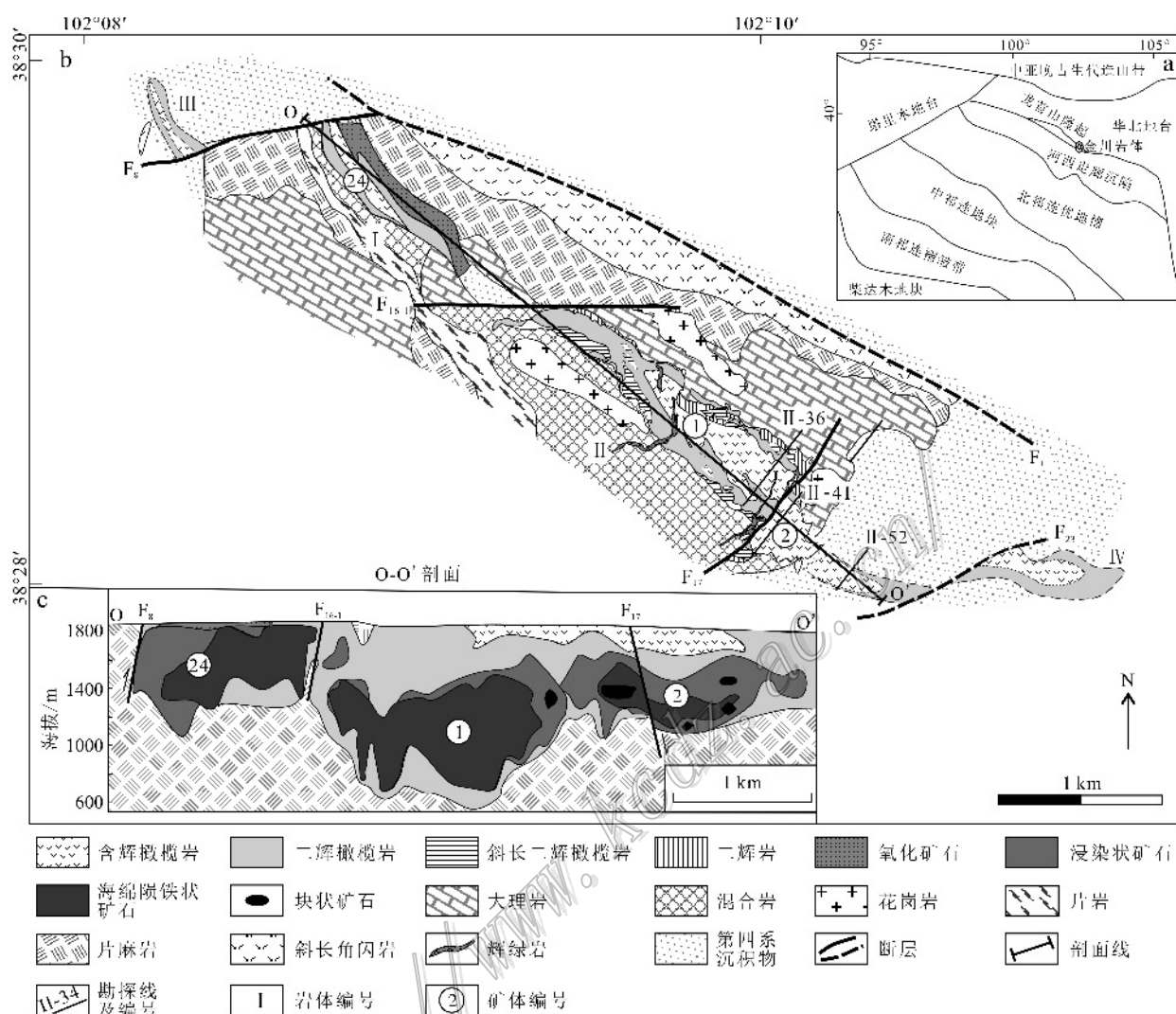


图1 金川矿区地质图(据汤中立等,1995;Song et al.,2012)

Fig. 1 Geological map of the Jinchuan deposit (modified after Tang et al., 1995; Song et al., 2012)

由下部和上部2个岩相带组成:上部岩相带在岩体西端较厚,向东变薄,仅在其底部含有稀疏浸染状硫化物(1%~5%硫化物),其组成从下到上依次为:细粒纯橄岩、中细粒二辉橄岩和中细粒橄橄二辉岩,各岩相之间呈渐变过渡关系;下部岩相带则在岩体西端薄东端厚,主要由粗粒(硫化物)纯橄岩和二辉橄橄岩组成,橄橄石粒径为5~8 mm,其含量为40%~80%,单斜辉石含量为5%~30%。金属硫化物主要呈浸染状、海绵陨铁状分布于橄橄石和单斜辉石颗粒间隙,硫化物含量达到8%~30%,局部含半块状-块状矿石,其硫化物含量达50%以上。上述硫化物矿石构成金川矿床第三大矿体——24号矿体。此外,下部岩相带的底部局部含有少量辉石岩。下部岩相带和上部岩相带呈突变接触(Song et al.,

2012; Chen et al., 2013)。

金川Ⅱ号岩体全长约3000 m,在 F_{17} 断层处最宽(约530 m,图1b),岩体西段具有对称岩相分布的特征:中粗粒海绵陨铁状硫化物纯橄岩分布在核部,向边缘两侧逐渐过渡为中粗粒二辉橄橄岩(浸染状硫化物)、橄橄二辉岩,岩相之间呈渐变过渡(汤中立等,1995;李士彬等,2007; Song et al., 2009)。硫化物纯橄岩和硫化物二辉橄橄岩构成了巨大的1号矿体(图1c)。在岩体东端(14线以东),细粒纯橄岩呈“上叠体”产于中粗粒二辉橄橄岩之上,两者呈突变接触关系,细粒纯橄岩中橄橄石含量为80%~95%,粒径为0.5~3 mm;二辉橄橄岩的橄橄石含量为50%~75%,辉石含量为25%~45%,岩体边缘为斜长二辉橄橄岩(斜长石>10%)和粗粒辉石岩

(图1b)(Song et al., 2009)。中粗粒硫化物二辉橄辉岩产于岩体下部和底部,构成金川矿床第二大矿体——2号矿体。

2 矿体地质特征

尽管目前已经发现的金川矿床硫化物矿体多达200多个,但主要的3个矿体——1号、2号和24号矿体赋存有85%以上的金属成矿元素(汤中立等,1995)。其中,24号矿体主要赋存于金川西岩体的下部岩相带,呈似层状产出,矿体的空间形态受岩体形态的控制,在东、西2个凹陷部位产有厚大的硫化物富矿石,而中部凸起部位矿体厚度变薄(图1c)。1号矿体赋存于Ⅱ号岩体的西段(勘探线4~28之间),呈“似层状”、“透镜状”、“板状”产出,产状与岩体底部产状基本一致;硫化物矿体在12~16线最厚,向东、西两端减薄;1号矿体呈“同心层状”,核部为海绵陨铁状硫化物,向两侧边部过渡为浸染状硫化物(图1c)。

金川2号硫化物矿体赋存于Ⅱ号岩体的东段(30~56线)。2号矿体长约1300 m,最大平均厚度118 m,呈不规则扁豆体产于岩体下部和底部。其富矿体长900 m,厚42 m,矿体上部端点处于1500 m标高,下端尖灭于1100~950 m标高(图1c)。矿体受 F_{17} 逆断层的影响,导致矿体两端在水平和垂向上产生了较大位移(甘肃省地质矿产局第六地质队,1984)。2号矿体以海绵陨铁状矿石和浸染状矿石为主,前者通常产于后者的下部和底部。海绵陨铁状矿石含18%~20%金属硫化物,组成如下:磁黄铁矿约8%~10%,镍黄铁矿约5%,黄铜矿约2%。浸染状矿石的硫化物含量为4%~12%,以磁黄铁矿为主,含少量镍黄铁矿和黄铜矿。此外,少量脉状或扁豆体块状矿石产于2号矿体底部或在矿体底部的裂隙内分布,其硫化物含量为50%~90%,主要由磁黄铁矿(40%~75%)、镍黄铁矿(10%~25%)和黄铜矿(5%~15%)组成(甘肃省地质矿产局第六地质队,1984)。

3 样品采集与分析

本次研究的样品采自2号矿体中部(41线)和东部(52线)井下穿脉坑道中。从岩体北段往南沿穿脉坑道依次采样,其中,41线共采集浸染状矿石4件(S

<5%),海绵陨铁状矿石13件(S>5%);52线共采集浸染状矿石7件。同时,为了分析元素的空间变化和地球化学特征,笔者将这些数据与Song等(2009)和江金进等(2014)文中的数据进行了比较和分析。

样品的Cu、Ni及亲Cu元素的含量分析委托广州澳实分析检测有限公司采用ICP-MS法(四酸消解,等离子体发射光谱分析)完成;S含量采用红外吸收(IR)结合重量法测定;PGE含量的分析在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成,采用改进的高压釜-同位素稀释法测定,其分析流程见Qi等(2011)。

4 分析结果

4.1 Ni、Cu、PGE的含量变化

全岩的Ni、Cu、PGE及S含量如表1所示,含量的空间变化如图2所示。2号矿体中间部位(41线)全岩的Ni、Cu、PGE及S含量总体高于矿体西端(36线)和东端(52线),如41线样品的 $w(\text{Ni})$ 为0.7%~2.4%, $w(\text{Cu})$ 为0.4%~2.5%, ΣPGE 为 20.5×10^{-9} ~ 355.5×10^{-9} ,52线样品的 $w(\text{Ni})$ 为0.03%~0.9%, $w(\text{Cu})$ 为0.01%~0.8%, ΣPGE 为 3.5×10^{-9} ~ 27.04×10^{-9} 。矿体自北往南(即从底部向上),成矿元素的含量逐渐降低,如41线样品的 $w(\text{Ni})$ 从2.4%(Ⅱ41-A2)降低为0.8%(Ⅱ41-A21),特别是 ΣPGE 从 148.3×10^{-9} (Ⅱ41-A2)降低到 20.5×10^{-9} (Ⅱ41-A19);52线样品的情况与之相似(表1、图2)。与上述特征不同的是,100%硫化物(换算方法见Song et al., 2009和Chen et al., 2013)的Ni、Cu含量变化不大,但PGE含量自西端(36线)到中间(41线)再到东端(52线)逐渐降低,如41线样品的 $w(\text{Ni})$ 为4.3%~9%, $w(\text{Cu})$ 为2.3%~7.77%, ΣPGE 为 232.3×10^{-9} ~ 2175.2×10^{-9} ,52线样品的 $w(\text{Ni})$ 为2.9%~9.44%, $w(\text{Cu})$ 为2.4%~6.8%, ΣPGE 为 31.4×10^{-9} ~ 380.2×10^{-9} 。另外,所有样品的Cu/Ni(0.25~1.74)、Pd/Ir(2.8~31.6)比值变化较小。

在全岩的元素含量相关图解中,S与Ni、Cu、Ir和Ru呈良好的正相关关系(图3a~d),暗示这些元素主要赋存于硫化物中;S与Pt、Pd也表现出正相关特征(图3e、f),但相关性总体较弱,表明Pt、Pd既可能赋存于硫化物中,也可能以铂族矿物形式存在

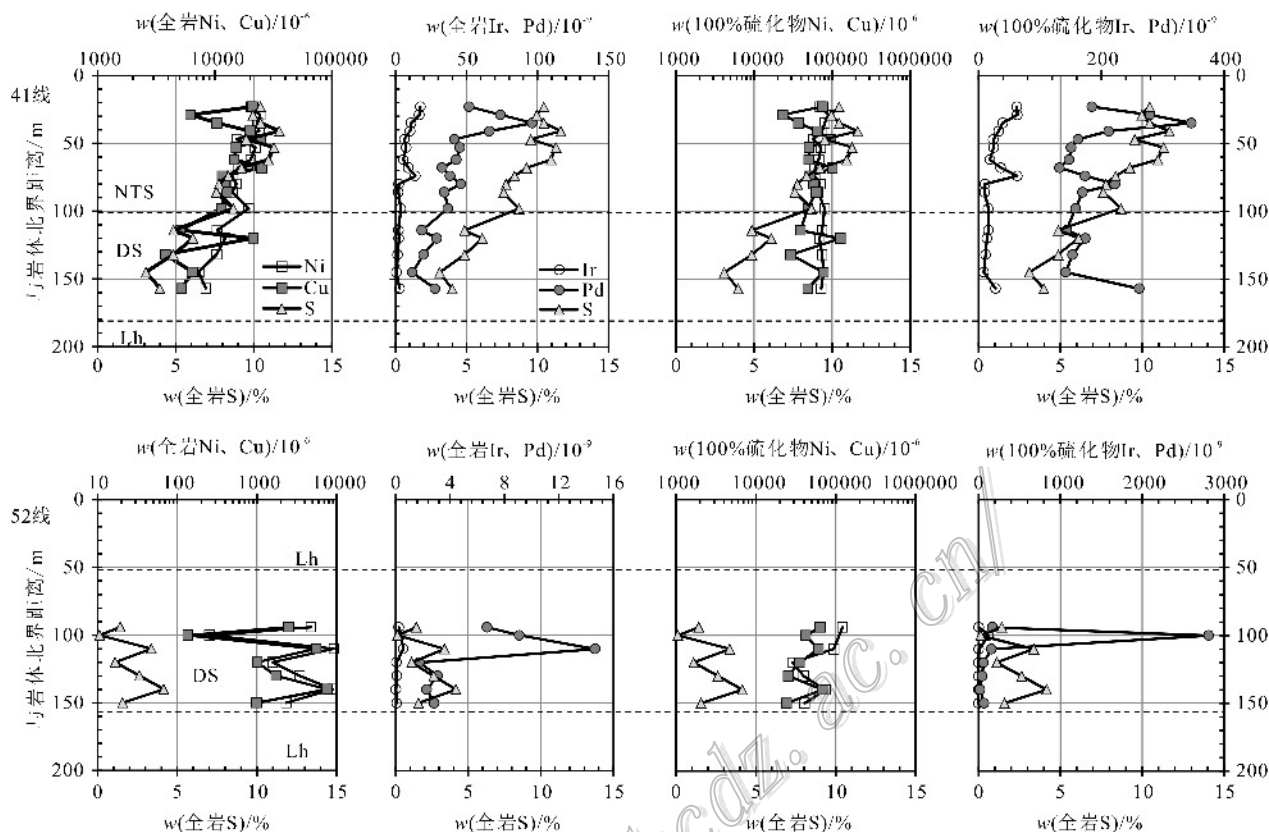


图2 金川矿床2号矿体41线、52线全岩和100%硫化物中Ni、Cu、Ir、Pd含量变化图

Lh—二辉橄榄岩; DS—浸染状矿石; NTS—海绵陨铁状矿石

Fig. 2 Variations of Ni, Cu, Ir, Pd in the whole rocks and on the basis of 100% sulfide along No. 41 and No. 52 exploration line of No. 2 orebody in the Jinchuan deposit

Lh—Lherzolite; DS—Disseminated sulfide ore; NTS—Net-textured sulfide ore

(Su et al., 2008; Chen et al., 2013)。在100%硫化物元素图解(图4)中,2号矿体的浸染状矿石中 Ir_{100} 、 Ru_{100} 和 Rh_{100} (下标100表示元素在100%硫化物中的含量)含量分别在 $0.3 \times 10^{-9} \sim 65.7 \times 10^{-9}$ 、 $1 \times 10^{-9} \sim 75 \times 10^{-9}$ 和 $0.4 \times 10^{-9} \sim 105 \times 10^{-9}$ 之间,与海绵陨铁状($\text{Ir}_{100} = 10.1 \times 10^{-9} \sim 190.1 \times 10^{-9}$, $\text{Ru}_{100} = 6.7 \times 10^{-9} \sim 301.5 \times 10^{-9}$, $\text{Rh}_{100} = 9.2 \times 10^{-9} \sim 201 \times 10^{-9}$)及块状矿石的元素含量($\text{Ir}_{100} = 11.50 \times 10^{-9} \sim 67.6 \times 10^{-9}$, $\text{Ru}_{100} = 11 \times 10^{-9} \sim 180 \times 10^{-9}$, $\text{Rh}_{100} = 12 \times 10^{-9} \sim 37 \times 10^{-9}$)相似,并且三者呈现出非常显著的正相关特征(图4a、b),表明它们具有相似的地球化学行为。与之不同,尽管2号矿体的浸染状矿石和海绵陨铁状矿石的 Ir_{100} 与 Pt_{100} 、 Pd_{100} 表现出一定的正相关关系,但是块状矿石中的 Pt_{100} 、 Pd_{100} 含量明显低于其他矿石(图4c~e)。

4.2 亲铜元素组成特征

2号矿体矿石的亲铜元素(As、Bi、Sb、Se、Te)含量列于表1中。41线亲铜元素的结果如下: $w(\text{As})$ 为 $0.9 \times 10^6 \sim 5 \times 10^6$, $w(\text{Bi})$ 为 $0.46 \times 10^6 \sim 1.85 \times 10^6$, $w(\text{Sb})$ 为 $0.08 \times 10^6 \sim 1.84 \times 10^6$, $w(\text{Se})$ 为 $10.5 \times 10^6 \sim 28 \times 10^6$, $w(\text{Te})$ 为 $0.88 \times 10^6 \sim 1.79 \times 10^6$, 52线的亲铜元素含量: $w(\text{As})$ 为 $0.5 \times 10^6 \sim 7.2 \times 10^6$, $w(\text{Bi})$ 为 $0.05 \times 10^6 \sim 0.79 \times 10^6$, $w(\text{Sb})$ 为 $0.07 \times 10^6 \sim 0.22 \times 10^6$, $w(\text{Se})$ 为 $1.8 \times 10^6 \sim 13.9 \times 10^6$, $w(\text{Te})$ 为 $0.05 \times 10^6 \sim 1.71 \times 10^6$ 。Bi、Se、Te与S表现为较好的正相关性,暗示它们主要赋存在硫化物中,而As、Sb与S之间的相关性并不明显,暗示二者可能受到轻微的热液改造作用的影响(Hattori et al., 2002)。不同类型的矿石中,除Sb的含量在2号矿体与24号矿体中的含量相当,其余亲铜元素在2号矿体的含量明显低于24号矿体相应矿石类型的含量(图5a~f)。

表 1 金川矿床 2 号矿体不同类型矿石 Cu、Ni、S、PGE 及半金属元素分析结果
Table 1 Concentrations of Cu, Ni, S, PGE and semi-metallic elements of different types of ores from No. 2 orebody in the Jinchuan deposit

采样位置	样品编号	距离岩体 北界/m	矿石类型	w(B)/%				w(B)/10 ⁻⁹				w(B)/10 ⁻⁶				Cu/Ni	Cu/Pd (×1000)	Pd/Ir		
				S	Ni	Cu	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	ΣPGE	As	Bi	Sb				Se	Te
41 线 1172 m 水平中段	II41-A1	23	NTS	10.45	2.04	2.12	17.53	23.52	6.88	6.52	51.90	106.35	0.90	1.85	0.10	18.00	1.14	1.04	408.48	2.96
	II41-A2	29	NTS	9.96	2.44	0.62	16.82	29.81	7.84	19.80	74.00	148.27	0.90	0.58	0.16	24.50	1.36	0.25	83.78	4.40
	II41-A3	35	NTS	10.45	2.32	1.04	11.05	16.11	7.09	5.15	96.50	135.90	1.70	0.59	0.09	20.70	1.61	0.45	107.77	8.73
	II41-A4	41	NTS	11.65	2.40	2.01	10.33	11.62	5.37	262.00	66.20	355.52	1.50	0.71	0.18	28.00	1.79	0.84	303.63	6.41
	II41-A5	47	NTS	9.53	1.54	2.48	6.24	7.29	3.70	7.03	41.50	65.76	1.00	0.69	0.09	26.40	1.00	1.61	597.59	6.65
	II41-A6	53	NTS	11.30	2.23	1.53	7.53	19.49	4.02	184.00	45.40	260.44	0.90	0.67	0.09	24.00	1.23	0.69	337.00	6.03
	II41-A7	62	NTS	10.95	2.03	1.47	5.49	5.39	5.18	26.90	42.90	85.86	1.50	0.75	0.12	27.70	1.43	0.72	342.66	7.81
	II41-A8	68	NTS	9.23	1.58	2.52	9.09	7.82	27.06	181.00	32.90	257.87	5.00	0.87	1.84	20.90	1.20	1.59	765.96	3.62
	II41-A9	74	NTS	8.37	1.40	1.16	14.01	66.85	32.21	44.70	38.50	196.27	2.30	0.50	0.12	18.90	0.96	0.83	301.30	2.75
	III-A10	80	NTS	7.78	1.53	1.21	2.28	1.86	5.68	13.10	46.20	69.12	2.10	0.62	0.19	19.50	1.11	0.79	261.90	20.26
	III-A11	86	NTS	7.62	1.42	1.27	2.05	1.36	2.27	144.60	34.50	184.78	3.40	0.52	0.31	19.60	0.99	0.89	368.12	16.83
	III-A13	98	NTS	8.70	1.95	1.14	3.75	1.96	3.88	95.80	36.80	142.19	2.40	0.62	0.08	22.10	1.10	0.58	309.78	9.81
	III-A14	114	DS	4.87	1.05	0.51	2.13	1.99	1.33	16.90	18.60	40.95	1.40	0.53	0.13	12.30	0.89	0.49	274.19	8.73
	III-A15	120	NTS	6.11	1.23	2.14	2.34	2.71	1.54	24.10	29.10	59.79	2.70	0.65	0.13	17.50	0.95	1.74	735.40	12.44
	III-A17	132	DS	4.86	1.04	0.38	1.49	1.76	0.87	6.06	19.70	29.88	1.80	0.46	0.11	11.60	0.88	0.37	192.89	13.22
	III-A19	145	DS	3.10	0.73	0.65	0.73	1.04	0.62	6.18	11.90	20.47	1.80	0.51	0.11	10.50	0.92	0.89	546.22	16.30
	III-A21	157	DS	3.99	0.84	0.52	2.97	3.64	2.66	194.00	27.80	231.07	4.10	0.73	0.18	10.70	0.97	0.62	187.05	9.36
	II52-A5	94	DS	1.43	0.48	0.25	0.24	0.28	4.12	3.54	6.74	14.92	7.20	0.33	0.22	6.10	0.58	0.52	370.92	28.08
	II52-A6	100	DS	0.13	0.03	0.01	0.41	0.62	1.06	15.85	9.10	27.04	0.50	0.05	0.07	1.80	0.05	0.33	14.95	22.20
	52 线 1150 m 水平中段	II52-A7	110	DS	3.38	0.93	0.56	0.57	0.74	0.44	4.77	14.66	21.18	2.50	0.70	0.10	9.30	1.18	0.60	379.95
II52-A8		120	DS	1.11	0.16	0.10	0.07	0.03	0.79	1.79	1.77	4.45	4.00	0.29	0.18	3.10	0.19	0.63	570.62	25.29
II52-A9		130	DS	2.63	0.35	0.18	0.11	0.37	0.11	0.48	3.09	4.16	2.40	0.29	0.20	5.20	0.36	0.51	566.34	28.09
II2-A10		140	DS	4.16	0.89	0.76	0.03	0.21	0.04	0.92	2.30	3.50	7.20	0.79	0.16	13.90	1.71	0.85	3317.39	76.67
II2-A11		150	DS	1.58	0.24	0.10	0.09	0.05	0.09	1.80	2.84	4.87	2.40	0.19	0.21	3.70	0.22	0.42	350.00	31.56

注: DS 代表浸染状矿石; NTS 代表海绿帘角闪状矿石。

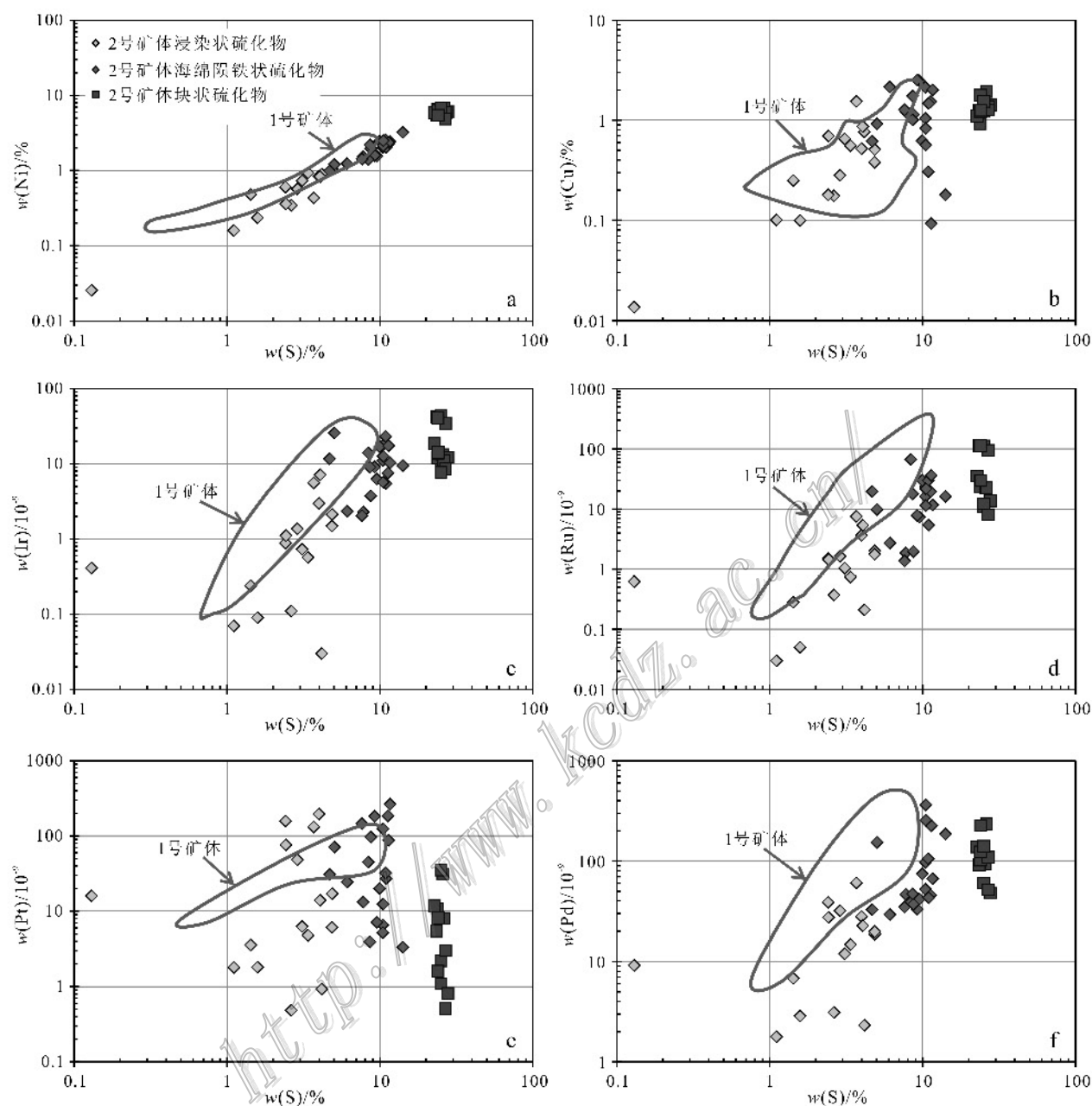


图3 金川矿床2号矿体不同类型矿石全岩的Cu、Ni、Ir、Ru、Pt、Pd与S的相关图(1号矿体和2号矿体部分数据引自Song et al., 2009和未发表数据)

Fig. 3 Variations of S versus Cu, Ni, Ir, Ru, Pt, Pd in whole rock for the samples from No. 2 orebody in the Jinchuan deposit (data of No. 1 and partial data of No. 2 orebody after Song et al., 2009 and unpublished data)

经过100%硫化物计算以后,2号矿体浸染状矿石的亲铜元素含量要高于海绵陨铁状矿石(图6a~e),其中浸染状矿石的 $w(\text{As}_{100})$ 为 $10.8 \times 10^{-6} \sim 183.5 \times 10^{-6}$, $w(\text{Bi}_{100})$ 为 $3.6 \times 10^{-6} \sim 10.1 \times 10^{-6}$, $w(\text{Sb}_{100})$ 为 $0.9 \times 10^{-6} \sim 6.3 \times 10^{-6}$, $w(\text{Se}_{100})$ 为 $76.1 \times 10^{-6} \sim 155.4 \times 10^{-6}$, $w(\text{Te}_{100})$ 为 $5.3 \times 10^{-6} \sim 15.3 \times 10^{-6}$,而海绵陨铁状矿石的

$w(\text{As}_{100})$ 为 $3 \times 10^{-6} \sim 20.1 \times 10^{-6}$, $w(\text{Bi}_{100})$ 为 $2.1 \times 10^{-6} \sim 6.6 \times 10^{-6}$, $w(\text{Sb}_{100})$ 为 $0.3 \times 10^{-6} \sim 7.4 \times 10^{-6}$, $w(\text{Se}_{100})$ 为 $64.1 \times 10^{-6} \sim 104.7 \times 10^{-6}$, $w(\text{Te}_{100})$ 为 $3.9 \times 10^{-6} \sim 5.8 \times 10^{-6}$ 。在41线,自北到南, $w(\text{As}_{100})$ 从 3.2×10^{-6} 升高到 38.6×10^{-6} , $w(\text{Se}_{100})$ 从 64.1×10^{-6} 升高到 100.7×10^{-6} ,而Bi、Te、Sb变化不明显。

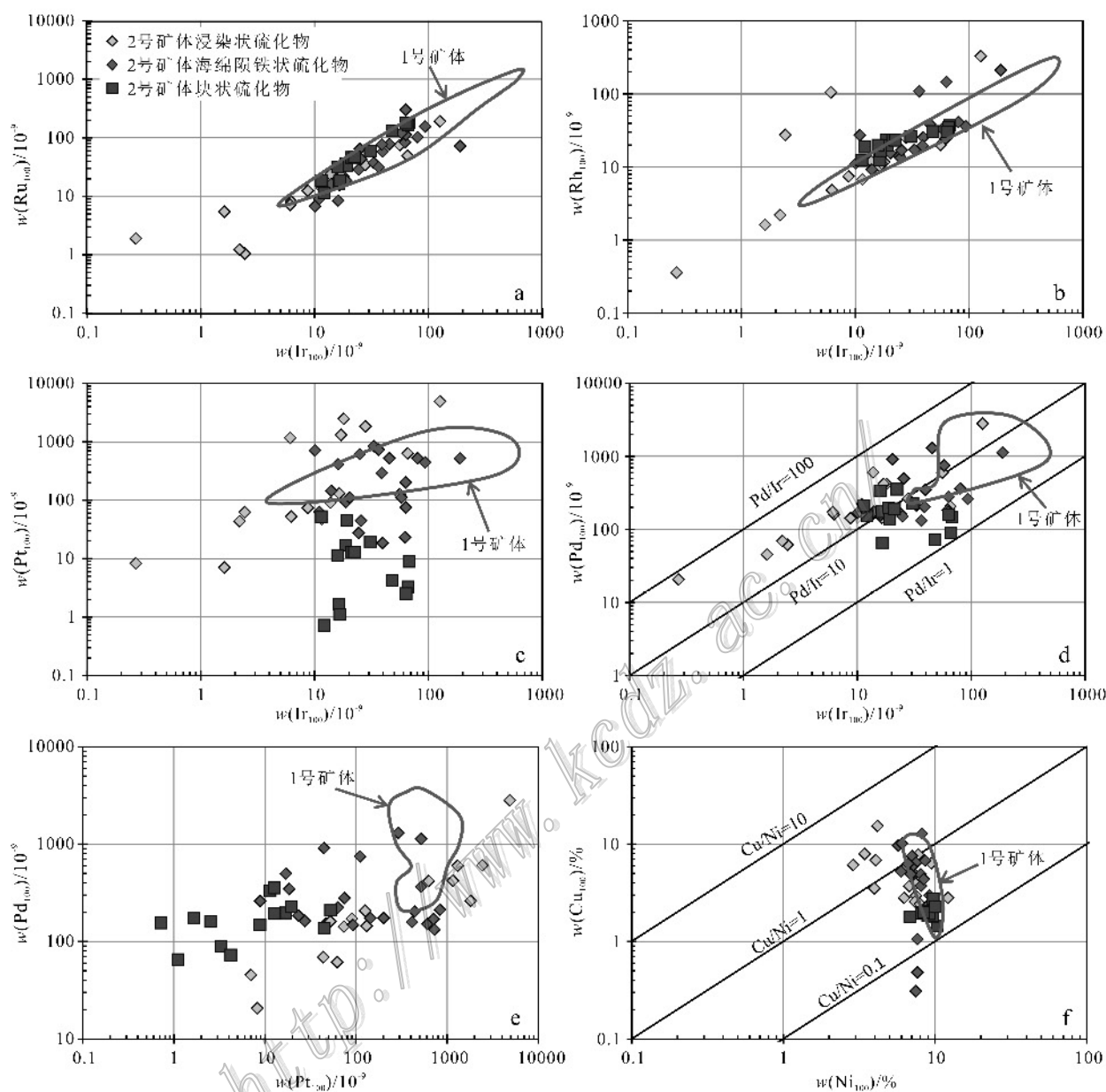


图4 金川矿床2号矿体不同类型矿石100%硫化物中Ir与Ru、Rh、Pt、Pd、Pt与Pd、Ni与Cu相关图
(2号矿体和1号矿体部分数据引自 Song et al., 2009 和未发表数据)

Fig. 4 Variations of Ir versus Ru, Rh, Pt and Pd, Pt versus Pd and Ni versus Cu on the basis of 100% sulfide for the samples from No. 2 ore body in the Jinchuan deposit (data of No. 2 and partial data of No. 1 orebody after Song et al., 2009 and unpublished data)

5 讨论

硫化物熔体从硅酸盐母岩浆中熔离、岩浆通道系统成矿是岩浆铜镍硫化物矿床的主要成矿机制 (Naldrett, 2004)。尽管前人对金川矿床进行了大量

的Ni、Cu及PGE元素的研究(Chai et al., 1992a; Song et al., 2006; 2009; Su et al., 2008; Chen et al., 2013),但对矿床的成因机制仍存在较大争论。Chai等(1992b)认为金川矿床的3个主要矿体(1号、2号和24号)代表了3个不同岩浆房的根部,硫化物为原地熔离堆积形成。Song等(2006; 2009; 2012)

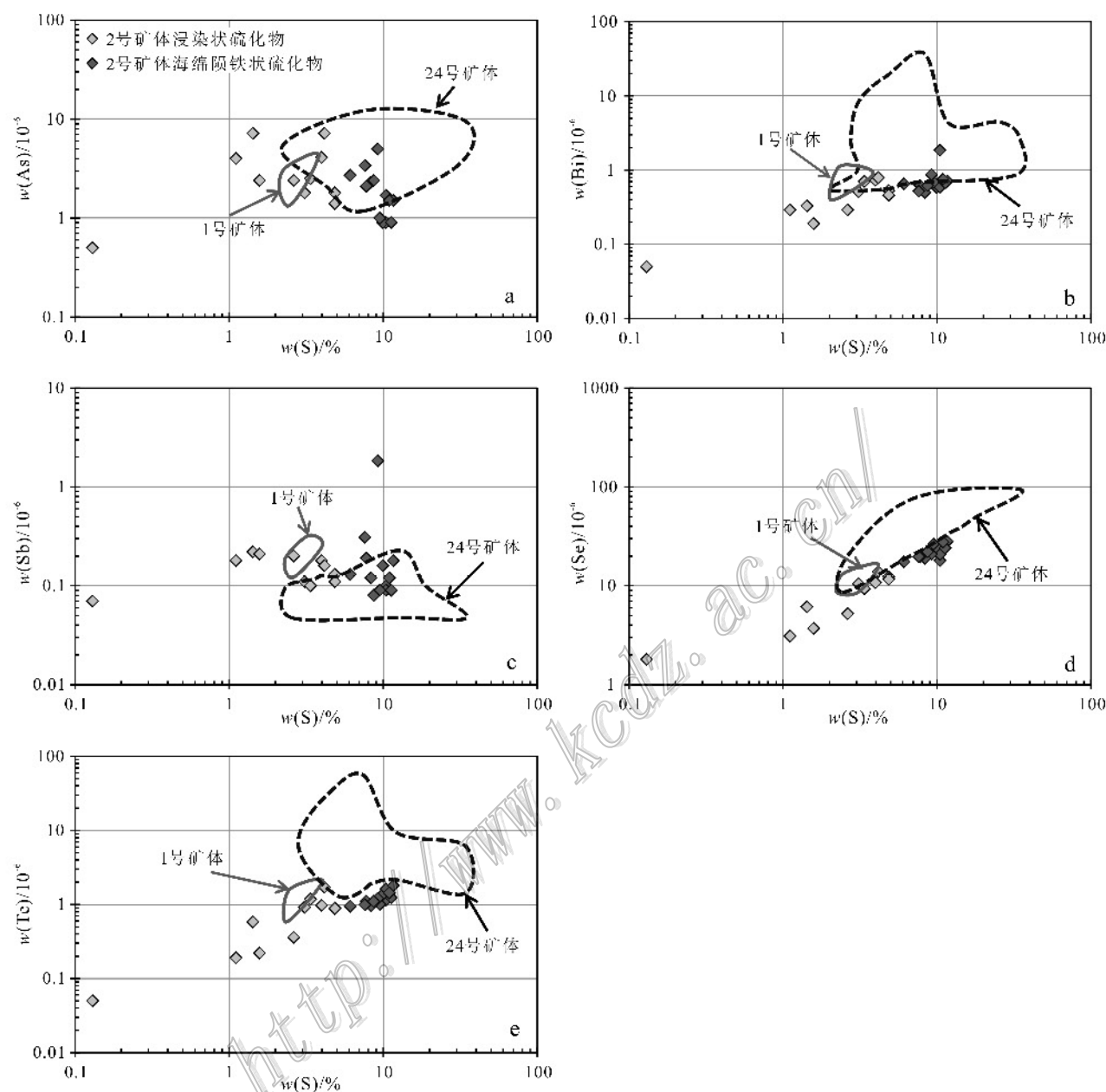


图 5 金川矿床 2 号矿体不同类型矿石的 S 与亲铜元素(As、Bi、Sb、Se、Te)相关图(1 号矿体和 24 号矿体数据引自未发表数据;江金进等, 2014; Chen et al., 2013)

Fig. 5 Variations of S versus As, Bi, Sb, Se, Te in whole rock for the samples from No. 2 orebody in the Jinchuan deposit (data of No. 24 orebody and data of No. 1 orebody after unpublished data; Chen et al., 2013; Jiang et al., 2014)

和 Chen 等(2013)提出金川岩体是由西部和东部 2 个独立的岩体(岩浆房)经构造活动“拼接”形成, 并且 2 个岩体的成岩机制、硫化物成矿过程存在差异。以下重点讨论 2 号矿体沿走向不同部位的 Ni、Cu、PGE 和亲铜元素含量变化及控制因素, 并深入探讨成矿元素含量变化对硫化物岩浆通道成矿的指示意义。

5.1 硫化物熔体分离结晶作用

大量研究表明, 硫化物中成矿元素含量的主要控制因素包括: ① 母岩浆性质及其元素的含量, ② 硫化物熔离的量(硅酸盐岩浆/硫化物熔体质量比 R 值), 以及③ 硫化物分离结晶作用(Naldrett, 2004; 宋谢炎等, 2009)。此外, 成矿后热液蚀变作用可能会导致成矿元素发生活化迁移(Keays et al., 1982;

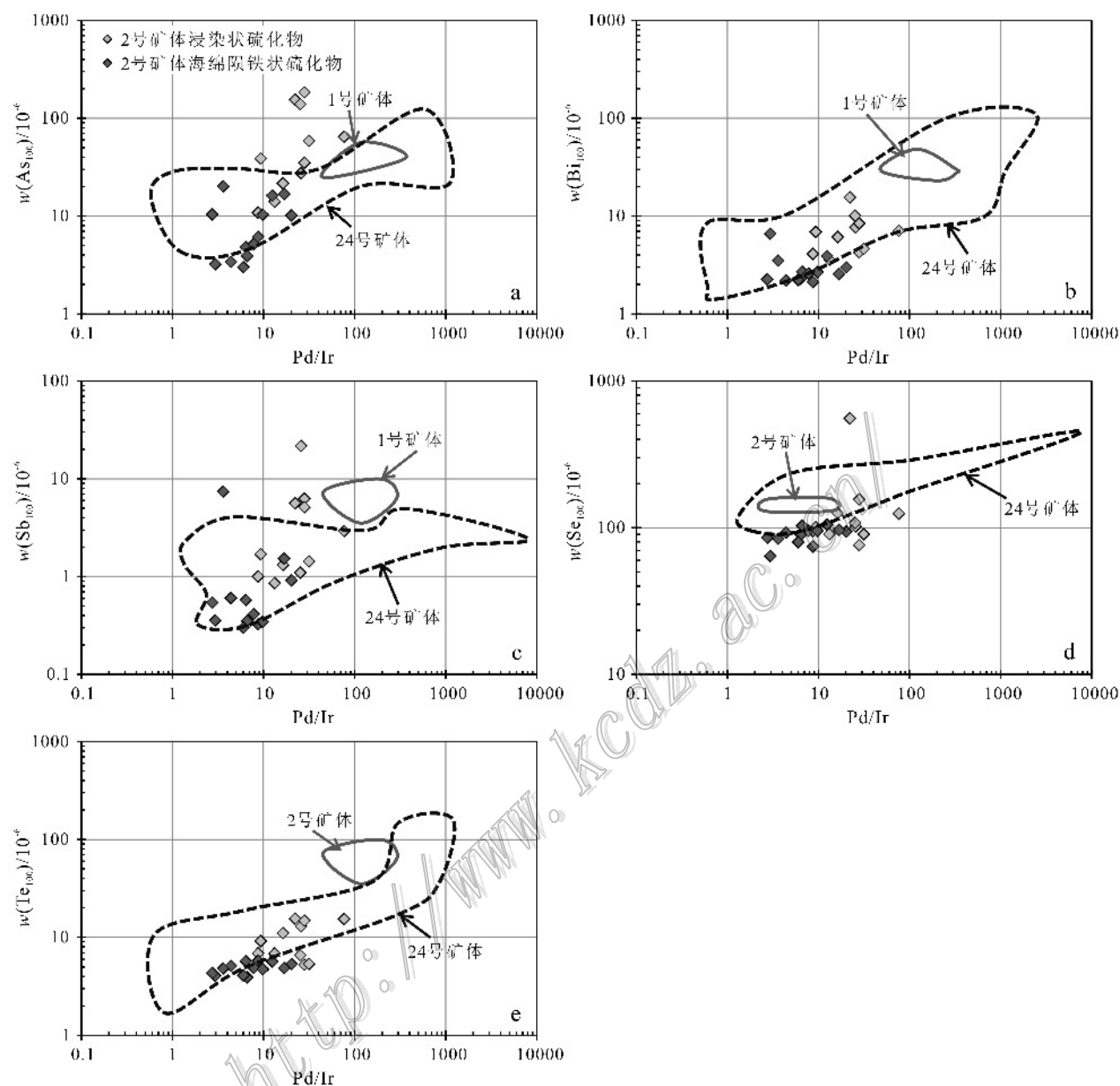


图6 金川矿床2号矿体100%硫化物中Pd/Ir与As、Bi、Sb、Se、Te相关图(1号矿体和24号矿体数据引自未发表数据; 江金进等, 2014; Chen et al., 2013)

Fig. 6 Variations of Pd/Ir versus As, Bi, Sb, Se and Te on the basis of 100% sulfide for the samples from No. 2 orebody in the Jinchuan deposit (data of No. 1 and partial data of No. 24 orebody after unpublished data; Jiang et al., 2014; Chen et al., 2013)

Keays, 1995; Maier et al., 1996; Barnes et al., 2012)。尽管有部分研究指出热液蚀变作用可能改造了金川矿床硫化物中的部分成矿元素(Yang et al., 2006; Su et al., 2008),但是最近的分析结果表明,这种后期蚀变可能并没明显改变成矿元素的特征(Song et al., 2009; Chen et al., 2013)。本次分析的结果显示,S与Ni、Cu及PGE良好的相关性(图3),特别是S与Se、Te及Bi之间较强的相关关系,

一致表明后期热液蚀变对2号矿体中硫化物的PGE和亲铜元素的改造不显著(图5)。因此,Ni、Cu、PGE和亲铜元素含量变化可能主要受硫化物分离结晶和熔离作用的约束。

硫化物熔体熔离、聚集,随温度下降会发生硫化物分离结晶,由于Ni、Cu和PGE以及亲铜元素的地球化学性质差异明显,因此,在硫化物熔体分离结晶过程中,元素间会产生显著分异。实验岩石学研究

表明,发生硫化物熔体分离结晶时,单硫化物固溶体(mss)较早结晶,Ir、Ru的 $D_{mss/melt}^{mss/melt}$ (单硫化物固溶体的分配系数)值分别为3.4~11、4.2, Pt、Pd的 $D_{mss/melt}^{mss/melt}$ 值分别为0.05~0.2、0.09~0.2(Fleet et al., 1993; Barnes et al., 1997),而亲铜元素的 $D_{mss/melt}^{mss/melt}$ 均小于1($D_{Ag}^{mss/melt}=0.01\sim0.4$ 、 $D_{Bi}^{mss/melt}=0.002$ 、 $D_{Sb}^{mss/melt}=0.003$ 、 $D_{Se}^{mss/melt}=0.65$ 、 $D_{Te}^{mss/melt}=0.02$, Helmy et al., 2010)。因此,随着硫化物熔体的分离结晶, Ir、Ru与Ni进入早先结晶的mss中, Pt、Pd以及亲铜元素富集在残余硫化物熔体(melt)中。大量研究发现, Noril'sk和Sudbury矿床中的富铜矿石是硫化物熔体分离结晶后残余硫化物熔体固结的结果(Naldrett et al., 1997)。金川西岩体中24号矿体海绵陨铁状矿石低的Pd/Ir、Cu/Ni比值和富铜矿石高的Pd/Ir、Cu/Ni比值,表明它们分别是mss和残余硫化物熔体分离结晶的产物(Chen et al., 2013)。

金川2号矿体的浸染状矿石和海绵陨铁状矿石100%硫化物中 $w(\text{Cu})$ 、 $w(\text{Ni})$ 分别为2.42%~15.36%、2.88%~9.44%和1.06%~12.8%、4.26%~9.2%,它们的Cu/Ni比值分别在0.4~2.6和0.3~1.9之间(图4f),这些暗示形成2号矿体的硫化物熔体并未经历强的分离结晶作用。类似地,在100%硫化物相关图(图4)中,浸染状矿石和海绵陨铁状矿石的Ir不仅与Ru、Rh具有很好的正相关性,而且与Pd展示出良好的正相关性, Pd/Ir比值分别在3.1~31.6、2.7~28.7之间,一致指示了IPGE和PPGE并没有发生明显的硫化物熔体分离结晶。如上所述,亲铜元素是mss的不相容元素,那么可以推测它们会在残余硫化物熔体中富集。在亲铜元素与Pd/Ir比值相关图(图6)中,2号矿体的硫化物矿石、特别是海绵陨铁状矿石的亲铜元素与Pd/Ir比值之间的相关性不明显,未见明显的演化趋势,进一步表明形成2号矿体的硫化物熔体的分离结晶作用不显著,这与24号矿体发生了强烈的硫化物熔体分离结晶过程明显不同。这些特征也说明硫化物的分离结晶作用对2号矿体硫化物矿石的Ni、Cu、PGE及亲铜元素组成影响较小,这些元素含量主要受硫化物熔离作用的制约。

5.2 硫化物熔离作用

5.2.1 深部硫化物熔离

大量的研究表明,金川Ni-Cu硫化物矿床成矿母岩浆亏损PGE(Song et al., 2009; Chen et al.,

2013)。导致岩浆Cu-Ni-(PGE)矿床硫化物矿石PGE亏损的机制主要包括:岩浆源区本身经历了早期部分熔融而亏损PGE(Lightfoot et al., 2012);部分熔融程度偏低,PGE残留于地幔源区中(Barnes et al., 1999);同时,岩浆在上升到现有岩浆房之前发生过硫化物熔离作用,导致残余岩浆亏损PGE(Song et al., 2008)。

最新的研究表明,金川矿床的母岩浆是一种苦橄质玄武岩浆(Chen et al., 2013; 江金进等, 2013),也就是说金川原始母岩浆是富集PGE的。金川矿床PGE的亏损更可能是由于早期硫化物的熔离作用导致。由于PGE具有很强的亲硫性,它们在硫化物和硅酸盐熔体之间具有较高的分配系数 $D^{sul/sil}$ ($10^3\sim10^5$)(Peach et al., 1990; Stone et al., 1990; Fleet et al., 1991),而Cu和Ni的分配系数 $D^{sul/sil}$ 相对较低($10^2\sim10^3$)(Fancis, 1990; Peach et al., 1990)。所以少量硫化物的熔离将导致残余岩浆中PGE相对于Cu、Ni含量明显降低,而且残余岩浆的Cu/Pd比值将远大于母岩浆的Cu/Pd比值,2号矿体硫化物矿石的Cu/Pd比值变化范围为 $1.6\times10^6\sim4.5\times10^6$,远高于原始地幔的比值(7000~10000)(Barnes et al., 1999)(图7)。说明金川矿床硫化物在形成之前已经发生了硫化物熔离作用并导致残余岩浆中PGE的亏损,同时也表明金川矿床是硫化物二次熔离的结果。

5.2.2 R因子

前已述及,尽管金川矿床的原始岩浆是苦橄质玄武岩浆,但由于深部硫化物熔离作用的影响,造成成矿母岩浆亏损PGE,同时2号矿体中硫化物的分离结晶作用并不明显,硫化物熔浆的分离结晶作用对2号矿体中PGE的分布影响很小,可见硫化物的熔离作用是控制2号矿体中PGE含量变化的主要因素。

硫化物的熔离作用可以根据Campbell等(1979)提出的公式计算硫化物熔体中金属元素含量:

$$Y_i = X_{i(0)} \times D_i \times (R+1) / (R+D_i) \quad (1)$$

式中, Y_i 是元素*i*在硫化物熔体中的浓度, $X_{i(0)}$ 为元素*i*在母岩浆中的浓度, R 是硅酸盐岩浆与硫化物熔体的质量比值, D_i 为元素*i*在硫化物熔体与硅酸盐熔浆间的分配系数。公式(1)表明,硫化物中成矿元素的含量主要受母岩浆中成矿元素的含量、成矿元素的分配系数和母岩浆与硫化物的质量比(R 因子)的影响,在母岩浆成分和成矿元素分配系

数一定时,参与岩浆和硫化物反应的岩浆量越大(R 因子越大),硫化物中成矿元素的含量就越高。特别是PGE具有很高的 $D^{sul/sil}(10^3 \sim 10^5)$ (Peach et al., 1990; Stone et al., 1990; Fleet et al., 1991),所以PGE在硫化物中的含量与参与硫化物-岩浆反应的岩浆数量成正比。

已知元素在硫化物中的浓度、母岩浆中的浓度和其在硫化物和硅酸盐岩浆间的分配系数的情况下,可以通过公式(1)对硫化物熔离作用时的 R 因子进行模拟计算。由于受早期硫化物熔离作用的影响,假设金川母岩浆的 $w(Pd)$ 为 0.3×10^{-9} (Song et al., 2009), $w(Cu)$ 为 140×10^{-6} ,Cu和Pd在硫化物熔体和硅酸盐熔体间的分配系数 $D^{sul/sil}$ 分别是1000和23 000,并保持不变(Francis, 1990; Peach et al., 1990)。模拟计算结果如图7所示,假设的Cu和Pd的初始值与模拟结果相吻合,1号矿体 R 因子的变化范围主要集中在 $10^2 \sim 10^3$,2号矿体 R 因子的变化范围主要集中在 $10^2 \sim 10^4$,部分样品的Cu/Pd比值高于母岩浆,可能与硫化物熔离作用强烈导致Pd的强烈亏损有关或者与Cu元素因为热液活化迁移富集有关。 R 因子模拟计算结果表明1号矿体形成时参与反应的岩浆通量要大于2号矿体的相应值。

5.3 对岩浆通道硫化物成矿作用的指示

除加拿大的Sudbury矿床外,世界范围内与镁铁质岩浆有关的大型-超大型铜镍硫化物矿床与岩浆通道系统密切相关,如俄罗斯的Noril'sk-Talnakh

Ni-Cu-PGE矿床(Naldrett et al., 1999),加拿大的Voisey's Bay Ni-Cu-Co矿床(Naldrett et al., 2000)。大量研究表明,金川Ni-Cu硫化物矿床是产于岩浆通道系统中的组成部分(Song et al., 2009; 2012; Chen et al., 2013; 闫海卿等,2013)。岩浆通道系统为硫化物的堆积不仅提供了场所,更重要的是硫化物可以与后期补充的新鲜岩浆发生反应,提高硫化物中Ni、Cu、PGE的含量(宋谢炎等,2010)。因此,硫化物中成矿元素的含量为探讨岩浆通道硫化物成矿作用提供更多约束。

2号矿体西端(如36线)浸染状硫化物矿石中的 $Ni_{100}(3.41\% \sim 8.78\%)$ 、 $Cu_{100}(2.8\% \sim 15.37\%)$ 和 $\Sigma PGE_{100}(478.96 \times 10^{-9} \sim 2059.7 \times 10^{-9})$ 含量与1号矿体东端(如26线)浸染状硫化物矿石中的 $Ni_{100}(5.41\% \sim 8.52\%)$ 、 $Cu_{100}(4.42\% \sim 11.62\%)$ 、 $\Sigma PGE_{100}(866.3 \times 10^{-9} \sim 1205 \times 10^{-9})$ 含量相似,指示了1号矿体和2号矿体硫化物成分的渐变特征。类似地,尽管2号矿体硫化物的Cu/Pd比值总体小于1号矿体,然而,2号矿体西端(如36线)硫化物的Cu/Pd比值($46.3 \times 10^3 \sim 255.9 \times 10^3$)与1号矿体东端(如26线)硫化物的该比值($129.9 \times 10^3 \sim 374.4 \times 10^3$)相似,暗示1号和2号硫化物矿体是同一岩浆通道系统内的产物。另一方面,2号矿体自西向东(从36线到41线再到52线),硫化物矿石的 ΣPGE_{100} 值呈现为逐渐减低的趋势(从 798.7×10^{-9} 到 652×10^{-9} ,再到 162.9×10^{-9}),Cu/Pd比值自西向东逐渐升高(如36线: 140×10^3 ;41线: 360.2×10^3 ;52线: 466.7×10^3),这些暗示硫化物熔离时 R 因子从矿体西端到东端逐渐降低。因此,可以推测金川矿床II号岩体中2号矿体的硫化物成矿作用发生在开放的岩浆通道系统内,并且有多次岩浆参与成矿,岩浆的流动方向总体为自西往东。

与1号矿体中硫化物矿体产于岩体核部不同,2号矿体中硫化物矿体主要赋存在岩体的下部和底部,这暗示携带硫化物的“晶粥”可能发生了堆积作用。岩浆在通道中流动时,当携带硫化物的“晶粥”流经岩浆通道的膨大部位、或者岩浆通道与浅部岩浆房的结合部位时,因流速降低而发生硫化物的堆积。特别是2号矿体41线的 ΣPGE_{100} 值由北到南,从 559.5×10^{-9} 降低到 232.3×10^{-9} ,这可能与岩浆流速降低使得硫化物发生堆积有关。

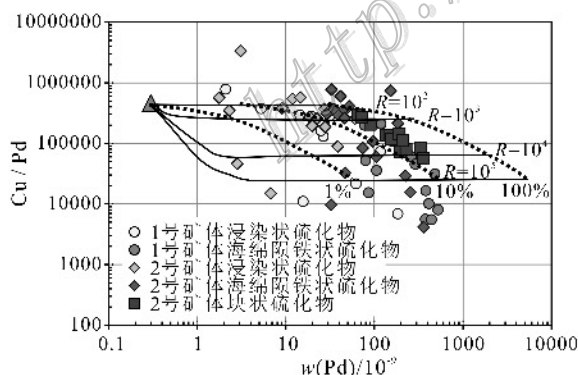


图7 金川矿床硫化物矿石的Cu/Pd-Pd相关图及 R 值模拟计算(1号矿体数据引自Song et al., 2009和未发表数据;2号矿体部分数据引自Song et al., 2009)

Fig. 7 Variations of Cu/Pd versus Pd for the samples from No. 2 orebody in the Jinchuan deposit (data of No. 1 and partial data of No. 2 orebody after Song et al., 2009 and unpublished data)

6 结 论

(1) 金川矿床中的2号矿体与24号矿体不同,2号矿体的100%硫化物中,Ni、Cu和PGE含量变化不受硫化物分离结晶作用的约束,而主要受硫化物熔离作用的制约。

(2) 金川2号矿体西端和1号矿体东端100%硫化物中,Ni、Cu和PGE含量相似,二者均为硫化物二次熔离的产物,并且属于同一岩浆通道系统内的产物。

(3) 2号矿体是岩浆通道系统的一部分,成岩成矿时岩浆的流动方向总体为自西往东。

志 谢 感谢金川集团股份有限公司在开展野外工作中给予的大力支持和帮助。同时感谢审稿人对文章的修改提出的建设性意见。

参考文献/References

陈列猛, 宋谢炎, 聂晓勇, 周国富, 刘世荣, 郑文勤, 李士彬. 2008. 甘肃金川Ⅱ号岩体辉石化学特征及其地质意义[J]. 矿物岩石, 28(1): 88-96.

陈列猛, 宋谢炎, Danyushevsky L V, 肖加飞, 李士彬, 官建祥. 2009a. 金川Ⅰ号岩体橄榄石 Ni-MgO 相互关系及其地质意义[J]. 岩石学报, 25(12): 3369-3378.

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. 2009b. 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, 83(9): 1302-1315.

甘肃省地质矿产局第六地质队. 1984. 白家咀子硫化铜镍矿床地质[M]. 北京: 地质出版社, 1-225.

江金进, 陈列猛, 宋谢炎, 符志强, 王 亮, 卢建全, 艾启兴, 李 辉. 2013. 金川铜镍矿床58号矿体亲铜和亲铁元素特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 32(5): 941-953.

江金进, 宋谢炎, 陈列猛, 王 亮, 符志强. 2014. 金川岩浆铜镍矿床龙首矿区半金属元素与铂族元素地球化学及成因含义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 出版中.

金川集团股份有限公司地质勘察院. 2011. 甘肃省金昌市金川铜镍矿Ⅲ矿区58号矿体深边部地质找矿报告[R]. 内部资料.

李士彬, 宋谢炎, 胡瑞忠, 陈列猛, 聂晓勇. 2007. 甘肃金川Ⅱ号岩体岩相学特征及分离结晶过程探讨[J]. 岩石学报, 23(10): 2553-2560.

宋谢炎, 胡瑞忠, 陈列猛. 2009. 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, 16(4): 287-305.

宋谢炎, 肖家飞, 朱 丹, 朱维光, 陈列猛. 2010. 岩浆通道系统与岩浆硫化物成矿研究新进展[J]. 地学前缘, 17(1): 153-163.

汤中立. 1991. 金川含铂硫化铜镍矿床成矿模式[J]. 甘肃地质, (12): 104-125.

汤中立, 李文渊. 1995. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比[M]. 北京: 地质出版社.

汤中立, 白云来, 李志林. 2000. 华北板块西南边缘大型、超大型矿床的地质构造背景[J]. 地质学报, 9(1): 1-15.

汤中立, 闫海卿, 焦建刚, 李小虎. 2006. 中国岩浆硫化物矿床新分类与小岩体成矿作用[J]. 矿床地质, 25(1): 1-9.

解广豪, 汪云亮, 范彩云, 张成江, 郑 榕. 1998. 金川超镁铁岩侵入体及超大型硫化物矿床的成岩成矿机制[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 28(增刊): 31-36.

闫海卿, 王 强, 胡彦强, 吴君平, 贾慧敏, 谭雨婷. 2013. 金川铜镍硫化物岩浆矿床前缘岩浆与岩浆通道[J]. 中国地质, 40(3): 807-819.

张宗清, 杜安道, 唐索寒, 卢纪仁, 王进辉, 杨 刚. 2004. 金川铜镍矿床年龄和源区同位素地球化学特征[J]. 地质学报, 78(3): 359-365.

Barnes S J, Makovicky E, Karup-Møller S, Makovicky M and Rose-Hansen J. 1997. Partition coefficients for Ni, Cu, Pd, Pt, Rh, and Ir between monosulfide solid solution and sulfide liquid and the formation of compositionally zoned Ni-Cu sulfide bodies by fractional crystallization of sulfide liquid[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 34(4): 366-374.

Barnes S J and Maier W D. 1999. The fractionation of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulfide liquids[C]. Geological Association of Canada, Short Course Notes, 13: 69-109.

Barnes S J and Fiorentini M L. 2012. Komatiite magmas and sulfide nickel deposits: A comparison of variably endowed Archean terranes[J]. Econ. Geol., 107(5): 755-780.

Campbell I H and Naldrett A J. 1979. The influence of silicate: Sulfide ratios on the geochemistry of magmatic sulfides[J]. Econ. Geol., 74(6): 1503-1506.

Chai G and Naldrett A J. 1992a. Characteristics of Ni-Cu-PGE mineralization and genesis of the Jinchuan deposit, northwest China[J]. Econ. Geol., 87(6): 1475-1495.

Chai G and Naldrett A J. 1992b. The Jinchuan ultramafic intrusion: Cumulate of a high-Mg basaltic magma[J]. Journal of Petrology, 33(2): 277-303.

Chen L M, Song X Y, Keays R R, Tian Y, Wang Y S, Deng Y F and

- Xiao J F. 2013. Segregation and fractionation of magmatic Ni-Cu-PGE sulfides in the western Jinchuan Intrusion, Northwestern China: Insights from platinum group element geochemistry [J]. *Econ. Geol.*, 108(8): 1793-1811.
- Fleet M E and Stone W E. 1991. Partitioning of platinum-group elements in the Fe-Ni-S system and their fractionation in nature [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(1): 245-253.
- Fleet M E, Chrysosoulis S L, Stone W E and Weisener C G. 1993. Partitioning of platinum-group elements and Au in the Fe-Ni-Cu-S system: Experiments on the fractional crystallization of sulfide melt [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 115(1): 36-44.
- Francis R D. 1990. Sulfide globules in mid-ocean ridge basalts (MORB) and the effect of oxygen abundance in Fe-S-O on the ability of those liquids to partition metals from MORB and komatiitic magmas [J]. *Chemical Geology*, 85: 199-213.
- Hattori K H, Arai S and Clarke D B. 2002. Selenium, tellurium, arsenic and antimony contents of primary mantle sulfides [J]. *The Canadian Mineralogist*, 40(2): 637-650.
- Helmy H M, Ballhaus C, Wohlgemuth-Ueberwasser C, Fonseca R O C and Laurenz V. 2010. Partitioning of Se, As, Sb, Te and Bi between monosulfide solid solution and sulfide melt: Application to magmatic sulfide deposits [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(21): 6174-6179.
- Keays R R, Nickel E H and Groves D I. 1982. Iridium and palladium as discriminants of volcanic-exhalative, hydrothermal, and magmatic nickel sulfide mineralization [J]. *Econ. Geol.*, 77(06): 1535-1547.
- Keays R R. 1995. The role of komatiitic and picritic magmatism and S-saturation in the formation of ore deposits [J]. *Lithos*, 34(1): 1-18.
- Lehmann J, Arndt N, Windley B, Zhou M F, Wang C Y and Harris C. 2007. Field relationships and geochemical constraints on the emplacement of the Jinchuan intrusion and its Ni-Cu-PGE sulfide deposit, Gansu, China [J]. *Econ. Geol.*, 102(1): 75-94.
- Li C, Xu Z, de Waal S A, Ripley E M and Maier W D. 2004. Compositional variations of olivine from the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, western China: Implications for ore genesis [J]. *Mineralium Deposita*, 39(2): 159-172.
- Li C S and Ripley E M. 2011. The giant Jinchuan Ni-Cu-(PGE) deposit: Tectonic setting, magma evolution, ore genesis, and exploration implications [J]. *Reviews in Economic Geology*, 17: 163-180.
- Li X H, Su L, Chung S L, Li Z X, Liu Y, Song B and Liu D Y. 2005. Formation of the Jinchuan ultramafic intrusion and the world's third largest Ni-Cu sulfide deposit: Associated with the ~825 Ma south China mantle plume [J]? *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6(11): 1-16.
- Lightfoot P C, Keays R R, Evans-Lanswood D and Wheeler R. 2012. S saturation history of Nain Plutonic Suite mafic intrusions: Origin of the Voisey's Bay Ni-Cu-Co sulfide deposit, Labrador, Canada [J]. *Mineralium Deposita*, 47(1): 23-50.
- Maier W D, Barnes S J, De Klerk W J, Teigler B and Mitchell A A. 1996. Cu/Pd and Cu/Pt of silicate rocks in the Bushveld Complex: Implications for platinum-group element exploration [J]. *Econ. Geol.*, 91(6): 1151-1158.
- Naldrett A J, Ebel D S, Asif M, Morrison G and Moore C M. 1997. Fractional crystallisation of sulfide melts as illustrated at Noril'sk and Sudbury [J]. *European Journal of Mineralogy*, 9(2): 365-377.
- Naldrett A J and Lightfoot P C. 1999. Ni-Cu-PGE deposits of the Noril'sk region, Siberia: Their formation in conduits for flood basalt volcanism [C]. *Geological Association of Canada, Short Course Notes*, 13: 195-249.
- Naldrett A J, Asif M, Krstic S and Li C S. 2000. The composition of mineralization at the Voisey's Bay Ni-Cu sulfide deposit, with special reference to platinum-group elements [J]. *Econ. Geol.*, 95(4): 845-865.
- Naldrett A J. 2004. *Magmatic sulfide deposits: Geology, geochemistry and exploration* [M]. Springer.
- Peach C L, Mathez E A and Keays R R. 1990. Sulfide melt-silicate melt distribution coefficients for noble metals and other chalcophile elements as deduced from MORB: Implications for partial melting [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(12): 3379-3389.
- Qi L, Gao J F, Huang X W, Hu J, Zhou M F and Zhong H. 2011. An improved digestion technique for determination of platinum group elements in geological samples [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26(9): 1900-1904.
- Ripley E M, Sarkar A and Li C S. 2005. Mineralogic and stable isotope studies of hydrothermal alteration at the Jinchuan Ni-Cu deposit, China [J]. *Econ. Geol.*, 100(7): 1349-1361.
- Song X Y, Zhou M F, Wang C Y, Qi L and Zhang C J. 2006. Role of crustal contamination in formation of the Jinchuan intrusion and its world-class Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, northwest China [J]. *International Geology Review*, 48(12): 1113-1132.
- Song X Y, Zhou M F, Tao Y and Xiao J F. 2008. Controls on the metal compositions of magmatic sulfide deposits in the Emeishan large igneous province, SW China [J]. *Chemical Geology*, 253: 38-49.

- Song X Y, Keays R R, Zhou M F, Qi L, Ihlenfeld C and Xiao J F. 2009. Siderophile and chalcophile elemental constraints on the origin of the Jinchuan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, NW China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(2): 404-424.
- Song X Y, Danyushevsky L V, Keays R R, Chen L, Wang Y S, Tian Y L and Xiao J F. 2012. Structural, lithological, and geochemical constraints on the dynamic magma plumbing system of the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, NW China[J]. *Mineralium Deposita*, 47(3): 277-297.
- Stone W E, Crockett J H and Fleet M E. 1990. Partitioning of palladium, iridium, platinum, and gold between sulfide liquid and basalt melt at 1200°C[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(8): 2341-2344.
- Su S G, Li C S, Zhou M F, Ripley E M and Qi L. 2008. Controls on variations of platinum-group element concentrations in the sulfide ores of the Jinchuan Ni-Cu deposit, western China[J]. *Mineralium Deposita*, 43(6): 609-622.
- Yang X Z, Ishihara S and Zhao D H. 2006. Genesis of the Jinchuan PGE deposit, China: evidence from fluid inclusions, mineralogy and geochemistry of precious elements[J]. *Mineralogy and Petrology*, 86: 109-128.
- Zhang M J, Kamo S L, Li C S, Hu P Q and Ripley E M. 2010. Precise U-Pb zircon-baddeleyite age of the Jinchuan sulfide ore-bearing ultramafic intrusion, western China[J]. *Mineralium Deposita*, 45(1): 3-9.

<http://www.kcdz.ac.cn/>