

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.299>



金川矿床 3 号矿体成矿过程及对成矿模式的启示

王亚磊^{1,2}, 李文渊², 王永才³, 张照伟², 艾启兴³, 黑欢²

1. 中国地质科学院, 北京 100037

2. 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西西安 710119

3. 金川集团股份有限公司, 甘肃金昌 737100

摘要: 为查明金川矿床 3 号矿体成矿过程、深化成矿模式, 利用电子探针、全岩主微量, Ni、Cu 及 PGE 元素分析方法, 获取 3 号矿体中细粒及伟晶状二辉橄榄岩中橄榄石 Fo 值及 Ni 含量为 82.4%~85% 和 $1.069 \times 10^{-6} \sim 2.420 \times 10^{-6}$; Fo 值及 Ni 含量具有由北西向南东逐渐变高趋势。主量元素变化表明 3 号矿体主要发生了橄榄石和辉石的分离结晶; 赋矿岩体略富集轻稀土元素, 明显富集 LILE 而亏损 HFSE。3 号矿体铂族元素含量与 24 号矿体相似, 明显高于 1 号和 2 号矿体。3 号矿体南东方向深部仍存在基性程度更高且含矿性更好的矿体, 金川矿床是“幔源岩浆深部硫化物熔离-含矿岩浆多中心”侵位的产物, 3 号和 24 号矿体共用同一岩浆通道, 1 号和 2 号矿体是含矿岩浆沿不同通道分别侵位的产物。

关键词: 龙首山成矿带; 金川铜镍硫化物矿床; 分离结晶过程; 铂族元素; 多中心侵位; 矿床学。

中图分类号: P611; P612

文章编号: 1000-2383(2026)01-240-17

收稿日期: 2025-08-06

Mineralization Process of No.3 Orebody of Jinchuan Deposit and New Implication for Metallogenic Model

Wang Yalei^{1,2}, Li Wenyuan², Wang Yongcai³, Zhang Zhaowei², Ai Qixing³, Hei Huan²

1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. MNR Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, China

3. Jinchuan Group Co. Ltd., Jinchang 737100, China

Abstract: To elucidate the mineralization process of the No. 3 orebody of the Jinchuan deposit and to refine the Jinchuan metallogenic model, it conducted EPMA of ore minerals together with whole-rock major-trace element and Ni-Cu-PGE analyses. Olivine from the fine-grained and pegmatitic lherzolite hosting the No. 3 orebody shows Fo values of 82.4%–85.0% and Ni contents of $1.069 \times 10^{-6} \sim 2.420 \times 10^{-6}$. Both Fo and olivine Ni content increase progressively from the northwest to the southeast. Major-element variations suggest that the No. 3 orebody experienced dominantly olivine- and pyroxene-controlled fractional crystallization. The ore-bearing rocks are slightly enriched in light rare earth elements (LREE), markedly enriched in large-ion lithophile elements (LILE), and depleted in high-field-strength elements (HFSE). The total PGE abundances of the No. 3 orebody are comparable to those of the No. 24 orebody, but are significantly higher than those of the No. 1 and No. 2 orebodies. Importantly, the southeastern segment of the No. 3 orebody remains relatively more mafic and therefore retains greater mineralization potential.

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(No.2025ZD1007106); 全国镍钴矿战略性矿产调查项目(No.DD202402060)。

作者简介: 王亚磊(1986—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事岩浆铜镍钴硫化物矿床成矿过程与找矿勘查工作。ORCID: 0000-0003-4237-9787。

E-mail: wangyalei1986@126.com

引用格式: 王亚磊, 李文渊, 王永才, 张照伟, 艾启兴, 黑欢, 2026. 金川矿床 3 号矿体成矿过程及对成矿模式的启示. 地球科学, 51(1): 240–256.

Citation: Wang Yalei, Li Wenyuan, Wang Yongcai, Zhang Zhaowei, Ai Qixing, Hei Huan, 2026. Mineralization Process of No. 3 Orebody of Jinchuan Deposit and New Implication for Metallogenic Model. *Earth Science*, 51(1): 240–256.

These observations support a metallogenic model in which the Jinchuan deposit formed through “mantle-derived magma, sulfide segregation, and multi-center emplacement of mineralized magma”. The No.3 and No.24 orebodies were supplied by the same magma conduit, whereas the No. 1 and No. 2 orebodies were fed by separate conduits.

Key words: Longshoushan metallogenic belt; Jinchuan magmatic Ni-Cu sulfide deposit; fractional crystallization process; platinum group element; multi-center emplacement process; ore deposit.

0 引言

镍、钴作为全球性战略金属矿产,广泛应用于新能源汽车、电子通讯、航空航天、高端装备制造等领域,对我国未来的发展至关重要。然而,我国镍、钴资源储量仅为434.65万吨和15.87万吨,对外依存度高达93%和99%。金川矿床作为国内最大、世界第三大镍铜钴硫化物矿床,截止2017年底累计探明镍金属量625万吨,钴金属量16.83万吨,保有镍金属量约331万吨,平均品位0.92%,钴金属量9.35万吨,平均品位0.03%。镍、钴资源储量约占全国储量的60%和73.5%,是我国最重要的镍、钴资源自我保障基地,也是实现快速增储上产最重要的勘查基地。随着新一轮找矿突破行动的启动,在金川矿床深部取得了新的找矿突破,尤其是Ⅲ号岩体南东方向,新探明赋矿岩体最大视厚度达300余米,矿体视厚度达160余米,新增镍资源量约10万吨,相当于新增了一个大型镍矿床,且向深部岩(矿)体具明显“膨大”趋势。

先前围绕金川矿床地质特征及成矿过程的研究主要集中于Ⅰ号和Ⅱ号岩体及赋存其中的24号、1号和2号矿体(甘肃省地质矿产局第六地质队,1984; Chai and Naldrett, 1992a, 1992b; 汤中立和李文渊, 1995; Li *et al.*, 2004, 2011; Song *et al.*, 2009, 2012; Chen *et al.*, 2013; Duan *et al.*, 2016; Long *et al.*, 2023)。然而,针对Ⅲ号岩体地质特征、成矿过程及与其他矿体之间的成因联系,尚未进行系统研究。此次深部新矿体的发现使赋存其中的3号矿体一跃成为金川矿床第四大矿体(Kang *et al.*, 2022)。该矿体深部发育大量伟晶状二辉橄榄岩,橄榄石粒径最大可达2 cm,硫化物呈粗大的“珠滴状”产出,明显不同于先前的岩相及矿石类型。这一特殊性不仅有助于进一步深化金川矿床成矿过程的认识,也具有重要的经济意义,尤其对评估深部找矿潜力至关重要。

基于此,本文在系统总结3号矿体地质特征基础上,选择典型钻孔进行系统样品采集,通过详细的岩相学、矿物化学、岩石地球化学、成矿元素地球化学等研究,进一步深化3号矿体的成矿过程,查明

与东侧24号矿体之间的成因联系,为进一步完善金川矿床成矿模型、明确找矿方向提供重要支撑。

1 区域地质背景

金川超大型铜镍钴硫化物矿床位于阿拉善地块西南缘的龙首山隆起带北缘。龙首山隆起带位于华北克拉通西南缘(图1a),其北侧为阿拉善地块,南侧为早古生代北祁连造山带(图1b)。

龙首山隆起带出露的最古老地层为龙首山岩群,该岩群后期经历了多期强烈变质变形作用而变得支离破碎,层序不清。龙首山岩群主要由条带状、条纹状或眼球状混合岩(糜棱岩)夹斜长角闪岩、混合岩化片麻岩及薄层大理岩、蛇纹石化大理岩等组成;锆石U-Pb年代学研究表明混合岩岩浆锆石年龄为2.04~2.33 Ga,碎屑锆石年龄集中在1.8~2.0 Ga,变质锆石年龄为1.89~1.93 Ga(宫江华等,2011;Gong *et al.*, 2016;万渝生等,2024),表明其形成时代为古元古代。金川矿床侵位于龙首山群白家咀子组。除此之外,区域上还发育有中元古代墩子沟岩群、新元古代(震旦系)韩母山群/烧火筒群和古生代以后的地层。

龙首山地区岩浆活动较为频繁,花岗岩类发育,分布面积大,多呈岩基产出。镁铁-超镁铁质侵入体呈岩墙状、脉状及岩株状产出,断续散布于龙首山北缘,构成一条重要的镁铁-超镁铁质岩带(图1b);由西向东主要有藏布台、青井子、青石窑、西井和茅草泉等岩体,除茅草泉岩体形成时代与金川含矿岩体一致外(Zhang *et al.*, 2010;焦建刚等,2012),其余岩体均与金川矿床明显不同(段俊等,2015;焦建刚等,2017;孙逊等,2024)。

2 矿床地质特征

2.1 岩体地质特征

金川赋矿岩体被一系列北东东向断层分为4个岩体,由西向东依次为Ⅲ、Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ号岩体(图2a)。其中Ⅰ号和Ⅱ号岩体出露于地表,而Ⅲ号和Ⅳ号岩体则被第四系或白家咀子组地层覆盖,为隐伏岩

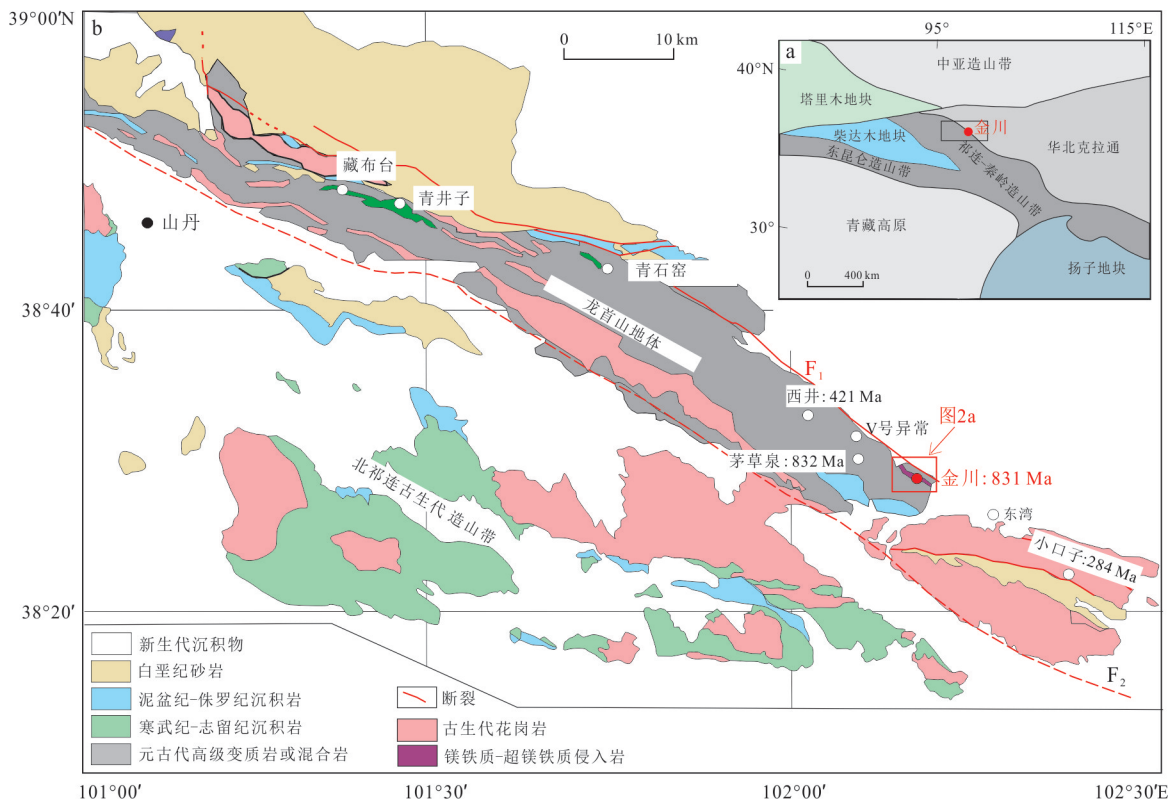


图 1 龙首山隆起带区域地质及镁铁-超镁铁岩分布

Fig.1 The distribution of the mafic-ultramafic intrusion of the Longshoushan Terrane

金川年龄数据数据 Li *et al.*, 2005; 茅草泉和小口子数据引自焦建刚等, 2012, 2017; 西井数据引自段俊等, 2015

体,经磁法测量并通过钻探验证发现.金川赋矿岩体总体走向约 310° ,沿走向长约6 500 m,宽20~527 m,出露面积约1.34 km²,倾向南西,倾角 50° ~ 80° ,目前已控制最大延深约为1 200 m(图2b).Ⅲ号岩体位于金川矿床最西段,完全隐伏于第四系下,埋深50~100 m.受 F_8 断层影响,Ⅲ号岩体相对于I号岩体向南西发生了约900 m的位移.岩体呈不规则岩墙状,走向约 325° ,长约600 m,宽度20~200 m,倾向南西,倾角 60° ~ 70° .自北西向南东,岩体的规模逐渐变大,埋深逐步加深(图2a、2b),呈现出明显的向南东方向侧伏特征,该岩体局部最大控制斜深可达1 000 m(图2c).主要岩石类型为二辉橄榄岩、纯橄岩和少量的橄榄二辉岩.先前报道Ⅲ号岩体以细粒岩相为主,但随着向南东方向勘探深度的增加,中粗粒岩相的比例逐渐增大,甚至出现了先前未见报道的伟晶岩相.

2.2 矿体地质特征

金川矿床共圈定约640个铜镍矿体,其中1、2和24号矿体是最主要的矿体(图2b),其镍金属量分别占全矿区总资源量的56.8%、19.02%和10.6%.然而,随着Ⅲ号岩体南东方向深部厚

大矿体的发现,使赋存其中的3号矿体成为金川矿床第四大矿体(Kang *et al.*, 2022).

3号矿体呈厚层状,矿体形态与岩体形态一致,由北西向南东方向埋深逐渐增加,并向南东方向侧伏.矿体主体以浸染状贫矿为主,位于岩体中上部,向中下部发育少量海绵陨铁状富矿(图2c).为进一步分析矿体的空间特征及不同类型矿石的相互关系,本研究选取了最新施工的钻孔进行说明.

在Zk603钻孔中,超镁铁岩体视厚度约82 m,其中浸染状-海绵陨铁状矿石厚约49.4 m,发育少量星点状及斑杂状矿石(图3a、3b).该矿石的Ni品位为0.2%~3.82%,Cu品位为0.2%~3.12%,主要赋矿岩性为中细粒二辉橄榄岩和中粗粒纯橄岩.在Zk404和Zk405钻孔中,镁铁-超镁铁岩体视厚度均超过300 m,表明向深部矿体具有“膨大”的趋势.其中,Zk404中主要矿石类型为珠滴状,局部可见浸染状和细脉状矿石(图3c、3d),主要赋矿岩性为伟晶状和中细粒二辉橄榄岩;该矿体Ni品位为0.2%~1.5%,Cu品位为0.2%~0.99%,值得注意的是,Zk404中的伟晶状二辉橄榄岩规模较大,在垂向上橄榄石颗粒从两侧向中心含量变高,粒径更为均

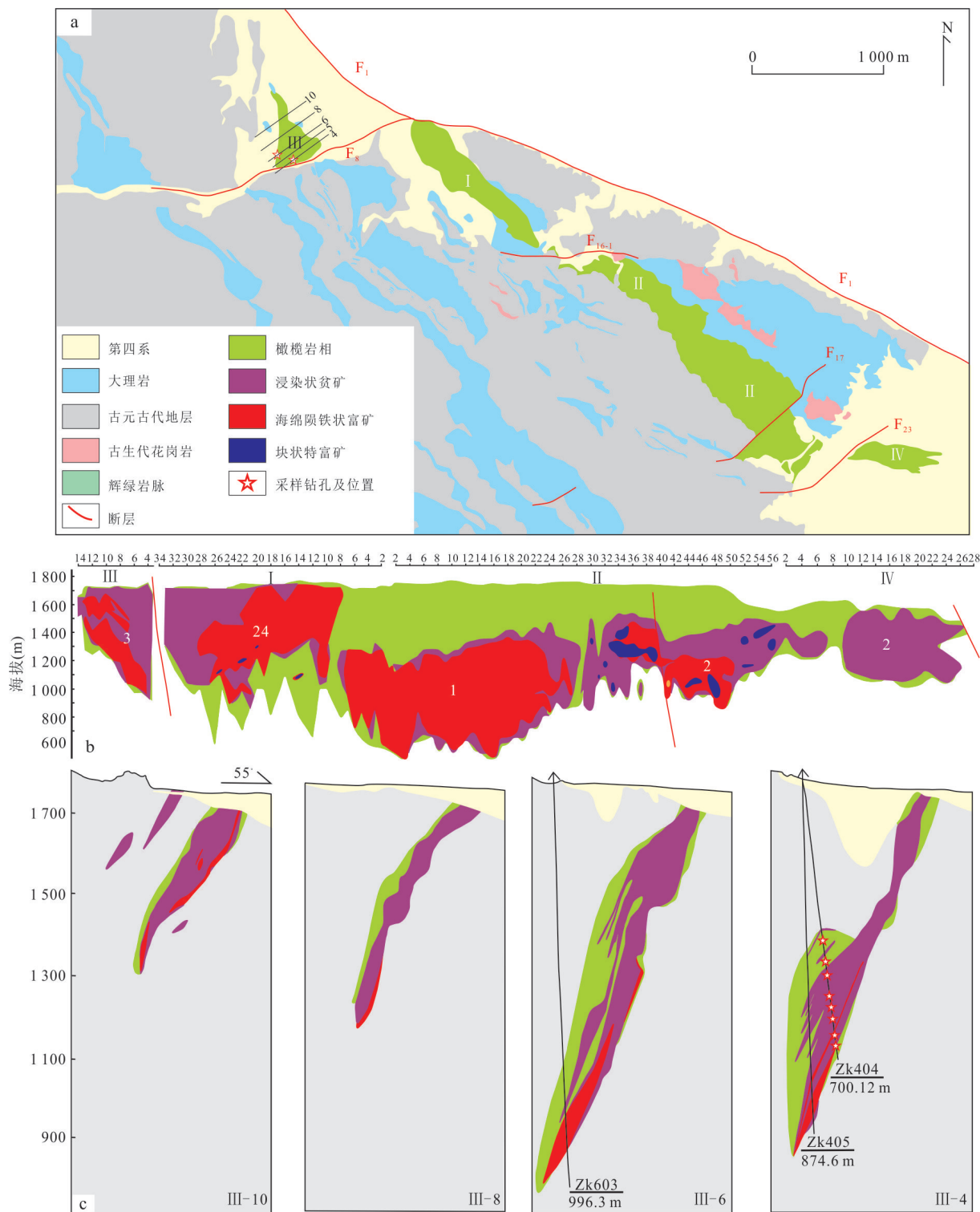


图 2 金川矿区地质简图(a)、勘探线纵投影图(b)及 3 号矿体典型勘探线剖面图(c)

Fig.2 Geologic map of the Jinchuan intrusion (a), a projected long section (b) and the typical cross section of No.3 orebody (b,c图例同图a)

匀,且硫化物珠滴含量也更多.在 Zk405 钻孔中,矿石以浸染状-斑杂状矿石为主,发育少量半块状矿石(图 3e、3f),海绵陨铁状矿石的规模具有向深部变厚大的趋势(图 2c);其中浸染状矿石 Ni 品位为

0.2%~0.94%,海绵陨铁状及半块状矿石中 Ni 含量为 1.01%~3.3%;该钻孔中也发育伟晶状二辉橄榄岩,但其规模较小,且硫化物含量也较低.通过上述钻孔中不同矿石类型和赋矿岩性的对比分析,可以

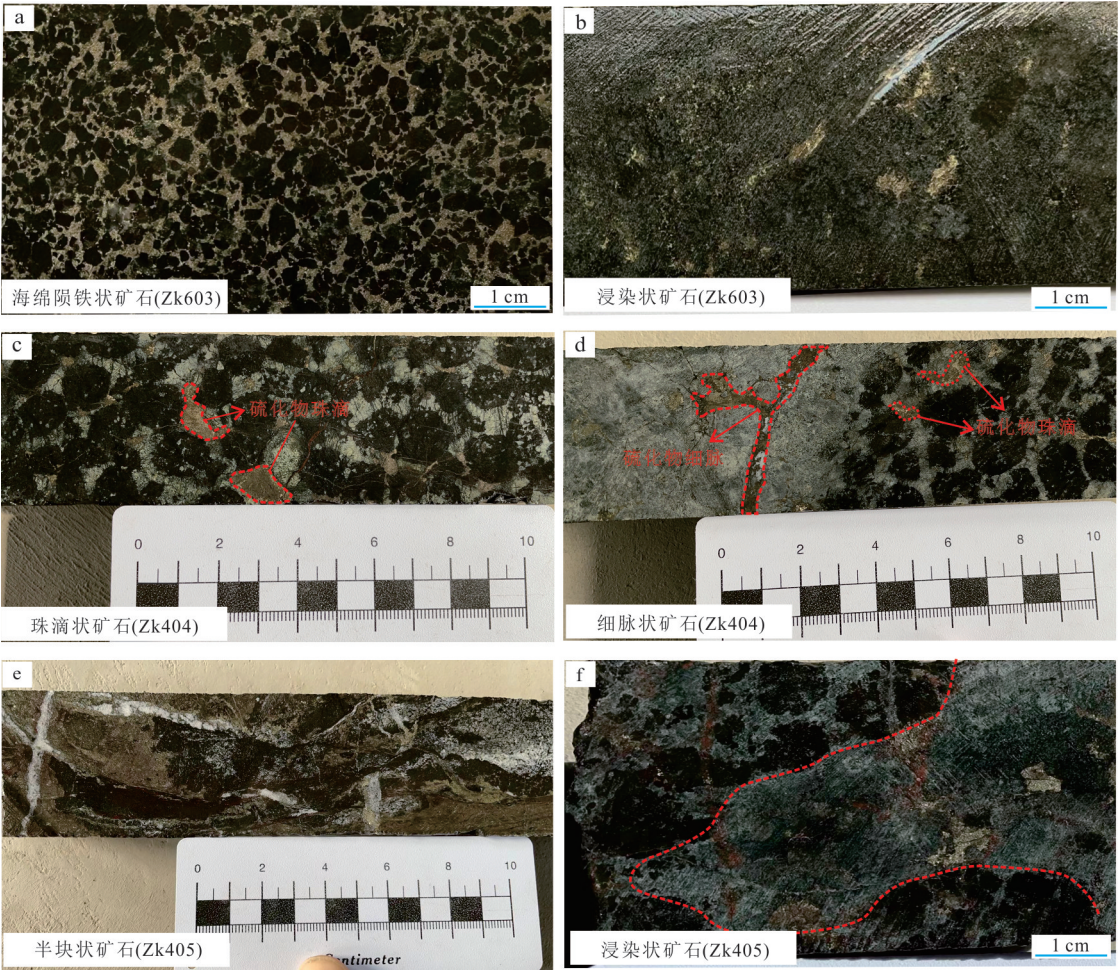


图3 金川矿床3号矿体中不同矿石类型及相互接触关系

Fig.3 The contact relationships of different ore types in No.3 orebody

a. 海绵陨铁状矿石;b. 浸染状矿石;c. 伟晶状二辉橄榄岩中橄榄石与硫化物珠滴关系;d. 伟晶状二辉橄榄岩与细粒辉石岩相接触关系及矿石类型;e. 半块状矿石;f. 细粒浸染状矿石与伟晶状二辉橄榄岩接触关系

看出3号矿体不仅向深部“膨大”,且随着深度的增加,矿体变富的趋势明显,这些特征表明该区存在多期含矿岩浆的侵位。

3 样品及分析方法

3.1 样品及岩相学特征

先前依据橄榄石粒径,将金川岩体粒度相划分为粗粒(>5 mm)、中粗粒(3~5 mm)和中细粒(0.5~3 mm)(甘肃省地质矿产局第六地质队,1984)。本次通过系统的岩心编录,发现普遍发育橄榄石粒径可达2 cm的岩相(图3c),该岩相可能代表了新一期含矿岩浆侵位事件。因此,本研究将橄榄石粒径大于1 cm的岩相单独划分为伟晶状结构。

在以往勘探深度中,Ⅲ号岩体5行以西主要以中细粒岩相为主,且与上、下盘围岩直接

接触(Kang *et al.*, 2022)。最新勘探成果表明自6行往南东中粗粒及伟晶状岩相的比例增多,因此本研究特别选择了Zk404钻孔中不同粒度、不同岩相及矿石类型的样品,以便开展岩相间的系统对比研究。现将各岩相特征描述如下。

中细粒二辉橄榄岩:构成Ⅲ号岩体的主体,岩石呈灰褐-灰黑色,块状构造;矿物以橄榄石和辉石为主,橄榄石呈中-细粒浑圆状,辉石或硫化物呈填隙状,橄榄石含量在40%~85%之间,含有少量金属硫化物、磁铁矿和铬尖晶石;岩石蚀变严重,大部分橄榄石均已完全发生蚀变,仅见橄榄石颗粒假象,残留少量新鲜颗粒(图4a、4b);硫化物含量较低,主要为星点状-浸染状贫矿石。

中粗粒纯橄岩:块状构造,主要以橄榄石为主,含量约为90%,含有少量的铬尖晶石和金属硫化物等;橄榄石通常呈浑圆状,岩石蚀变严重

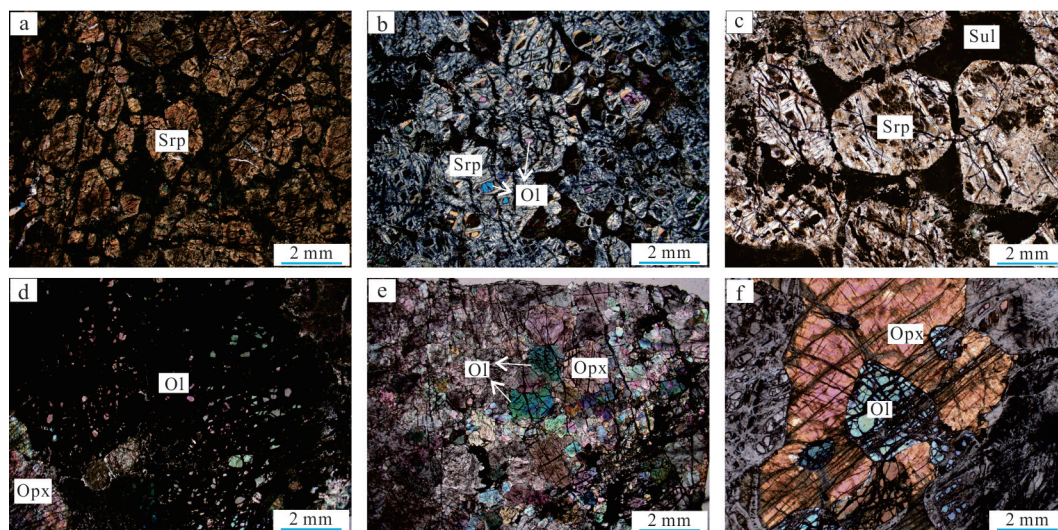


图4 3号矿体中不同岩相显微照片

Fig.4 The micrographs of different lithofacies in No.3 orebody

a、b. 橄榄石全部蚀变为蛇纹石;c. 中粗粒纯橄岩中橄榄石特征;d. 伟晶状二辉橄岩中残留的新鲜橄榄石;e、f. 中细粒二辉橄岩中橄榄石堆晶及包橄结构. Ol. 橄榄石;Srp. 蛇纹石;Opx. 斜方辉石;Sul. 硫化物

(图4c),局部偶见少量残留的新鲜橄榄石,沿橄榄石裂隙发育大量的粉尘状磁铁矿,是海绵陨铁状矿石的主要赋矿岩相。

伟晶状二辉橄岩:岩石呈灰黑-灰褐色,伟晶结构,块状构造,主要由橄榄石和辉石组成,含有少量的硫化物珠滴;手标本上,可以明显看出橄榄石多呈自形粒状-浑圆状(图3c);在显微镜下,由于橄榄石颗粒粗大,导致在视域内仅能观察到橄榄石颗粒的一部分,橄榄石总体伊丁石化及蛇纹石化蚀变严重,仅残留有少量的新鲜橄榄石(图4d),硫化物主要呈珠滴状,分布于橄榄石颗粒之间(图3c、3d)。

中细粒橄二辉岩:该岩相所占比例较低,主要矿物为辉石和橄榄石,橄榄石含量为10%~30%,辉石含量为60%~85%,含有少量的磁铁矿和铬尖晶石;橄榄石呈中细粒浑圆状,包橄结构发育,被包裹的橄榄石多呈浑圆状且较新鲜(图4e、4f),辉石透闪石化发育,橄榄石蛇纹石化及伊丁石化普遍发育。

3.2 分析方法

硅酸盐矿物电子探针分析在自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成,电子探针仪器型号为KEOL JXA-8230,分析时电压20 kV,电流10 nA,束斑直径1 μm ,元素峰值检测时间为10 s,上下背景检测时间为5 s.全岩主量和稀土微量元素分析测试在武汉上谱分析科技有限公司完成.主量元素分析的样品前处理采用熔融法制作玻璃熔片,助熔剂为四硼酸锂-偏硼酸锂-氟化锂(45:10:5),氧化剂为硝

酸铵,脱模剂为溴化锂.熔融温度1 050 $^{\circ}\text{C}$ 、熔样时长15 min.分析仪器为ZSX Primus II型波长色散X射线荧光光谱仪(XRF),主量各元素分析谱线均为 $K\alpha$,数据校正采用理论 α 系数法,测试相对标准偏差(RSD) $<2\%$,烧失量采用减重法测定.稀土和微量元素利用Agilent 7700e ICP-MS分析完成。

矿石铂族元素(PGEs)和Ni、Cu、S分析均在中国科学院地球化学研究所完成.采用Elan DRC-ICP-MS仪器测定.全流程Ir、Ru和Rh空白值低于 0.003×10^{-9} ,Pd为 0.02×10^{-9} ,Pt为 0.011×10^{-9} .仪器质量分馏校正由10 ng/mL的Ru、Ir、Pd和Pt标准溶液在样品测试中间测定监控,参照标准溶液的同位素丰度值,采用指数分馏法对样品测定时仪器的同位素分馏进行校正.矿石全岩Ni、Cu采用ICP-MS测定,仪器型号为SX-155;S含量测定采用燃烧碘量法。

4 分析结果

4.1 硅酸盐矿物组分

岩相学观察表明Ⅲ号岩体不同岩相中橄榄石普遍发生了强烈的蚀变,只有少量新鲜橄榄石颗粒得以保存,本次橄榄石电子探针分析结果见表1。

结合本次及之前获取(Kang *et al.*, 2022)的分析结果,Ⅲ号岩体中橄榄石MgO含量为41.8%~46.2%,FeO含量为14.25%~18.6%,橄榄石Fo值为80%~85%,主要为贵橄榄石,Ni含量为 1.069×10^{-6} ~ 2.420×10^{-6} ,变化范围略小于I和II号岩体中

表 1 III 号岩体 Zk404 的橄榄石成分 (%)
Table 1 The olivine composition (%) from Zk404 of No.III intrusion

赋矿岩性	分析点号	MgO	SiO ₂	FeO	MnO	NiO	Total	Fo	Ni
中细粒伊丁石化二辉橄榄岩	b7-01	45.51	39.89	15.09	0.19	0.26	101.54	84.3	2 019
	b7-01	43.75	39.29	14.71	0.19	0.22	99.34	84.1	1 752
	b7-02	45.91	39.76	14.52	0.19	0.23	100.67	84.9	1 776
	b7-03	45.30	39.68	15.05	0.28	0.24	100.73	84.3	1 870
中细粒二辉橄榄岩	b13-2-02	44.27	39.74	15.72	0.09	0.31	100.32	83.4	2 420
	b19-2-01	44.32	39.75	14.62	0.22	0.18	99.09	84.4	1 375
	b19-2-02	44.95	40.30	15.11	0.20	0.21	101.10	84.1	1 634
	b19-2-05	44.69	39.95	15.44	0.16	0.28	100.65	83.8	2 177
	b19-2-07	44.48	39.70	14.31	0.25	0.22	99.00	84.7	1 713
	b19-2-08	43.96	39.80	15.56	0.25	0.19	99.87	83.4	1 524
	b19-2-09	45.27	39.94	14.95	0.25	0.22	100.71	84.4	1 721
	b19-2-10	44.15	39.86	15.09	0.12	0.18	99.51	83.9	1 430
	b19-2-11	44.76	39.59	14.35	0.14	0.24	99.14	84.8	1 909
	b19-2-12	44.40	40.40	14.70	0.32	0.22	100.26	84.3	1 713
	b19-2-13	43.86	39.91	14.25	0.13	0.20	99.01	84.6	1 587
	b19-01	44.49	39.71	15.35	0.29	0.19	100.12	83.8	1 509
	b19-02	44.35	39.58	14.74	0.20	0.17	99.10	84.3	1 320
	b19-04	45.45	39.51	14.26	0.13	0.31	99.75	85.0	2 420
	b19-07	45.25	39.66	15.05	0.19	0.14	100.35	84.3	1 069
	b19-09	44.49	39.80	14.44	0.20	0.31	99.45	84.6	2 404
	b19-10	45.19	39.85	14.96	0.20	0.17	100.41	84.3	1 352
	b19-11	44.36	39.90	14.48	0.18	0.13	99.30	84.5	982
	b19-12	45.21	40.00	14.29	0.25	0.25	100.04	84.9	1 988
	b19-13	44.48	40.18	14.30	0.24	0.18	99.56	84.7	1 375
伟晶状二辉橄榄岩	b21-01	44.44	39.53	15.82	0.19	0.21	100.27	83.4	1 642
	b21-03	43.78	39.48	16.12	0.23	0.14	99.79	82.9	1 084
	b22-01	44.45	39.56	15.44	0.26	0.24	99.98	83.7	1 886
	b22-02	44.70	40.03	14.89	0.20	0.19	100.12	84.3	1 501
	b22-06	44.42	40.12	15.47	0.19	0.27	100.96	83.7	2 114
	b22-07	44.31	39.32	14.88	0.25	0.26	99.12	84.1	2 035
	b22-08	43.67	39.67	15.05	0.22	0.26	99.06	83.8	2 043
	b22-09	43.14	39.55	16.78	0.23	0.26	100.26	82.1	2 059
	b22-11	44.60	39.84	15.66	0.23	0.22	100.65	83.5	1 697
	b22-12	43.18	39.68	16.41	0.16	0.15	99.84	82.4	1 171
	b22-13	44.08	39.74	15.12	0.19	0.20	99.53	83.9	1 532
	b22-14	44.00	39.23	15.31	0.17	0.17	98.97	83.7	1 344

注:电子探针分析在自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室测定;测试者:王亚磊;测试手段:利用 KEOL JXA-8230 型电子探针测试;测试条件:电压为 20 kV,电流为 10 nA,束斑直径为 1 μm,元素峰值检测时间为 10 s,上下背景检测时间为 5 s;测试精度:小于 1%;测试误差:小于 2%.

的橄榄石 (Fo=76%~85.5% 和 Ni=1 200×10⁻⁶~2 500×10⁻⁶; Chai and Naldrett, 1992a; Li *et al.*, 2004; 陈列锰, 2009; Duan *et al.*, 2016). 中细粒二辉橄榄岩及伟晶状二辉橄榄岩中橄榄石 Fo 值和 Ni 含量在空间上均表现出由北西向南东逐渐变大的趋势(图 5). 在中细粒二辉橄榄岩中,位于北西端的 Zk802 中橄榄石 Fo 值和 Ni 含量分别为 80.8%~84.2% 和 1 478×10⁻⁶~2 115×10⁻⁶,平均值分别为 82.9% 和 1 657×10⁻⁶,向南东 Zk503 中橄榄石 Fo 值和 Ni 含量分别为 81.7%~84.9% 和 1 148×10⁻⁶~1 848×10⁻⁶,平均值分别为 83.3% 和 1 480×10⁻⁶,已控制最南东端 Zk404 中橄榄石 Fo 值和 Ni 含量分

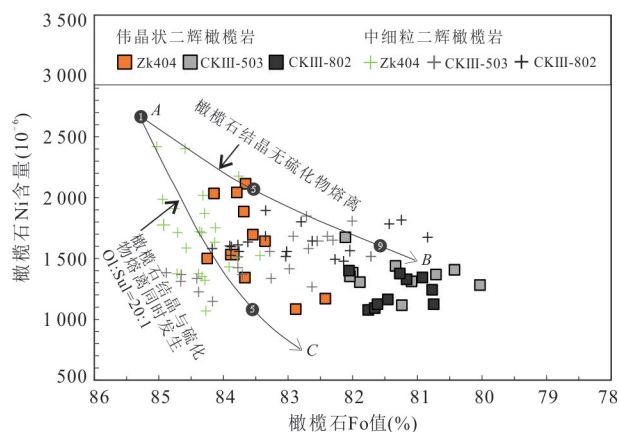


图5 III号岩体不同岩相橄榄石Fo-Ni含量相关性图解

Fig.5 The correlation of Fo-Ni of the different lithofacies in the No.III intrusion

CKIII-802及CKIII-503橄榄石数据引自Kang *et al.* (2022)

别为83.4%~85%和 1069×10^{-6} ~ 2420×10^{-6} ,平均值分别为84.3%和 1742×10^{-6} 。在伟晶状二辉橄榄岩中,上述3个钻孔中橄榄石Fo值和Ni含量变化范围依次为80.7%~82.1%和 1077×10^{-6} ~ 1400×10^{-6} 、80.0%~82.1%和 1117×10^{-6} ~ 1675×10^{-6} 、82.4%~84.3%和 1084×10^{-6} ~ 2114×10^{-6} ,其相应的Fo和Ni含量平均值分别为81.3%和 1228×10^{-6} 、81.3%和 1364×10^{-6} 、83.4%和 1676×10^{-6} 。这种矿物成分空间上的变化,可能反映了含矿岩浆由南东向北西流动的过程。

4.2 全岩主微量元素特征

金川III号岩体样品的主微量元素分析结果见附表1。由于金川含矿岩体遭受明显的后期蚀变,导致烧失量(LOI)较大,部分样品的烧失量可达10%以上。为了准确反映样品的岩石化学成分及地球化学特征,本次将原始数据扣除烧失量后,换算成100%硅酸岩的成分。除非特别说明,文中所有的含量数据均为换算后的结果。

金川III号岩体上部的中细粒二辉橄榄岩MgO含量为35.76%~37.22%, $\text{Fe}_2\text{O}_3^{(\text{T})}$ 含量为17.51%~21.3%, SiO_2 含量为38.45%~40.39%,CaO含量为0.02%~0.99%, Al_2O_3 含量为1.89%~3.30%。伟晶状二辉橄榄岩MgO含量为31.29%~35.46%, $\text{Fe}_2\text{O}_3^{(\text{T})}$ 含量为15.4%~19.97%, SiO_2 含量为38.87%~43.62%,CaO含量为0.29%~5.01%, Al_2O_3 含量为2.94%~5.11%;上部中-细粒二辉橄榄岩与下部伟晶状二辉橄榄岩相比,MgO、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{(\text{T})}$ 含量明显偏高,但CaO、 SiO_2 、 Al_2O_3 含量明显偏低。伟晶状橄榄辉石岩中MgO含量为27.71%~

30.51%, $\text{Fe}_2\text{O}_3^{(\text{T})}$ 含量为12.75%~18.38%, SiO_2 含量为41.76%~44.12%,CaO含量为3.77%~6.32%, Al_2O_3 含量为3.35%~8.15%,与二辉橄榄岩相比,其MgO、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{(\text{T})}$ 含量都明显偏低,而CaO、 SiO_2 、 Al_2O_3 含量则明显偏高。

在主量元素相关性图解上(图6),III号岩体不同岩石类型MgO含量与 SiO_2 、 Al_2O_3 、CaO和 TiO_2 呈明显的负相关趋势,各岩相主量元素含量位于橄榄石、斜方辉石与单斜辉石成分之间,表明母岩浆分离结晶主要受镁铁质矿物橄榄石和辉石控制。与位于南东侧的I号岩体相比,III号岩体的主量元素含量及变化趋势基本一致,但MgO含量最大值相对较低,在相同MgO含量下,其 Al_2O_3 及 TiO_2 含量也相对较低。

III号岩体中细粒二辉橄榄岩 ΣREE 含量为 10.34×10^{-6} ~ 24×10^{-6} ,平均值为 15.62×10^{-6} ;伟晶状二辉橄榄岩的 ΣREE 含量为 14.91×10^{-6} ~ 31.23×10^{-6} ,平均值为 22.96×10^{-6} ;伟晶状橄榄辉石岩 ΣREE 含量为 21.9×10^{-6} ~ 87.23×10^{-6} ,平均值为 49.95×10^{-6} ;橄榄辉石岩稀土元素含量最高,伟晶状二辉橄榄岩次之,而中细粒二辉橄榄岩稀土元素含量最低。在稀土元素配分曲线图上(图7a),不同岩石类型均表现出较一致的稀土元素配分曲线,部分伟晶状二辉橄榄岩和橄榄辉石岩表现出弱的正Eu异常,总体呈轻稀土略富集的右倾型;稀土元素配分曲线特征与I号岩体相似,但III号岩体的稀土元素总量明显偏高。在微量元素原始地幔标准化图解(图7b)上,不同岩石类型具有相似的特征。总体上,III号岩体明显富集大离子亲石元素(LILE)而亏损高场强元素(HFSE);具有明显的Th、Ce、La、Zr、Hf的正异常和Nb的负异常。微量元素含量总体呈现由伟晶状橄榄辉石岩→伟晶状二辉橄榄岩→中细粒二辉橄榄岩逐渐降低的趋势,且这些含量普遍高于I岩体的相应值。

4.3 Ni、Cu、S及铂族元素含量

金川矿床3号矿体各岩石及矿石样品Ni、Cu、S及PGE元素含量见表2。不含矿岩石 $\Sigma\text{PGE}(\text{Ir,Ru,Rh,Pt,Pd})$ 含量为 2.44×10^{-9} ~ 16.26×10^{-9} ,平均值为 7.82×10^{-9} ;中细粒岩相中浸染状矿石 ΣPGE 含量为 162.66×10^{-9} ~ 560.58×10^{-9} ,平均值为 310.92×10^{-9} ;伟晶状岩相中浸染状矿石 ΣPGE 含量为 99.84×10^{-9} ~ 1026.75×10^{-9} ,平均值为 484.34×10^{-9} 。伟晶状岩相中的铂族元素含量略高于中细粒岩相同类型矿石。

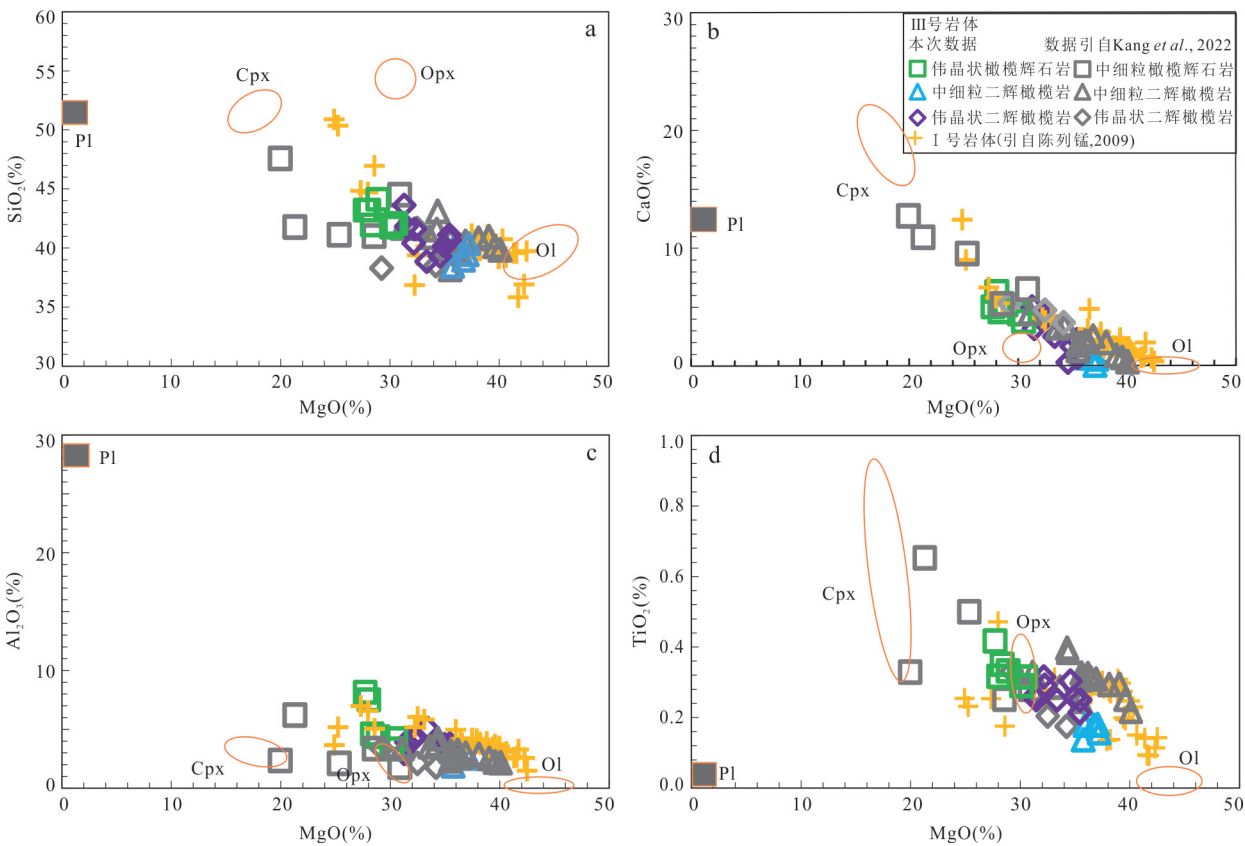


图6 金川矿床III号岩体主量元素相关性及与I号岩体主量元素对比

Fig.6 Comparison of major oxide contents in whole rocks between No.III and No.I intrusions

I 号岩体数据引自陈列锰,2009; III号岩体部分数据引自 Kang *et al.*, 2022. Ol. 橄榄石; Opx. 斜方辉石; Cpx. 单斜辉石; Pl. 斜长石

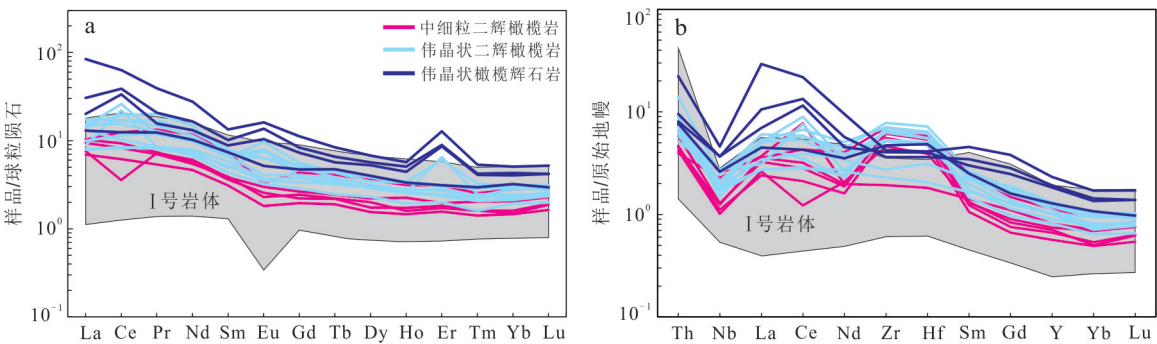


图7 III号岩体稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)及其与I号岩体对比

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized incompatible element patterns (b) for No.III and comparison with No.I intrusion

I号岩体数据据陈列锰(2009);球粒陨石标准化值据 Anders and Grevesse(1989),原始地幔标准化值据 Palme and O'Neill(2007)

在S与Ni、Cu和PGE元素相关性图解上,S与Ni、Cu之间均表现出良好的正相关性(图8a、8b),S与Pd、Ir、Ru、Rh之间相关性也较好(图8d~8f),但S与Pt之间相关性较差(图8c).这一总体正相关性表明,成矿元素主要赋存于硫化物中.通过对比各主要矿体成矿元素含量,可以发现在相同S含量的情况下,3号矿体的Ni、Cu含量与24号、1号和2号矿体相

比差异不大.然而,铂族元素含量3号与24号矿体相似,略高于1号矿体,但明显高于2号矿体(图8).

为进一步研究母岩浆中硫化物的熔离过程,对各矿石样品中的Ni、Cu和PGE进行100%硫化物计算.为减少分析误差的影响,剔除了全岩S含量小于0.5%的样品.计算方法参考Barnes and Lightfoot(2005),结果显示所有矿石100%硫化物PGE原始

表 2 Ⅲ号岩体岩石及矿石中的 PGE(10^{-9})及 Ni、Cu、S(%)元素含量
Table 2 Concentrations of PGE (10^{-9}) and Ni、Cu、S (%) in the No. Ⅲ intrusion

样品编号	采样深度 (m)	矿石类型	粒度	Ru	Pd	Ir	Pt	Rh	Cu	Ni	S
				(10^{-9})					(%)		
zk404-b7	404	无矿化	中细粒	0.7	7.3	0.7	6.9	0.5	-	0.1	0.1
zk404-b9	452	浸染状	中细粒	35.9	190.6	9.5	254.5	13.3	0.2	0.4	1.2
zk404-b12	484	浸染状	中细粒	10.6	61.4	4.3	83.1	3.2	0.6	0.4	1.4
zk404-b13	496	浸染状	中细粒	14.7	104.7	3.9	61.3	6.3	0.2	0.7	1.9
zk404-b14	505	浸染状	中细粒	16.7	123.9	5.0	244.0	9.1	0.4	0.6	2.1
zk404-b15	511	浸染状	中细粒	12.7	143.5	4.7	88.9	5.8	0.2	0.4	1.7
zk404-b16	520	浸染状	中细粒	10.4	106.9	5.0	95.3	5.0	0.2	0.4	1.6
zk404-b18	525	浸染状	中细粒	21.6	80.7	7.0	135.7	7.2	1.1	0.4	2.6
zk404-b22	533	浸染状	伟晶状	10.6	113.4	5.9	188.2	6.5	0.2	0.3	1.2
zk404-b25	548	浸染状	伟晶状	11.6	112.9	5.0	258.4	5.9	0.3	0.4	1.7
zk404-b26	552	浸染状	伟晶状	7.2	170.1	3.4	506.5	4.3	0.5	0.4	1.8
zk404-b28	566	浸染状	中粗粒	19.2	131.8	9.2	385.9	7.5	0.7	0.7	1.9
zk404-b29	573	浸染状	伟晶状	14.2	113.1	5.2	379.2	6.6	0.7	0.4	1.9
zk404-b32	588	细脉状	伟晶状	18.4	149.7	5.1	456.3	8.3	0.6	0.9	3.4
zk404-b33	598	浸染状	伟晶状	10.6	209.1	5.1	795.2	6.7	0.7	0.7	2.8
zk404-b35	607	浸染状	伟晶状	9.8	171.8	4.1	291.1	3.5	0.5	0.6	2.2
zk404-b36	620	浸染状	伟晶状	7.2	116.8	4.0	439.8	4.6	0.2	0.5	2.0
zk404-b38	634	浸染状	伟晶状	3.4	92.9	1.2	334.1	1.4	0.5	0.3	1.4
zk404-b39	640	浸染状	伟晶状	5.4	226.2	4.2	536.0	2.5	1.0	0.5	2.7
zk404-b40	646	浸染状	伟晶状	18.0	81.3	10.6	268.6	7.3	0.2	0.5	1.8
zk404-b41	651	浸染状	伟晶状	0.8	39.1	0.7	58.6	0.6	0.4	0.4	1.6
zk404-b42	664	浸染状	伟晶状	0.1	1.5	-	0.8	-	-	-	0.1
zk404-b43	671	浸染状	伟晶状	0.1	2.0	-	2.6	-	-	-	0.1

注:铂族元素在中国科学院地球化学研究所关键矿产成矿与预测全国重点实验室完成;测试者:王大鹏;测试手段:卡洛斯管法;测试条件:测试仪器为 PlasmaQuant MS Elite 型 ICP-MS,测试电压为 50 kV,电流为 60 mA;稀土和微量元素测试仪器为 Agilent 7700e ICP-MS;测试精度:小于 10%;测试误差: Pd 分析误差小于 1%, Ir、Ru、Rh、Pt 分析误差小于 10%。

地幔标准化图解中(图 9),均表现为 PPGE(Pt、Pd)相对富集的左倾型,同时 PGE 相对于 Ni、Cu 亏损.在中细粒岩相浸染状矿石中,主体呈现出弱的 Pt 正异常和 Pd 负异常(图 9a);在伟晶岩相浸染状矿石中配分曲线一致,均表现出明显的 Pt 正异常和 Pd 负异常(图 9b).部分样品中 Pt 与 Pd 的解耦现象可能与硫化物分离结晶或热液活动有关.

5 讨论

5.1 橄榄石特征对分离结晶的指示

橄榄石作为金川矿床中最重要的硅酸盐矿物,是 Mg、Fe 和 Ni 的主要寄主矿物,蕴含着丰富的成岩成矿信息.橄榄石成分变化主要受母岩浆成分、分离结晶过程、橄榄石与晶间硅酸盐熔体或硫化物的反应等因素控制(Li *et al.*, 1999).在岩浆演化早期阶段,若未发生硫化物熔离, Ni 和 Mg 在橄榄石

中为相容元素,随着橄榄石分离结晶程度的提高,熔体中的 Ni、Mg 含量逐渐降低,橄榄石 Fo 值及 Ni 含量沿母岩浆正常演化趋势线逐渐降低.当橄榄石分离结晶与硫化物熔离同步发生,由于 Ni 在硫化物中的分配系数(~ 500)明显大于在橄榄石中的分配系数(~ 7),导致结晶出的橄榄石 Ni 含量迅速降低,而位于正常岩浆演化趋势线下方.金川矿床 I、II 号含矿岩体中橄榄石均表现出这一特征(Li *et al.*, 2004; 陈列锰, 2009; Duan *et al.*, 2016).

依据岩体岩相学和主量元素成分变化特征(图 6),Ⅲ号岩体的母岩浆演化过程中主要发生了橄榄石的分离结晶.利用前人对金川矿床母岩浆成分估算及橄榄石分离结晶的模拟趋势线(Chai and Naldrett, 1992a; 陈列锰, 2009; Li and Ripley, 2011; Kang *et al.*, 2022),将本研究及前人数据中Ⅲ号岩体各岩相橄榄石的成分投影至模拟曲线上,结果均落

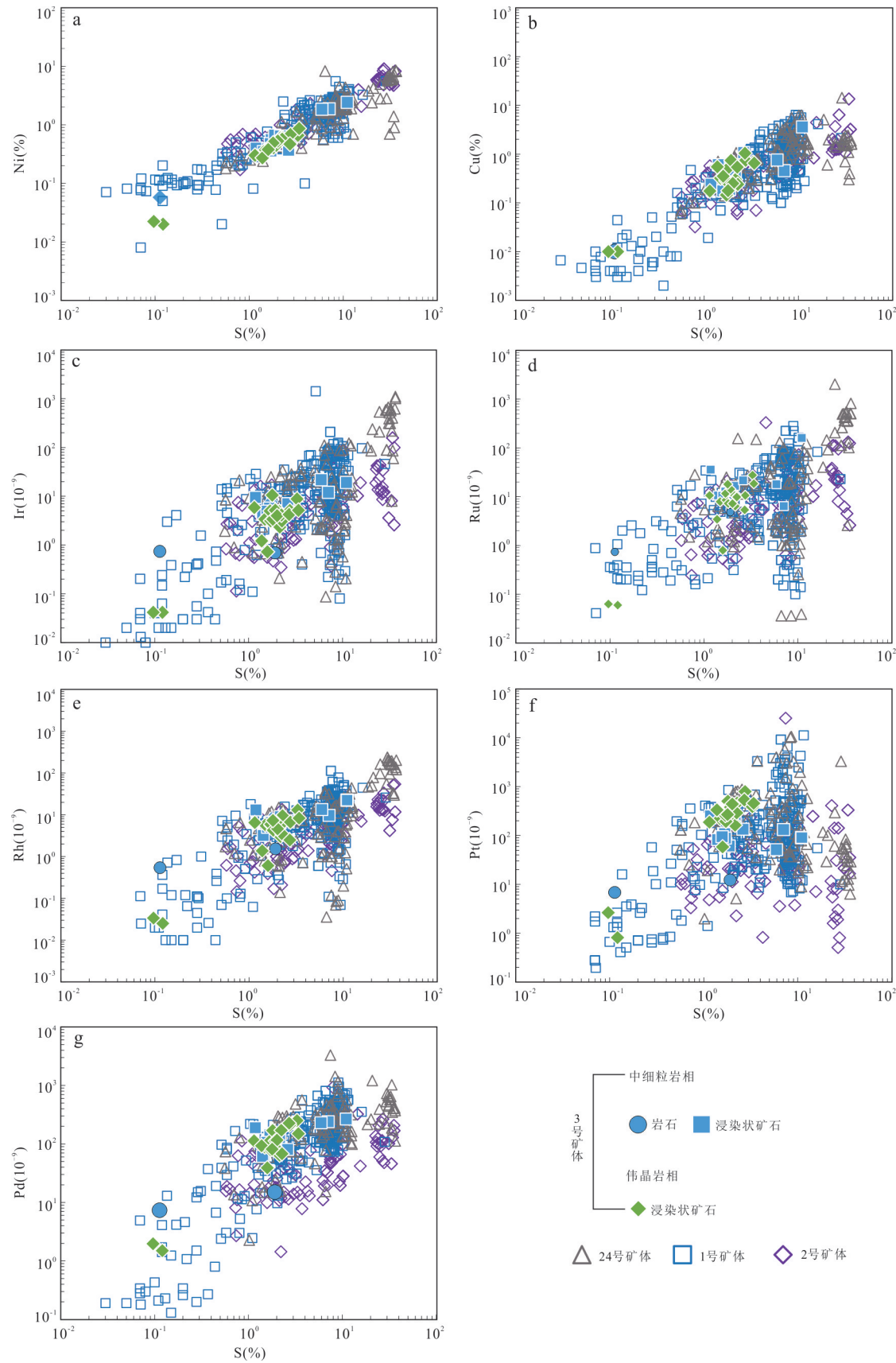


图8 3号及其他主要矿体S与铂族元素相关性图解

Fig.8 The correlation between S and Ni, Cu and PGE for the No.3 orebody and other major orebodies
1号、2号和24号矿体数据来自于Chai and Naldrett (1992b)、Song *et al.* (2009)、Chen *et al.* (2013)和Duan *et al.* (2016)

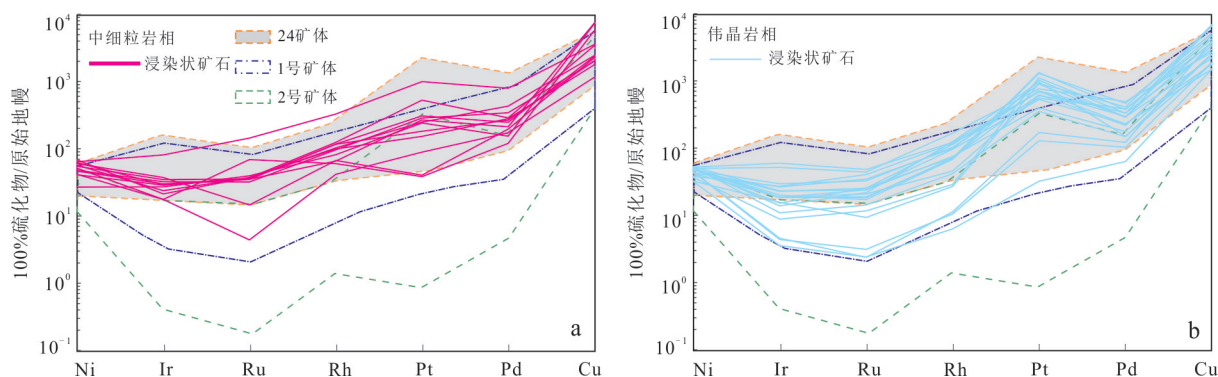


图9 3号矿体矿石样品PGE原始地幔标准化图解及与各典型矿体对比

Fig.9 Primitive mantle-normalized PGE patterns for sulfide bearing rocks from No.3 orebody

1、2和24号数据来源同图8,原始地幔中Ni、Cu和PGE的含量数据引自Palme and O'Neill(2007)

入母岩浆正常演化趋势线下方(图5),表明中细粒岩相和伟晶岩相中,橄榄石分离结晶与硫化物熔离同时发生,且橄榄石与熔离出的硫化物质量比约为20:1.

结合Ⅲ号岩体不同岩相中橄榄石Fo值及Ni含量空间变化特征,无论是中细粒岩相还是伟晶岩相,都表现出由北东向南西橄榄石Fo值及Ni含量呈逐渐升高的趋势(图5);特别是在新揭露的伟晶状二辉橄榄岩,Zk404中伟晶状二辉橄榄岩橄榄石Fo值和Ni含量(82.1%~84.3%和 $1.084 \times 10^{-6} \sim 2.114 \times 10^{-6}$)明显高于北西侧Zk503中的橄榄石相应值(80%~82.1%和 $1.117 \times 10^{-6} \sim 1.675 \times 10^{-6}$),这一现象暗示向南东方向该岩相基性程度有所增加.同时Zk404中伟晶状二辉橄榄岩的视厚度约为140 m,显著大于Zk503的20 m,表明向南东方向该岩相的规模在增大.基于岩相规模及橄榄石成分的空间变化特征,本研究认为伟晶状二辉橄榄岩在南东方向可能仍然大量存在,且随着深度的进一步延伸,该岩相的基性程度及硫化物含量也更高,具有巨大的找矿潜力.

5.2 铂族元素富集主要控制因素

铂族元素(Os、Ir、Ru、Rh、Pt和Pd)具有相似的地球化学性质,在硫化物-硅酸盐熔体之间都具有较高的分配系数($D_{\text{Sul/Sil}}=10^4 \sim 10^5$)(Peach *et al.*, 1990; Fleet *et al.*, 1996).在硫化物熔离过程中,母岩浆中的铂族元素主要进入硫化物中.金川矿床各主要矿体中的铂族元素与S含量之间普遍存在良好的正相关性(图8),表明成矿过程中铂族元素主要进入硫化物中(甘肃省地质矿产局第六地质队, 1984; Song *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2013);然而,部分铂族元素也以独立矿物形式存在(Yang *et al.*, 2006; Song *et al.*, 2009).在S含量与铂族元素相关性图解上,当S含量较高时,其所代表的海绵陨铁状和块状

矿石中S与铂族元素之间的相关性较差(图8c~8g).研究表明,当硫化物含量较高时,硫化物熔体之间的连通性较好(Barnes *et al.*, 2017; Mao *et al.*, 2018),容易发生明显的分离结晶作用.硫化物熔体发生分离结晶会进一步形成单硫化物固溶体(MSS)和残余硫化物熔体(RSL),IPGE(Ir、Ru、Rh)和PPGE(Pt、Pd)在二者之间的分配系数($D_{\text{MSS/RSL}}$)分别为3.1~17和0.017~0.24(Barnes *et al.*, 1997; Ballhaus *et al.*, 2001),导致IPGE更易进入单硫化物固溶体,而PPGE更易进入残余硫化物熔体,形成二者之间分馏的现象,因此海绵陨铁状和块状矿石硫化物熔体中的铂族元素不能代表初始硫化物熔体的成分.相反,浸染状矿石中的硫化物含量较低,并且硫化物之间被硅酸盐矿物隔绝,未发生明显的分离结晶作用,因此IPGE和PPGE之间具有良好的正相关性(图10),其硫化物中成矿元素组成也能更好地代表初始硫化物熔体的组分.

对金川矿床各主要矿体中铂族元素的分析结果显示,不同矿体中浸染状矿石100%硫化物中铂族元素存在系统差异(汤中立和李文渊, 1995; Duan *et al.*, 2016; Long *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2025).例如,3号矿体中Pt、Pd含量与24号矿体相似,明显高于1和2号矿体;而Ru、Rh含量明显高于其他3个主要矿体,其中24号和1号矿体的Ru、Rh含量相似,但均高于2号矿体(Long *et al.*, 2023; 宋谢炎等, 2023).这些差异表明,初始硫化物熔体的成分主要受母岩浆中成矿元素含量和“R因子”控制(硅酸盐与硫化物熔体质量比参考Campbell and Naldrett, 1979).前期不同研究者针对形成金川矿床主要矿体的母岩浆中铂族元素含量及“R因子”进行了模拟计算,结果表明24号矿体母岩浆中Pd含量为 0.86×10^{-9} ,

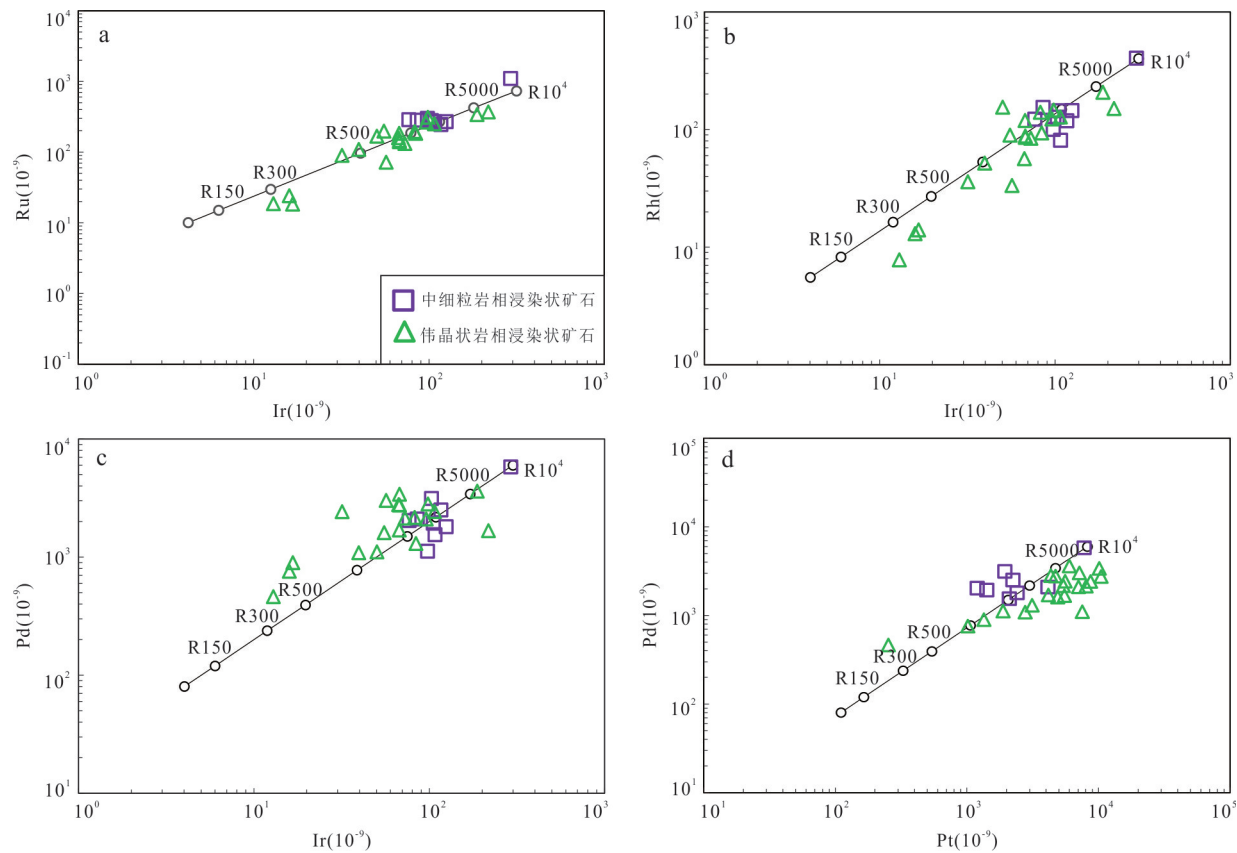


图 10 金川 3 号矿体不同岩相中浸染状矿石中硫化物的“R 因子”模拟计算

Fig.10 Modeling of the R factor for sulfides in disseminated ores from different lithofacies of the No.3 orebody
铂族元素模拟所采用的 D 硫化物/硅酸盐熔体分别为: $D_{Ir}=30\,000$, $D_{Ru}=27\,000$, $D_{Rh}=27\,000$, $D_{Pd}=30\,000$, $D_{Pt}=30\,000$; 模拟结果表明母岩中 PGE 含量分别为: $Ir=0.042\times10^{-9}$, $Ru=0.1\times10^{-9}$, $Rh=0.055\times10^{-9}$, $Pd=0.8\times10^{-9}$, $Pt=1.1\times10^{-9}$

“R 因子”范围为 1 000~5 000(陈列锰, 2009), 2 号矿体母岩浆中 Pd 含量为 $0.2\times10^{-9}\sim0.8\times10^{-9}$, “R 因子”范围为 300~1 000(Long *et al.*, 2023). 本次利用Ⅲ号岩体不同岩相中浸染状矿石进行母岩浆成分及“R 因子”模拟计算, 表明 3 号矿体母岩浆中 Pd 含量约为 0.8×10^{-9} , “R 因子”变化范围集中在 1 000~3 000(图 10), 与基于 $\delta^{34}S-S/Se$ 模拟计算得到的“R 因子”结果基本一致(Xue *et al.*, 2023). 对比不同矿体母岩浆中铂族元素含量及“R 因子”的模拟结果, 可以看出 24 号和 3 号矿体的母岩浆成分及“R 因子”变化范围均相似, 而 2 号矿体的母岩浆中铂族元素含量及“R 因子”较低, 这表明不同矿体中铂族元素的系统差异主要由母岩浆成分与“R 因子”共同控制.

5.3 Ⅲ - I 岩体成因联系及“多中心”侵位模型

Ⅲ 号和 I 号岩体是金川矿床西北端两个相邻的岩体, 空间上相距约 900 m. 据甘肃省地质矿产局第六地质队(1984)的研究, 这两个岩体形成时为一个统一整体, 后被北东东向 F8 左行平移断层错断. Mao *et al.*(2024)通过对金川矿床的精细三维建模

发现, Ⅲ 号岩体南东边界与 I 号岩体北西边界的空间形态高度吻合, 进一步支撑了二者在成岩时期为统一岩体的观点. 除了三维形态的相似, Ⅲ 号和 I 号岩体均具有上部为中细粒岩相、下部为中粗粒岩相的特征(陈列锰, 2009; Song *et al.*, 2012; Kang *et al.*, 2022). 最新的勘探结果显示, Ⅲ 号岩体明显向南东方向侧伏, 岩(矿)体向南西方向及深部具有明显“膨大”的趋势(图 2c), 且中细粒二辉橄榄岩及伟晶状二辉橄榄岩中橄榄石矿物成分也表现出由北西向南东方向 Fo 值及 Ni 含量均逐渐增大的特征(图 5), 而 I 号岩体则整体向南西方向侧伏(图 2c).

在主量元素相关性图解上, Ⅲ 号和 I 号岩体表现出连续演化的趋势(图 6). 然而, Ⅲ 号岩体的主量元素变化范围较 I 号岩体小, 暗示Ⅲ号已知控制深度所揭露的岩相可能主要代表基性程度较低的岩相, 结合金川矿床其他主要岩体岩石基性程度由浅到深逐渐变高的规律, 认为在Ⅲ号岩体深部也存在基性程度更高的岩相. 在稀土元素和微量元素图解中, 二者虽表现出相似的配分曲线型式(图 7), 但稀

土和微量元素在玄武质岩浆中随着演化程度变高而逐渐升高,Ⅲ号岩体的稀土元素和微量元素含量明显高于Ⅰ号岩体,指示Ⅲ号岩体目前所揭露的岩石端元可能仅代表高镁玄武质岩浆演化相对晚期的产物,也暗示其南东方向可能存在岩浆演化早期基性程度更高的岩相。在铂族元素含量方面,3号矿体与24号矿体的铂族元素含量相似,模拟计算也显示其母岩浆中铂族元素含量及“R因子”较一致,至少表明3号矿体和24号矿体北西侧部分可能是具有相似铂族元素特征的母岩浆演化的产物。综上所述,根据宏观地质特征、橄榄石矿物成分空间特征、主微量元素及铂族元素含量等多方面的证据,本研究认为Ⅲ号岩体和Ⅰ号岩体及赋存其中的3号和24号矿体在矿床初始形成时为统一整体,在形成时可能共用同一岩浆通道。Ⅲ号岩体的南东方向深部可能仍存在基性程度更高且含矿性更好的矿体,而Ⅰ号岩体的南西方向也可能存在类似于Ⅲ号岩体的伟晶状岩相和矿体。

随着对国内外岩浆镍钴硫化物矿床成矿过程的研究深入,普遍认为硫化物的熔离主要发生在深部岩浆房内,而硫化物的聚集沉淀主要发生在岩浆通道中(Barnes *et al.*, 2016),金川矿床也符合这一规律(宋谢炎等, 2023; Xue *et al.*, 2023),但关于金川矿床深部含硫化物岩浆上侵的具体位置和过程,仍存在较大争议。Chai and Naldrett (1992b)首先依据金川矿床的几何形态及不同矿体的铂族元素差异,提出将金川矿床划分为西部(24号矿体)、西-中部(1号矿体)和东部(2号矿体)三个次级岩浆房,是含矿岩浆分别侵位的产物。Song *et al.* (2012)和Chen *et al.* (2013)则依据矿体的岩相、形态和成矿元素差异,提出金川矿床可能存在两个独立的深部岩浆房,分别侵位形成东、西两个岩体,其中西段包括Ⅲ号和Ⅰ号岩体,东段包括Ⅱ号和Ⅳ号岩体。Kang *et al.* (2022)和Long *et al.* (2023)进一步研究认为,3号矿体的含矿岩浆由南东向北西侵位,而2号矿体的含矿岩浆则由北西向南东侵位。Duan *et al.* (2016)则依据不同矿体间多数矿石100%硫化物中Ir和Pd含量由西向东逐渐升高的趋势,提出金川矿床的形成过程是含矿岩浆由西向东连续演化的结果。

本研究基于金川矿床最新勘查进展、新构建的三维地质模型及成矿元素(Ni、Cu)浓集中心(Mao *et al.*, 2024),综合以往岩石地球化学和铂族元素模拟计算等研究成果,初步提出金川矿床是“幔源岩

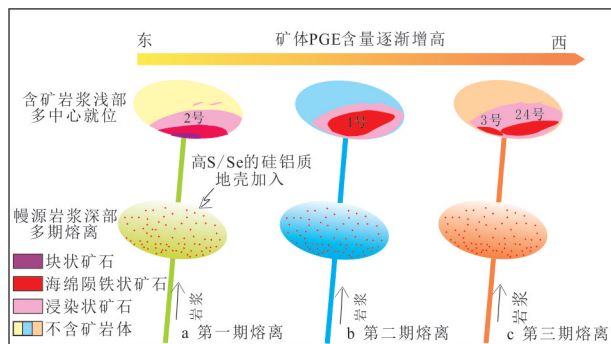


图11 金川矿床“幔源岩浆深部多期熔离-含矿岩浆多中心侵位”成矿模型示意图

Fig.11 The model of “multi-stage sulfide segregation in deep magma chamber-multi-center emplacement” of Jinchuan deposit

浆深部多期熔离-含矿岩浆多中心侵位”形成的(图11)。其中,3号矿体中不同岩相、不同粒度相及不同矿石类型之间(图3)存在截然接触关系,表明其存在多期的岩浆补给。同时在岩浆通道成矿过程中,矿体的突然膨大部位和富矿发育部位往往代表了岩浆通道的入口(Li and Naldrett, 1999),3号矿体深部新发现的视厚度达300多米矿体(图2c)和海绵陨铁状富矿的突然增多,也表明该区可能代表了金川矿床的一处岩浆通道。结合3号和24号矿体空间相连、赋矿岩体连续演化等特征,推测二者应该共用同一岩浆通道,含矿岩浆沿Ⅲ-Ⅰ号岩体结合部位上侵,由南东向北西流动形成3号矿体,而由南西向北东流动形成24号矿体。Ⅱ号岩体中的1号和2号矿体虽然都赋存于同一岩体中,但它们沿走向并不相连,底部呈“锯齿状”,起伏较大(图2c),且矿体形态分别表现为近“同心圆状”和“漏斗状”(汤中立和李文渊, 1995; Li *et al.*, 2004),含矿岩浆由西向东流动模型难以解释其宏观地质特征,二者是不同期次含矿岩浆分别沿不同中心侵位的产物。

6 结论

(1)金川矿床Ⅲ号岩体在规模和基性程度方面均表现向南东方向逐渐增大的趋势;母岩浆演化过程中,主要发生了橄榄石和辉石的分离结晶;橄榄石Fo值和Ni含量变化范围分别为82.4%~85%和 $1.069 \times 10^{-6} \sim 2.420 \times 10^{-6}$,整体具有向南东方向逐渐增大的趋势。

(2)Ⅲ号与Ⅰ号岩体形成时为统一的整体,二者共用同一岩浆通道;Ⅲ号与Ⅰ号岩体相比,表现

出连续的主量元素变化特征,但基性程度相对较低;稀土和微量元素配分型式一致,且稀土和微量元素的总量较高,表明已知的Ⅲ号岩体可能代表了岩体的上部端元,南东方向深部存在基性程度更高且含矿性更好的端元。

(3)3号矿体的PGE含量与24号矿体相似,明显高于1号和2号矿体;模拟结果显示3号矿体母岩浆中Pd含量约为 0.8×10^{-9} ,且不同岩相的“R因子”变化范围主要为1 000~3 000,这与24号和1号矿体的“R因子”相似,明显高于2号矿体。

(4)深化提出金川矿床“幔源岩浆深部岩浆房多期熔离-多中心侵位”成矿模型,深部岩浆房内至少经历了3期大规模岩浆补给及硫化物熔离事件,含矿岩浆分别沿不同的中心侵位,最终形成了2号、1号、24和3号矿体。

致谢:感谢匿名审稿人及编辑对本文提出的宝贵修改意见及建议;感谢金川集团股份有限公司对本研究开展野外工作期间给予的大力帮助和支持!

附表见<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.299>。

References

- Anders, E., Grevesse, N., 1989. Abundances of the Elements: Meteoritic and Solar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(1): 197–214. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(89\)90286-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(89)90286-X)
- Ballhaus, C., Tredoux, M., Späth, A., 2001. Phase Relations in the Fe-Ni-Cu-PGE-S System at Magmatic Temperature and Application to Massive Sulphide Ores of the Sudbury Igneous Complex. *Journal of Petrology*, 42(10): 1911–1926. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.10.1911>
- Barnes, S. J., Cruden, A. R., Arndt, N., et al., 2016. The Mineral System Approach Applied to Magmatic Ni-Cu-PGE Sulphide Deposits. *Ore Geology Reviews*, 76: 296–316. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.06.012>
- Barnes, S.J., Lightfoot, P.C., 2005. Formation of Magmatic Nickel Sulphide Deposits and Processes Affecting Their Copper and Platinum Group Element Contents. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 34: 179–213. <https://doi.org/10.5382/AV100.08>
- Barnes, S. J., Mungall, J. E., Le Vaillant, M., et al., 2017. Sulfide-Silicate Textures in Magmatic Ni-Cu-PGE Sulfide Ore Deposits: Disseminated and Net-Textured Ores. *American Mineralogist*, 102(3): 473–506. <https://doi.org/10.2138/am-2017-5754>
- Barnes, S. J., Zientek, M. L., Severson, M. J., 1997. Ni, Cu, Au, and Platinum-Group Element Contents of Sulfides Associated with Intraplate Magmatism: A Synthesis. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 34(4): 337–351. <https://doi.org/10.1139/e17-030>
- Campbell, I. H., Naldrett, A. J., 1979. The Influence of Silicate:Sulfide Ratios on the Geochemistry of Magmatic Sulfides. *Economic Geology*, 74(6): 1503–1506. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.74.6.1503>
- Chai, G., Naldrett, A. J., 1992a. The Jinchuan Ultramafic Intrusion: Cumulate of a High-Mg Basaltic Magma. *Journal of Petrology*, 33(2): 277–303. <https://doi.org/10.1093/petrology/33.2.277>
- Chai, G., Naldrett, A. J., 1992b. Characteristics of Ni-Cu-PGE Mineralization and Genesis of the Jinchuan Deposit, Northwest China. *Economic Geology*, 87(6): 1475–1495. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.87.6.1475>
- Chen, L.M., 2009. Features and Genesis of Segment I and Its Hosted Ni-Cu Sulfide Deposit of the Jinchuan Intrusion, Gansu, Province (Dissertation). Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang (in Chinese with English abstract).
- Chen, L. M., Song, X. Y., Keays, R. R., et al., 2013. Segregation and Fractionation of Magmatic Ni-Cu-PGE Sulfides in the Western Jinchuan Intrusion, Northwestern China: Insights from Platinum Group Element Geochemistry. *Economic Geology*, 108(8): 1793–1811. <https://doi.org/10.2113/econgeo.108.8.1793>
- Duan, J., Li, C. S., Qian, Z. Z., et al., 2016. Multiple S Isotopes, Zircon Hf Isotopes, Whole-Rock Sr-Nd Isotopes, and Spatial Variations of PGE Tenors in the Jinchuan Ni-Cu-PGE Deposit, NW China. *Mineralium Deposita*, 51(4): 557–574. <https://doi.org/10.1007/s00126-015-0626-8>
- Duan, J., Qian, Z. Z., Jiao, J. G., et al., 2015. Genesis of Xijing Intrusion from Longshoushan Terrane and the Tectonic Significance. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 45(3): 832–846 (in Chinese with English abstract).
- Fleet, M. E., Crocket, J. H., Stone, W. E., 1996. Partitioning of Platinum-Group Elements (Os, Ir, Ru, Pt, Pd) and Gold between Sulfide Liquid and Basalt Melt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(13): 2397–2412. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(96\)00100-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(96)00100-7)
- Gong, J. H., Zhang, J. X., Wang, Z. Q., et al., 2016. Origin of the Alxa Block, Western China: New Evidence from Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopes of the Longshoushan Complex. *Gondwana Research*, 36:

- 359—375. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.06.014>
- Gong, J. H., Zhang, J. X., Yu, S. Y., 2011. The Origin of Longshoushan Group and Associated Rocks in the Southern Part of the Alxa Block: Constraint from LA-ICP-MS U-Pb Zircon Dating. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(5): 795—818 (in Chinese with English abstract).
- Jiao, J. G., Jin, S. F., Rui, H. C., et al., 2017. Petrology, Geochemistry and Chronology Study of the Xiaokouzi Mafic - Ultramafic Intrusion in the Eastern Section of Longshou Mountains, Gansu. *Acta Geologica Sinica*, 91(4): 736—747 (in Chinese with English abstract).
- Jiao, J.G., Tang, Z.L., Yan, H.Q., et al., 2012. Magmatic Mass Balance and Metallogenic Process of Jinchuan Cu-Ni Sulfide Deposit. *Mineral Deposits*, 31(6):1135—1148 (in Chinese with English abstract).
- Kang, J., Song, X. Y., Long, T. M., et al., 2022. Lithologic and Geochemical Constraints on the Genesis of a Newly Discovered Orebody in the Jinchuan Intrusion, NW China. *Economic Geology*, 117(8): 1809—1825. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4911>
- Li, C. S., Naldrett, A. J., 1999. Geology and Petrology of the Voisey's Bay Intrusion: Reaction of Olivine with Sulfide and Silicate Liquids. *Lithos*, 47(1—2): 1—31. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(99\)00005-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(99)00005-5)
- Li, C.S., Ripley, E.M., 2011. The Giant Jinchuan Ni-Cu-(PGE) Deposit: Tectonic Setting, Magma Evolution, Ore Genesis and Exploration Implications. *Review Economic Geology*, 17:163—180.
- Li, C. S., Xu, Z. H., de Waal, S. A., et al., 2004. Compositional Variations of Olivine from the Jinchuan Ni-Cu Sulfide Deposit, Western China: Implications for Ore Genesis. *Mineralium Deposita*, 39(2): 159—172. <https://doi.org/10.1007/s00126-003-0389-5>
- Li, L.J., Mao, X.C., Liu, Z.K., et al., 2025. Multi-Stage Magma Emplacement in the Western End of the Jinchuan Ni-Cu Sulfide Deposit, NW China, and Mineral Exploration Strategy Based on Exploration Data. *Journal of Geochemical Exploration*, 268:107615. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2024.107615>
- Li, X. H., Su, L., Chung, S. L., et al., 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? *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6(11): 1—16. <https://doi.org/10.1029/2005gc001006>
- Long, T. M., Song, X. Y., Kang, J., et al., 2023. Genesis of No. 2 Orebody of the Jinchuan Magmatic Ni - Cu - (PGE) Sulfide Deposit, NW China: New Constraints from the Newly Discovered Deep Extension. *Mineralium Deposita*, 58(7): 1317—1332. <https://doi.org/10.1007/s00126-023-01184-w>
- Mao, X. C., Su, Z., Deng, H., et al., 2024. Three - Dimensional Mineral Prospectivity Modeling with Geometric Restoration: Application to the Jinchuan Ni-Cu-(PGE) Sulfide Deposit, Northwestern China. *Natural Resources Research*, 33(1): 75—105. <https://doi.org/10.1007/s11053-023-10269-2>
- Mao, Y.J., Barnes, S.J., Duan, J., et al., 2018. Morphology and Particle Size Distribution of Olivines and Sulphides in the Jinchuan Ni-Cu Sulphide Deposit: Evidence for Sulphide Percolation in a Crystal Mush. *Journal of Petrology*, 59(9):1701—1730. <https://doi.org/10.1093/petrology/egy077>
- Palme, H., O'Neill, H. St. C., 2007. Cosmochemical Estimates of Mantle Composition. In: Holland, H. D., Turekian, K. K., eds., *Treatise on Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/02177-0>
- Peach, C. L., Mathez, E. A., 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. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(12): 3379—3389. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90292-S](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90292-S)
- SGU (The Sixth Geological Unit of the Geological Survey of Gansu Province), 1984. *Geology of the Baijiazui Cu-Ni Sulfide Deposit*. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Song, X. Y., Danyushevsky, L. V., Keays, R. R., et al., 2012. Structural, Lithological, and Geochemical Constraints on the Dynamic Magma Plumbing System of the Jinchuan Ni-Cu Sulfide Deposit, NW China. *Mineralium Deposita*, 47(3): 277—297. <https://doi.org/10.1007/s00126-011-0370-7>
- Song, X. Y., Kang, J., Long, T. M., et al., 2023. Bifurcate Magma Conduit of Jinchuan Super-Large Ni-Cu-PGE Sulfide Deposit in Gansu, China and Its Implications for Deep Ore Prospecting. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 45(5): 1049—1062 (in Chinese with English abstract).
- Song, X. Y., Keays, R. R., Zhou, M. F., et al., 2009. Siderophile and Chalcophile Elemental Constraints on the Origin of the Jinchuan Ni-Cu-(PGE) Sulfide Deposit, NW China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(2): 404—424. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.10.029>
- Sun, X., Liu, C. H., Duan, R. H., 2024. The Age and Geo-

- logical Significance of Early Neoproterozoic Mafic Sills on the Eastern Margin of the North China Craton: Evidence from Zirconology. *Earth Science*, 49(9): 3122–3139 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Z.L., Li, W.Y., 1995. The Metallogenetic Model and Geological Characteristics of the Jinchuan Pt-Bearing Ni-Cu Sulfide Deposit. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese)
- Wan, Y. S., Dong, C. Y., Xie, H. Q., et al., 2024. Formation and Evolution of Archean Continental Crust in the Anshan-Benxi Area, North China Craton: A Review. *Earth Science*, 49(11): 3855–3878 (in Chinese with English abstract).
- Xue, S. C., Wang, Q. F., Wang, Y. L., et al., 2023. The Roles of Various Types of Crustal Contamination in the Genesis of the Jinchuan Magmatic Ni-Cu-PGE Deposit: New Mineralogical and C-Sr-Nd Isotope Constraints. *Economic Geology*, 118(8): 1795–1812. <https://doi.org/10.5382/econgeo.5017>
- Yang, X. Z., Ishihara, S., Zhao, D. H., 2006. Genesis of the Jinchuan PGE Deposit, China: Evidence from Fluid Inclusions, Mineralogy and Geochemistry of Precious Elements. *Mineralogy and Petrology*, 86(1): 109–128. <https://doi.org/10.1007/s00710-005-0094-4>
- Zhang, M.J., Kamo, S.L., Li, C. et al. 2010. Precise U-Pb Zircon-Baddeleyite Age of the Jinchuan Sulfide Ore-Bearing Ultramafic Intrusion, Western China. *Mineralium Deposita*, 45: 3–9. <https://doi.org/10.1007/s00126-009-0259-x>
- ### 中文参考文献
- 陈列锰, 2009. 甘肃金川 I 号岩体及其铜镍硫化物矿床特征和成因(博士学位论文). 贵阳: 中国科学院地球化学研究所.
- 段俊, 钱壮志, 焦建刚, 等, 2015. 甘肃龙首山岩带西井镁铁质岩体成因及其构造意义. 吉林大学学报(地球科学版), 45(3): 832–846.
- 甘肃省地质矿产局第六地质队, 1984. 白家咀子硫化铜镍矿床地质. 北京: 地质出版社.
- 宫江华, 张建新, 于胜尧, 2011. 阿拉善地块南缘龙首山岩群及相关岩石的起源和归属——来自 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的制约. 岩石矿物学杂志, 30(5): 795–818.
- 焦建刚, 靳树芳, 芮会超, 等, 2017. 甘肃龙首山东段小口子镁铁-超镁铁质岩体岩石学、地球化学及年代学研究. 地质学报, 91(4): 736–747.
- 焦建刚, 汤中立, 闫海卿, 等, 2012. 金川铜镍硫化物矿床的岩浆质量平衡与成矿过程. 矿床地质, 31(6): 1135–1148.
- 宋谢炎, 康健, 隆廷茂, 等, 2023. 甘肃金川超大型 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床岩浆通道分枝构造及其深部找矿意义. 地球科学与环境学报, 45(5): 1049–1062.
- 孙逊, 刘超辉, 段瑞涵, 2024. 华北克拉通东缘新元古代早期基性岩床的时代及其地质意义: 来自锆石学的证据. 地球科学, 49(9): 3122–3139.
- 汤中立, 李文渊, 1995. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比. 北京: 地质出版社.
- 万渝生, 董春艳, 颀颀强, 等, 2024. 华北克拉通鞍山-本溪地区太古宙地壳形成演化: 综述. 地球科学, 49(11): 3855–3878.