

宋谢炎, 康健, 隆廷茂, 等. 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[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(5): 1049-1062.

SONG Xie-yan, KANG Jian, LONG Ting-mao, et al. Bifurcate Magma Conduit of Jinchuan Super-large Ni-Cu-PGE Sulfide Deposit in Gansu, China and Its Implications for Deep Ore Prospecting[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(5): 1049-1062.

DOI: 10.19814/j.jese.2023.05063

· 庆贺汤中立院士从事地质工作七十周年专辑 ·

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

宋谢炎¹, 康健¹, 隆廷茂^{1,2}, 李晓栋^{1,2}, 王永才³,
李德贤³, 艾启兴³, 卢建全³

(1. 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 550081;
2. 中国科学院大学, 北京 101408; 3. 金川集团股份有限公司, 甘肃 金昌 737100)

摘要:甘肃金川超大型 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床经过 50 多年的开采, 在深边部寻找新的矿体, 特别是富矿, 以保持生产效率, 已经成为当务之急, 首先需要解决找矿方向问题。金川矿床的 4 个主要矿体不仅在空间上是相互独立的, 空间分布格局还与矿区的成矿后断裂系统关系密切。在前人对各个主要矿体地质和地球化学特征、矿区断裂构造的系统分析和研究基础上, 提出金川矿床的岩浆通道系统存在多个岩浆通道分枝, 且每个分枝的启动时间不同, 因此, 每个矿体不仅成矿过程存在差异, 也存在先后次序。在分析成矿后断裂对金川岩体和矿体空间分布状态的影响基础上, 还对深部找矿潜力进行了分析, 提出了深部找矿方向和策略。

关键词:小岩体成大矿; Ni-Cu-PGE 硫化物矿床; 岩浆通道分枝; 成矿后断裂; 深部找矿; 甘肃
中图分类号: P611 文献标志码: A 文章编号: 1672-6561(2023)05-1049-14

Bifurcate Magma Conduit of Jinchuan Super-large Ni-Cu-PGE Sulfide Deposit in Gansu, China and Its Implications for Deep Ore Prospecting

SONG Xie-yan¹, KANG Jian¹, LONG Ting-mao^{1,2}, LI Xiao-dong^{1,2},
WANG Yong-cai³, LI De-xian³, AI Qi-xing³, LU Jian-quan³

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, Guizhou, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China; 3. Jinchuan Group Co., Ltd., Jinchang 737100, Gansu, China)

Abstract: After more than 50 years mining activities, deep prospecting for new orebodies rich in Ni and Cu become more and more important in Jinchuan super-large Ni-Cu-PGE sulfide deposit of Gansu, China. The 4 major orebodies of Jinchuan deposit are not connected each other, and location patterns of the orebodies have been affected by movement of the faults. On the basis of the studies on geology and geochemistry of these orebodies and the associated faults of Jinchuan deposit, the bifurcate magma conduit during the formation of Jinchuan deposit was identified.

收稿日期: 2023-05-30; 修回日期: 2023-07-22 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(42330807, 42121003)

作者简介: 宋谢炎(1962-), 男, 河北丰宁人, 研究员, 博士研究生导师, 理学博士, E-mail: songxieyan@vip.gyig.ac.cn.

Branches of the bifurcate magma conduit develop and form the four major orebodies successively. Therefore, each individual orebody is formed by following a time sequence and has distinguishable features. The influence of post-mineralization faults on the spatial distribution of Jinchuan pluton and ore bodies was discussed; subsequently, potential and deep prospecting targets were also discussed.

Key words: small intrusion forming large deposit; Ni-Cu-PGE sulfide deposit; bifurcate magma conduit; post-mineralization fault; deep ore prospecting; Gansu

0 引言

金川超大型 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床是我国最大的镍、铂族元素和钴资源基地,镍、铂族元素和钴储量分别占全国总储量的约 70%、75% 和 30%^[1-2];同时,矿床地质现象非常丰富,堪称岩浆硫化物矿床的“天然博物馆”,也是“小岩体成大矿”成矿模式的诞生地^[3-5]。因此,金川矿床的成因及控制因素受到国内外学者的广泛关注。自 20 世纪 60 年代,金川岩体一直被认为是一个被后期 NEE 向压扭性断裂肢解的超镁铁质岩体,几个矿体也是世界最大的单一矿体被断裂肢解的结果。Chai 等根据加拿大 Sudbury 矿床的成因模式,认为金川岩体是一个大型层状岩体残留的根部,矿体是硫化物熔体向下堆积的产物^[6]。2000 年以来,国内外学者从多个方面对金川矿床进行了大量研究,对于母岩浆成分、岩浆演化、硫化物熔离条件和机制、成矿时代等问题取得了不少新的认识^[7-13],特别是对东、西两个独立岩体以及成矿岩浆通道的认识^[14-16],对于深入剖析金川矿床的成因、指导深部找矿具有重要意义。近年来,金川矿床深部找矿取得了可喜的重大突破。例如,Ⅲ号岩体深部发现了富矿体,已控制镍、铜金属储量分别达到约 25×10^4 t 和 15×10^4 t,成为金川第四大矿体,被称为 3 号矿体;2 号矿体发现了向深部尖灭再现和继续延深的趋势。金川矿床镍金属总储量已从地勘时期的约 540×10^4 t 增加到约 625×10^4 t,铜储量达 400×10^4 t^[1],相当于新探明一个超大型矿床。同时,还伴生储量约 150 t 的铂族元素、储量 18×10^4 t 的钴、储量 9 000 t 的硒和储量 2 000 t 的碲,以及金、银、铬、锶等关键(贵)金属。

然而,历经 50 余年开采,金川 2 号和 24 号矿体的富矿已开采殆尽。为满足快速增长的选矿和冶炼生产能力,采矿压力日益加大,亟需及时总结金川矿床的研究成果,为深部找矿、特别是寻找富矿提供科学依据,实现提高采矿效率、延长矿山服务年限的目标。基于此,本文总结了近年来关于金川矿床地质-

地球化学特征的研究成果,对成矿岩浆通道系统的成矿过程进行了分析,并对深部找矿方向进行了预测。

1 金川岩体地质特征

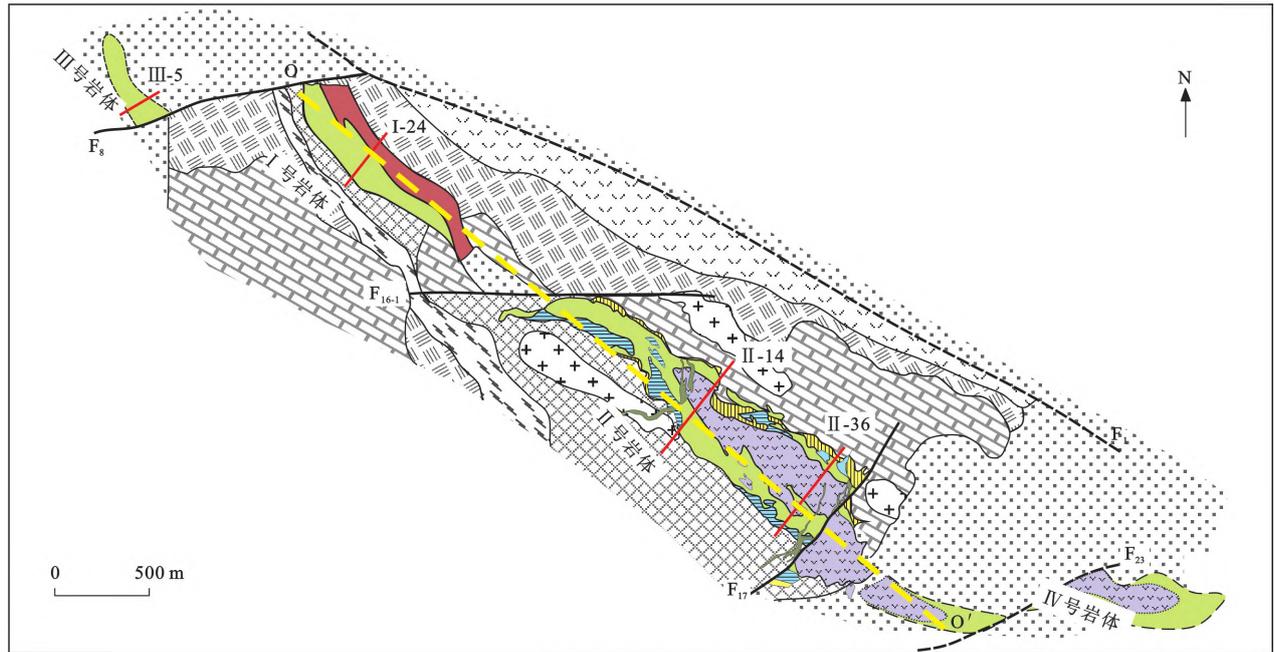
金川岩体所在的龙首山地体位于华北克拉通西南缘,总体走向为 NW—SE 向,北以逆冲断层 F_1 为界与中生代潮水坳陷相邻,南以逆冲断层 F_2 为界与早古生代祁连造山带相隔。龙首山地体主要由古元古代变质岩、中—新元古代碳酸盐-火山碎屑岩建造、晚古生代磨拉石-碳酸盐建造及中—新生代陆相碎屑岩建造构成,缺失早古生代地层^[3,12]。金川岩体出露于龙首山地体的北缘,呈 NW—SE 向产出,长约 6 500 m,最宽处仅超过 500 m,以 $5^\circ \sim 10^\circ$ 的交角不整合侵入古元古界白家咀子组下段($Anz b^1$)黑云斜长片麻岩、蛇纹大理岩和中段($Anz b^2$)混合岩、含石榴子石二云母片麻岩及蛇纹大理岩中^[17]。白家咀子组岩石均未发现富硫和富炭质等还原物质的层位。

岩体主要由纯橄岩、二辉橄岩、(含)硫化物纯橄岩或二辉橄岩、斜长二辉橄岩、橄橄二辉岩和二辉岩构成(图 1)。一系列 NEE 向断层将金川岩体由西向东分割为Ⅲ、Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ号等 4 个岩体,其中Ⅲ号和Ⅳ岩体以及Ⅱ号岩体的东部被覆盖^[14,17]。4 个主要的铜镍硫化物矿体包括:分别产于Ⅱ号岩体西部和东部的 1 号和 2 号矿体、产于Ⅰ号岩体的 24 号矿体以及产于Ⅲ号岩体的 3 号矿体[图 1(b)和 2]。

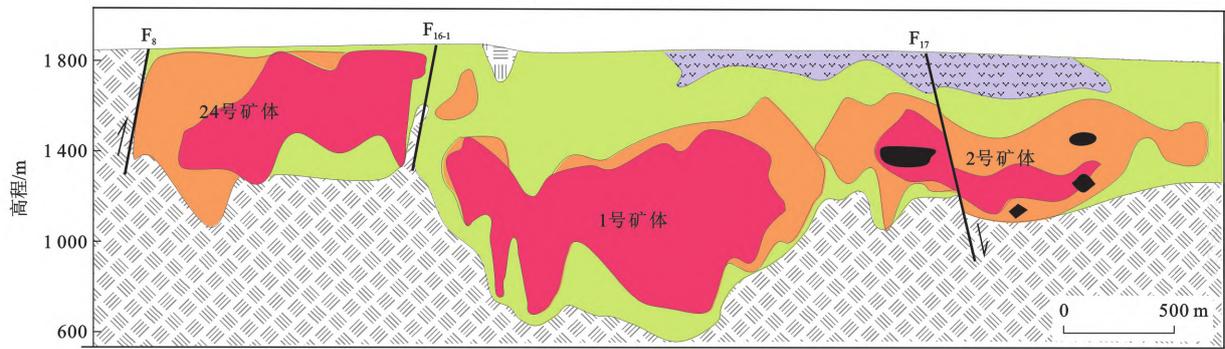
2 金川东、西两个独立岩体的识别及意义

2.1 金川矿区断裂构造

含矿岩体及矿体原始产状的识别和恢复是分析矿床成因的基础。金川矿床形成于约 830 Ma^[9,18],之后经历了古生代及中新生代的多次构造运动,其地质产状发生了很大变化^[14]。分析这些构造运动



(a) 金川岩体地质简图



(b) 典型剖面(O—O'剖面)



图件引自文献[3]、[13]~[15]和[17]

图 1 金川岩体地质简图及典型剖面

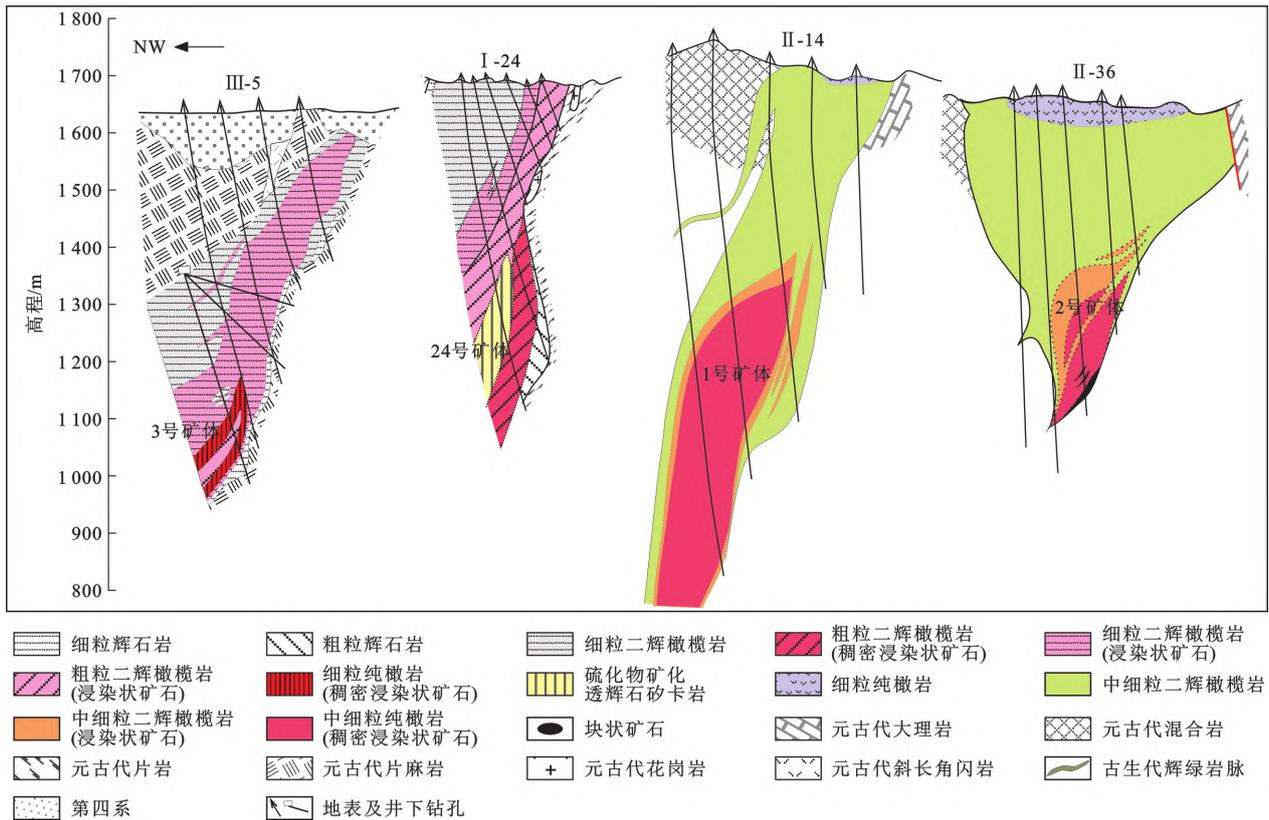
Fig. 1 Geological Sketch Map of Jinchuan Pluton and Typical Profile

对金川岩体的影响是恢复其原始产状的前提。

地勘时期对金川矿区的断裂构造进行了比较系统的识别。这些断裂被划分为区域性断裂,即NW—SE向、延伸数百千米的F₁逆冲推覆断层,以及由F₁断层运动派生的一系列次一级断层^[17]。根据断裂性质及其对白家咀子组岩层的切割关系可以将这些次一级断裂分为4组:①与F₁断层平行的NW—SE向逆断裂;②NEE—SWW向左行平移逆断层,如F₈、F₁₆₋₁、F₂₃断层等;③近SN向的右行平移断层;④NE—SW向正断层,如F₁₇断层(图3)。

NEE—SWW向、近SN向的平移断层以及NE—SW向正断层产状都较陡。

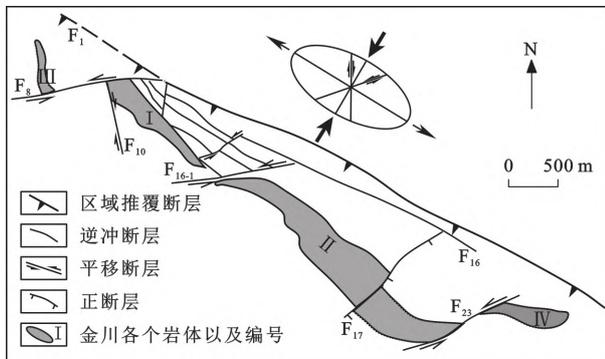
如图3所示,金川矿区的这4组次一级断层显示出非常好的配套关系,即NEE—SWW向左行平移逆断层和近SN向的右行平移断层以及NE—SW向正断层,反映出主压应力方向为NE—SW向,与F₁推覆断裂的区域应力方向一致。金川岩体正是被NEE—SWW向左行平移逆断层分割为4个岩体。特别值得注意的是,根据F₁₆₋₁断层左行平移的性质及其两侧大理岩的位错关系,可以确定其水平



勘探线 III-5 和 I-24 位于金川西岩体;勘探线 II-14 和 II-36 位于金川东岩体;图件引自文献[14]和[15]

图2 金川矿床主要矿体典型剖面

Fig. 2 Typical Profiles of Main Orebodies in Jinchuan Deposit



图件引自文献[14]以及甘肃省地质矿产勘查开发局第六地质队钻孔资料,有所修改

图3 金川岩体构造断裂及其力学分析示意图

Fig. 3 Schematic View of the Structural and Mechanical Analysis of Jinchuan Pluton

断距大约为 900 m,表明该断层的活动将其两侧的 I 号和 II 号岩体移动到目前的位置,而不是由原来的一个岩体错断为两个^[14]。因此,金川矿区的这 4 个岩体并非由一个岩体拆分而成,而是存在两个独立的岩体,这两个岩体应该具有不同的岩相组合。实际采矿情况进一步支持了这种判断,地下采矿坑道的掘进证明 F_{16-1} 地层西侧 24 号矿体的采矿坑道与东侧 1 号矿体是不连通的。

2.2 金川岩体岩相学特征

通过对勘探线剖面的系统分析以及钻孔岩芯的观察,结合勘探报告对 4 个岩体的岩相组合和分布特点进行了梳理。结果表明: I 号和 III 号岩体均由下部粗粒岩相带和上部细粒岩相带两个岩相旋回构成(图 1),二者呈截然的突变接触。两个旋回都反映出从下至上基性程度橄榄石含量逐渐减少的趋势,其空间分布也有明显的规律^[11,14,19]。I 号岩体主要由下部岩相带粗粒岩相旋回构成,从下向上依次为二辉岩(薄的边缘)、粗粒硫化物纯橄岩或二辉橄榄岩和无矿化的粗粒二辉橄榄岩,各岩相间呈渐变过渡关系,该岩相旋回由东向西逐渐变薄。粗粒硫化物纯橄岩和含硫化物二辉橄榄岩构成了 24 号矿体的稠密浸染状富矿石和浸染状贫矿石(图 2)。I 号岩体的西部出现上部岩相带细粒岩相旋回底部的细粒纯橄岩,厚度向西逐渐增加^[11]。

与 I 号岩体相反,III 号岩体主要由细粒岩相旋回构成,由下向上依次为细粒硫化物纯橄岩或二辉橄榄岩、细粒含硫化物二辉橄榄岩、细粒二辉岩,各岩相之间也呈渐变过渡关系(图 2)。I 号和 III 号岩体岩相的对应关系和分布特征说明,它们原本是同

一个岩体,被称为金川西岩体^[14], F_8 断层将其切割为I号和III号两个岩体。特别值得注意的是,粗粒二辉橄榄岩可以穿插在细粒岩相带的不同部位,说明细粒岩相旋回(即上部岩相带)的形成早于粗粒岩相旋回(即下部岩相带)。上、下两个旋回的岩相顺序表明它们分别是两个阶段含硫化物岩浆侵位和分异的产物^[13]。

F_{16-1} 断层南侧,II号岩体的西段与紧邻的I号岩体具有完全不同的岩相组合和分布,显示出独特的中心对称岩相分布,即从中心向外依次由具含稠密浸染状硫化物的中粒硫化物纯橄岩(富矿石)、含浸染状硫化物的中粒二辉橄榄岩(贫矿石)和贫硫化物中粒二辉橄榄岩或辉石岩构成(图1)。厚而均匀的中粒硫化物纯橄岩被薄的中粒含硫化物二辉橄榄岩包围,构成了金川最大的1号矿体^[15]。在II号岩体顶部还出现贫硫化物细粒纯橄岩,并与中粗粒二辉橄榄岩呈突变接触或短程渐变关系(图2)^[20]。

II号岩体东段底部和下部出现含稠密浸染状硫化物的中粒硫化物纯橄岩,之上为很厚的含浸染状硫化物的中粒二辉橄榄岩,构成金川第二大的2号矿体,矿体向东逐渐变薄,2号矿体之上为贫硫化物中粒二辉橄榄岩、含长二辉橄榄岩等(图2)。IV号岩体的岩相特征与II号岩体东段相似,其底部的含浸染状硫化物的中粒二辉橄榄岩可能是II号岩体向东延伸的结果。这些特征表明,II号和IV号岩体实际上是一个岩体,被 F_{23} 断层错断,合称为金川东岩体^[14]。上述金川矿区断裂构造和金川岩体的岩相学特征说明,以 F_{16-1} 断层为界,金川矿区存在东、西两个独立的岩体。

由于成矿过程中密度大的硫化物熔体将因重力作用向岩浆房底部沉降和聚集,只要矿石中硫化物熔体是相互联通的,就必然会形成近于水平的上界面^[15,21]。金川稠密浸染状矿石中硫化物具有良好的联通性,而浸染状矿石中硫化物的联通性较差,因此,没有受后期构造改造的矿体,其稠密浸染状矿石顶部界面必然是近水平的。2号、3号和24号矿体稠密浸染状矿石与浸染状矿石之间界面大角度SW向倾斜的产状表明金川岩体目前的产状并不是原始产状^[14]。由于区域性 F_1 断层以及矿区次一级断层的应力配套关系都说明构造推覆使得金川岩体作为龙首山地体的一部分发生了大距离的位移、旋转和错断,东、西两个岩体还发生了位置的相对变化(图4)^[15,22]。结合上述对 F_{16-1} 断层性质和断距的分析,可以推测西岩体原始位置较东岩体低,但两者之间

并非垂向的叠置关系。结合4个矿体岩相学和地球化学特征的差异,说明金川矿床并不是形成于一个单一的岩浆通道,而是形成于一个较复杂的岩浆通道分枝系统中,正确理解该岩浆通道分枝系统中发生的成矿过程对于深入剖析金川矿床的成因非常重要。

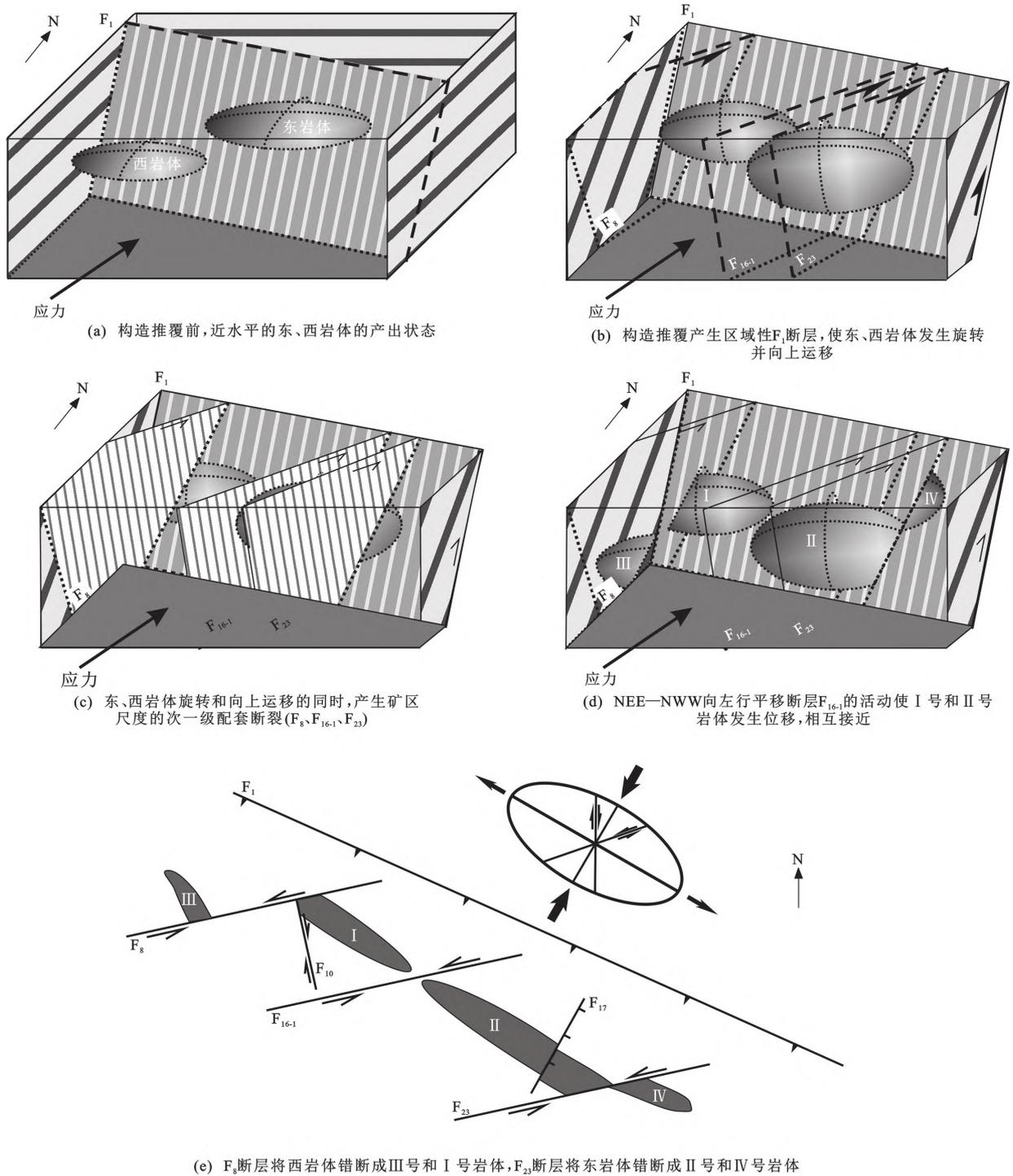
3 4个主要矿体地质-地球化学特征及其异同

金川矿床的4个主要矿体可以分为两类:一类产于岩相旋回的底部,由下至上为稠密浸染状矿石、浸染状矿石和贫硫化物二辉橄榄岩或辉石岩,硫化物含量总体上是向上变低的,浸染状矿石厚度大于稠密浸染状矿石,矿体底部可能会出现薄的浸染状矿石,如2号、3号和24号矿体;另一类产于岩体核部,硫化物含量从矿体中心向边缘降低,其核部的稠密浸染状矿石与边缘浸染状矿石之间呈短程渐变关系,稠密浸染状矿石厚度远大于浸染状矿石,如1号矿体。

对于金川东岩体而言,尽管1号和2号矿体分别产于II号岩体的西部和东部,但大量钻探工作都证明它们之间没有连接,是两个完全独立的矿体。1号矿体呈板状,长约1700m,宽500~700m,厚数十米至百余米,是金川最大的矿体,世界罕见,镍金属储量约占金川矿床总储量的57%。近年来的井下钻探表明矿体的主体部分在约700m高程便收缩尖灭,仅矿体的西部向下膨大并继续延深。

如图5所示,1号矿体在垂向上产于II号岩体的中部,被二辉橄榄岩包围,下方的二辉橄榄岩可以很厚,反映出“中心对称”的结构状态。厚大的稠密浸染状富矿被很薄的浸染状贫矿包裹,上侧的浸染状贫矿往往比下侧的稍厚。仅有极个别部位有稠密浸染状矿石直接出现在岩体底板。稠密浸染状富矿与浸染状贫矿之间以及浸染状贫矿与二辉橄榄岩之间都呈现短程渐变过渡关系。1号矿体的这种地质产状和岩相分布很难用硫化物的原地重力堆积解释,更可能是深部分异良好的岩浆房因构造活动导致的。例如,正断层活动导致岩浆房顶板的坍塌,上部贫硫化物橄榄石-硅酸盐晶粥、中部的含硫化物橄榄石-硅酸盐晶粥和底部的硫化物-橄榄石晶粥依次挤入东岩体形成矿体^[15]。

2号矿体产于II号岩体的东部,矿体全长约1300m,平均厚度约120m,规模仅次于1号矿体,地质产状明显区别于1号矿体。如图6所示,2号



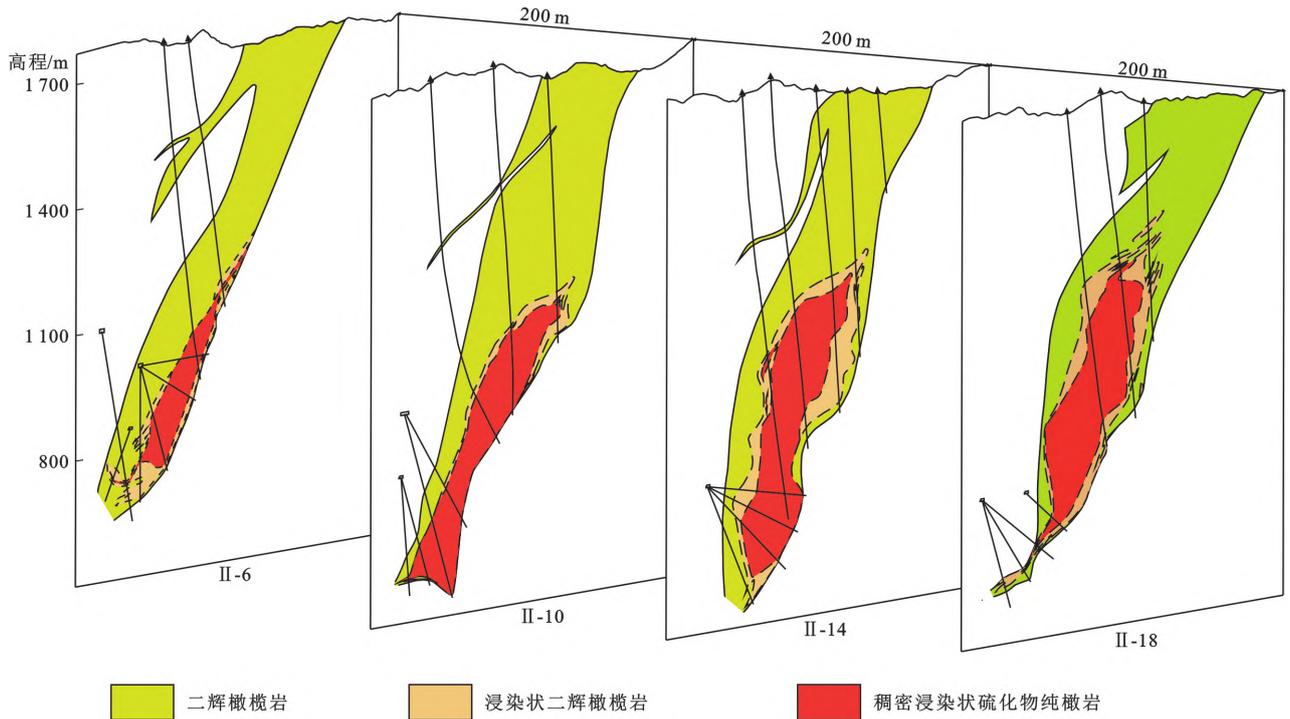
图件引自文献[14]

图 4 金川矿床后期断裂构造对岩体产状的影响过程示意图

Fig. 4 Schematic Views Illustrating the Influence Process of Late Fault Structures on the Attitude of Pluton in Jinchuan Deposit

矿体稠密浸染状富矿比例相对较低,并且从西向东逐渐变薄。其突出特点是在矿体西部出现规模不等的透镜状或不规则状块状矿体,与稠密浸染状或浸染状矿石呈截然的突变接触。它们既可以产于矿体的底部,也可以产于矿体的上部或中部,既可以平行

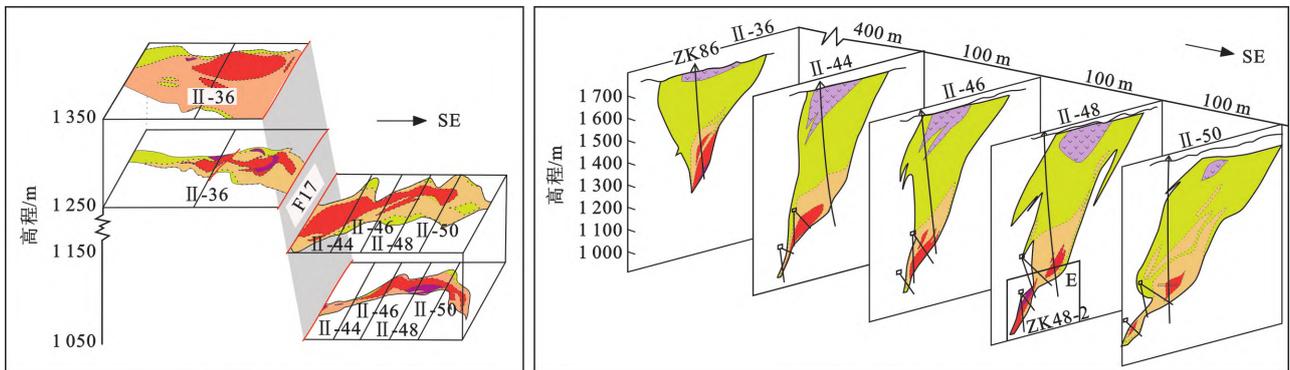
于矿体的总体产状,也可以斜交。近年来的井下钻探发现在 2 号矿体的东部,矿体向深部出现显著的膨缩变化,形成了长约 150 m 的透镜状矿体。该透镜状矿体从底部向顶部依次出现浸染状矿石、稠密浸染状矿石和块状矿石(图 6)。矿体的地质产状、



图件引自甘肃省地质矿产勘查开发局第六地质队及金川集团股份有限公司钻探资料

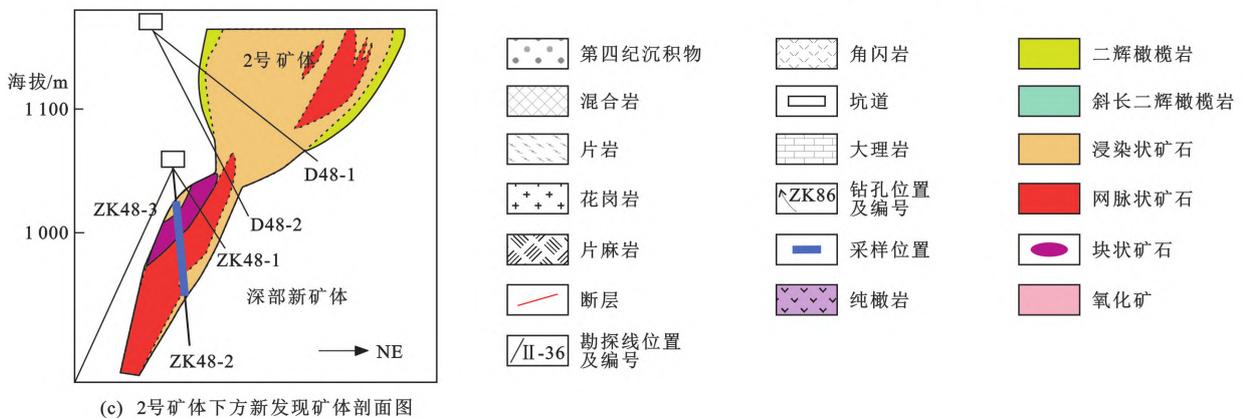
图 5 1 号矿体典型剖面

Fig. 5 Typical Cross-sections of No. 1 Orebody



(a) 2号矿体横向剖面图

(b) 2号矿体纵向典型剖面图



(c) 2号矿体下方新发现矿体剖面图

图件引自甘肃省地质矿产勘查开发局第六地质队及金川集团股份有限公司钻孔资料及文献[22]

图 6 2 号矿体横向和纵向典型剖面岩相关系

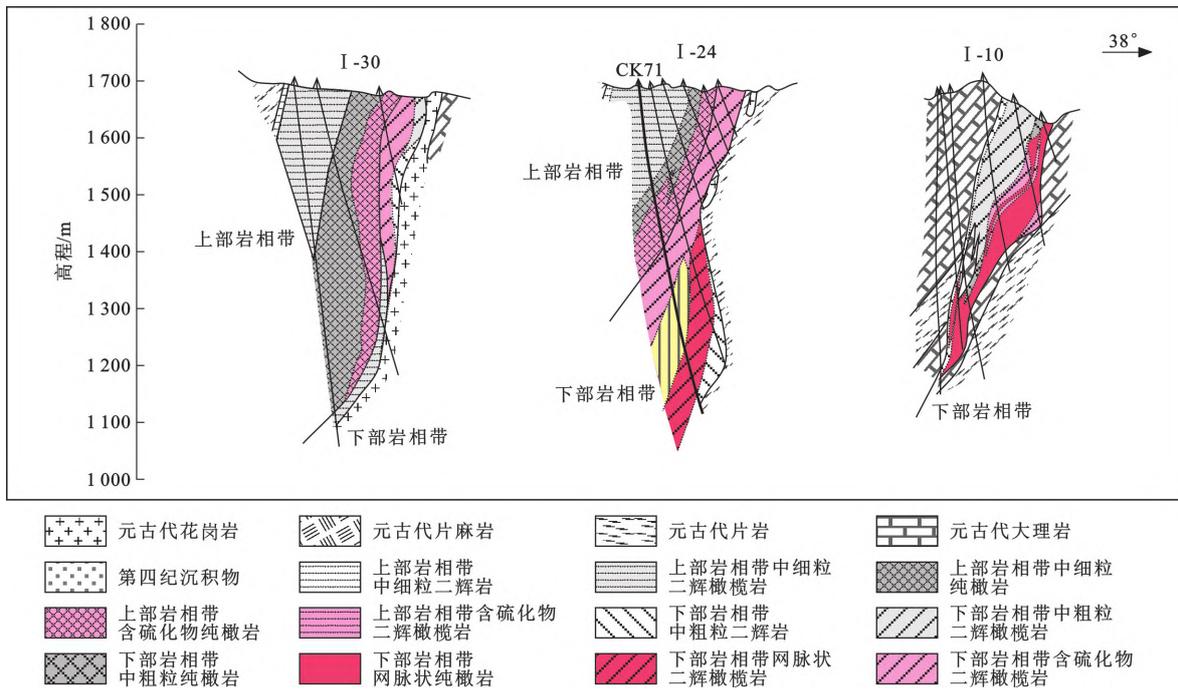
Fig. 6 Typical Horizontal and Vertical Profiles Showing Lithofacies Relationship of No. 2 Orebody

各类矿石的空间分布以及矿石的地球化学组成变化说明,2号矿体的稠密浸染状和浸染状矿石主要是硫化物从多次补充的岩浆中堆积形成的,而块状矿石则是由纯的硫化物矿浆挤入形成的^[22]。

金川西岩体上、下两个岩相旋回的底部硫化物的聚集分别形成了3号和24号矿体。与上、下旋回的空间分布相对应,而24号矿体主要产于I号岩体的中东部,3号矿体主要产于III号岩体。根据岩相间的穿插关系,可以判断其下部粗粒岩相旋回的形成晚于上部细粒岩相旋回,因此,24号矿体的形成晚于3号矿体,它们分别是两个成岩成矿阶段的产

物^[13]。

似层状的24号矿体是金川矿床最早发现的矿体,长约1300m,最厚达130m,储量小于2号矿体。由于I号岩体底板在纵、横两个方向上都有较大起伏,24号矿体的厚度也随岩体底板的起伏有很大变化,特别是稠密浸染状粗粒硫化物纯橄岩富矿在底板下凹的部位明显变厚,并且直接与围岩接触,在底板上凸的部位变薄或消失,而含浸染状硫化物的粗粒二辉橄岩贫矿连续性较好(图7)。底板围岩中可能出现小规模稠密浸染状矿化,很可能是硫化物向下渗透的结果。



图件引自甘肃省地质矿产勘查开发局第六地质队钻孔资料及文献[11]和[14]

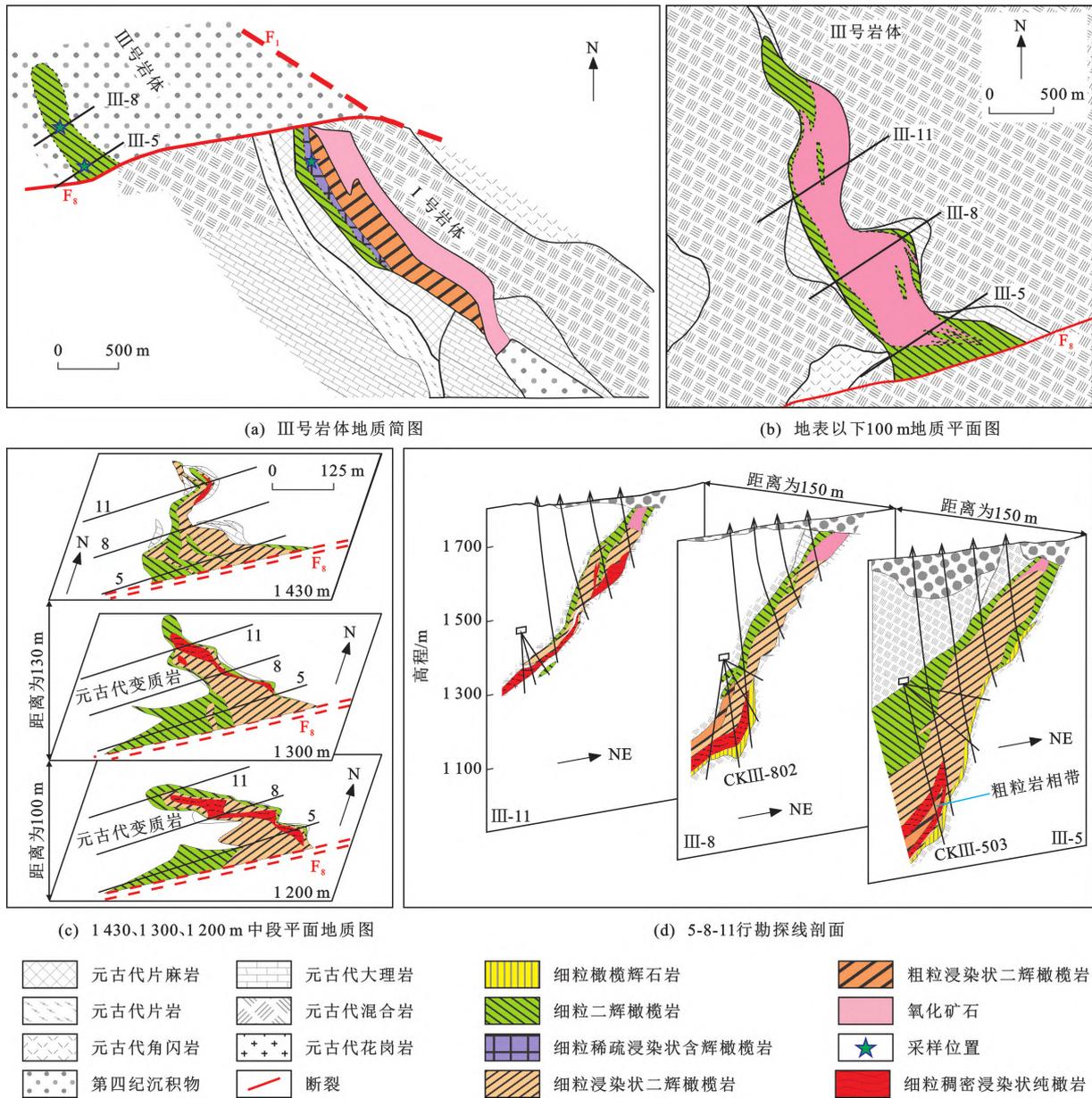
图7 24号矿体典型勘探线剖面

Fig. 7 Typical Profiles of No. 24 Orebody

地勘时期在III号岩体的钻探发现了厚度较大的含浸染状硫化物细粒二辉橄岩贫矿。金川集团股份有限公司最近几年多条勘探线的井下钻探在深部上部岩相旋回底部的细粒纯橄岩中发现了稠密浸染状富矿,最大厚度约40m,沿走向延伸超过400m(图8)^[13]。富矿的发现使III号岩体的矿化规模和开采价值增大,被命名为III-3号矿体或3号矿体^[13],与产于下部岩相旋回底部的24号矿体是相互独立的两个矿体。3号矿体产于III号岩体的中东部,整体长超过700m,由下部稠密浸染状硫化物橄岩富矿和其上含浸染状硫化物的二辉橄岩贫矿构成,是金川矿床规模最小的主要矿体。值得注意的是,矿体从III号岩体中部向东逐渐变厚,被F₈断层

突然切断(图8),但在I号岩体的最西端并没有发现与3号矿体对应的矿体,暗示F₈断层有可能存在多个断面,3号矿体丢失的部分可能被几个断面所夹持。稠密浸染状富矿与浸染状贫矿结构、矿物组成以及金属元素组成的快速变化说明它们具有不同的形成机制。Kang等认为稠密浸染状富矿是硫化物润湿橄岩共同快速沉淀的结果,当然另一种可能是硫化物熔体向下渗透,排挤并置换橄岩之间的硅酸盐熔体形成的;而浸染状贫矿则是孤立的硫化物乳珠缓慢沉降的结果^[13]。

综上所述,金川东、西岩体硫化物矿化的地质特征有显著的区别,东岩体的矿化规模远大于西岩体。东岩体1号和2号矿体镍金属储量占金川矿床总储



图件引自甘肃省地质矿产勘查开发局第六地质队、金川集团股份有限公司钻孔资料及文献[13]

图 8 Ⅲ号岩体与 3 号矿体的横向和纵向典型剖面

Fig. 8 Typical Horizontal and Vertical Profiles of Segment III and No. 3 Orebody

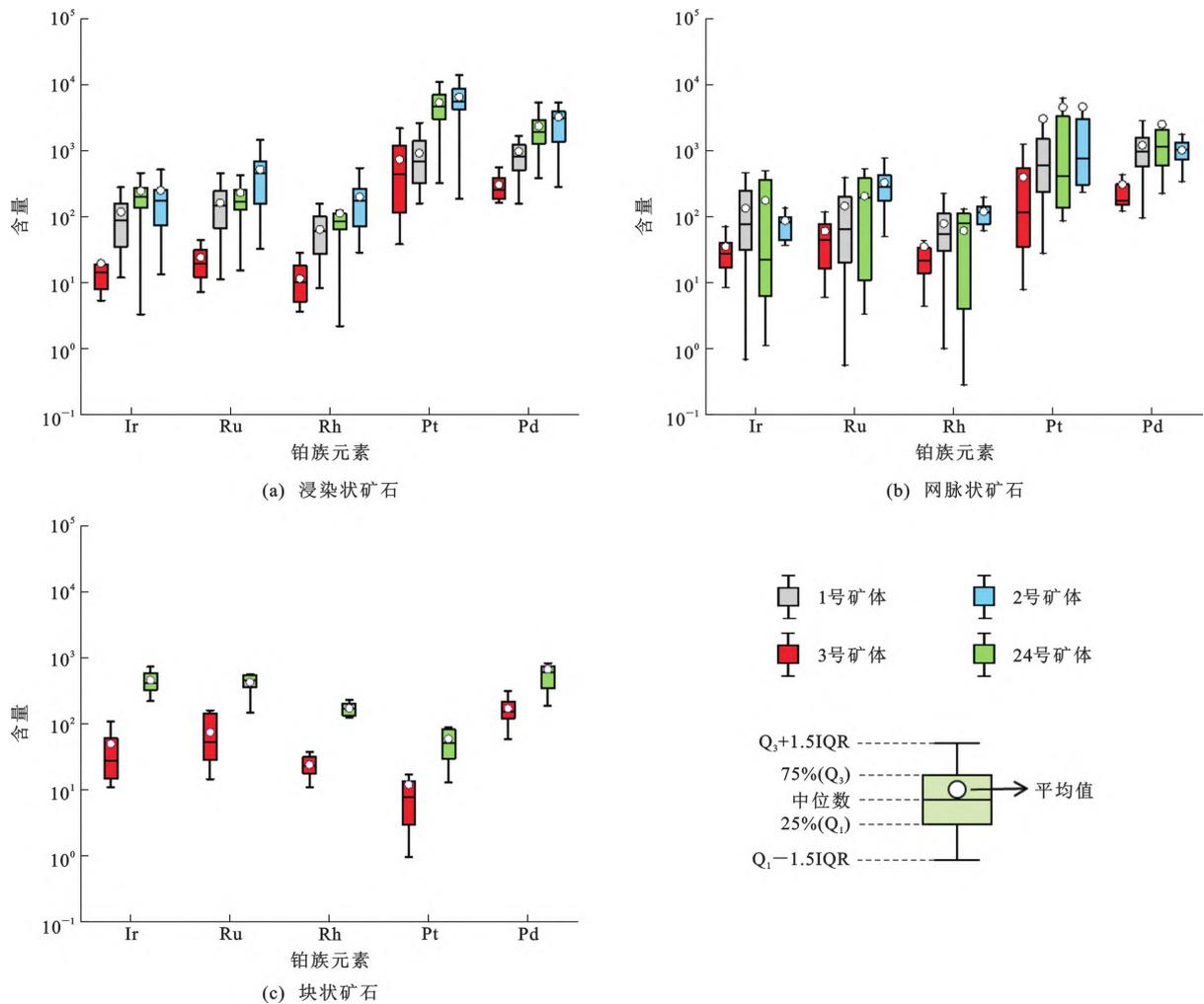
量的 75% 以上。根据已经发表的数据^[23-24] 统计显示,从 2 号、1 号、24 号到 3 号矿体,各类矿石 100% 硫化物中铂族元素含量逐渐升高,西岩体矿石相对东岩体的矿石更富铂族元素(图 9)。各主要矿体铂族元素组成的差异暗示它们的母岩浆成分和部分熔融过程中硅酸盐熔体与硫化物熔体比例的差异,反映出它们之间成矿过程存在差异。

4 金川矿区岩浆通道系统特点

4.1 铜镍硫化物成矿岩浆通道的特点

自 20 世纪 30 年代以来,全球发现的超大型 Ni-

Cu(-PGE)硫化物矿床大多赋存于小型镁铁—超镁铁质侵入岩体中,如我国金川超大型 Ni-Cu(-PGE)矿床(20 世纪五六十年代)和夏日哈木超大型 Ni-Co 矿床(21 世纪初)、俄罗斯 Noril'sk 超大型 Ni-Cu(-PGE)矿床(20 世纪 30 年代)和 Pechenga 超大型 Ni-Cu(-PGE)矿床、加拿大 Voisey's Bay 超大型 Ni-Cu-Co 矿床(20 世纪 90 年代)等。20 世纪 90 年代建立的岩浆通道成矿模型为理解这类矿床的形成提供了新的思维脉络^[21]。该模型认为:①与成矿有关的岩浆来源于地幔部分熔融;②大多数含矿岩体的直接围岩是贫硫的,因此,地壳硫的加入以及硫化物



中间的箱体代表从数据集一分位(Q_1)到三分位(Q_3)的数据范围,箱体中间的横线和空心圆圈分别代表数据集的中位数和平均值,箱体的上、下虚线分别是距离箱体1.5倍分位距(1.5IQR)的范围;图中统计的铂族元素数据来自文献[6]、[11]、[15]、[22]~[26]

图9 主要矿体的浸染状矿石、网脉状矿石和块状矿石的硫化物铂族元素含量箱型图

Fig. 9 Box Plots of Sulfide PGE Contents for Disseminated, Net-textured and Massive Ores of Major Orebodies

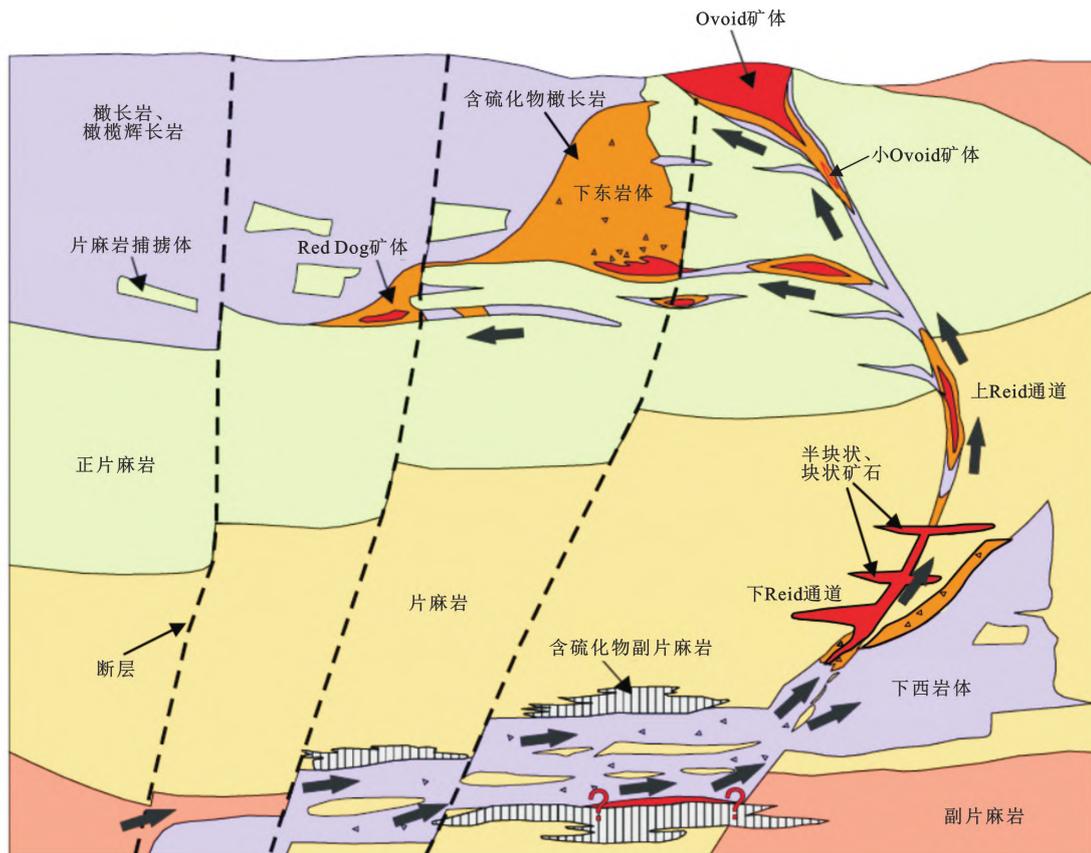
熔离发生在较深的部位;③重力作用下硫化物的聚集-成矿可能发生在岩浆通道系统上的多个部位;④含矿岩体往往具有很高的矿化率,是岩浆通道系统上的岩体或通道相;⑤含矿岩体是开放体系。该模型较好地解释了除加拿大 Sudbury 矿床以外大多数岩浆硫化物矿床的一些基本特点^[2,27]。该模型被运用于加拿大 Voisey's Bay 超大型 Ni-Cu-Co 矿床的勘探(1993~1997年),其是近40年来世界上新发现的最大的岩浆硫化物矿床^[28]。

从加拿大 Voisey's Bay 超大型 Ni-Cu-Co 矿床的成矿模式(图10)可以看出,深部熔离的硫化物在岩浆通道不同深度的膨大部位聚集。尽管最大的矿体形成在浅部,但深部的岩体、岩席或岩墙也可以形成不同规模的矿体,说明沿岩浆通道向深部仍有一定的找矿潜力。需要注意的是,作为岩浆通道遗迹的岩墙可以延伸到很大的深度,而且膨缩变化剧烈,

甚至可能由于间歇式的构造挤压发生间断。新疆黄山—镜儿泉成矿带宏观尺度的成矿模式也符合岩浆通道成矿模型;同样地,深部通道相以形成中小型矿床为主,而上部大岩体可以形成大型矿床^[29-31]。

4.2 金川矿床岩浆通道分枝构造的构建及其对深部找矿的指导

近年来,一些学者对金川矿床的岩浆通道开展了研究,但对岩浆通道位置的认识和判断依据存在差异^[15,32-33]。本次研究根据金川矿床几个主要矿体地质和地球化学特征的差异,认为它们的形成不仅有先后次序,而且硫化物熔离和聚集的过程和机制也有差异,说明金川矿床应属较为复杂的岩浆通道分枝系统。例如,1号和2号矿体地质特征的显著差异以及物理不连续性,说明它们具有各自独立的岩浆通道分枝,深部硫化物熔离以及向上运移的过程和路径不同。



图件引自文献[28]

图 10 加拿大 Voisey's Bay 超大型 Ni-Cu-Co 矿床成矿模式

Fig. 10 Mineralization Model of Voisey's Bay Giant Ni-Cu-Co Deposit in Canada

如上所述,金川西岩体上、下旋回的空间分布以及岩相学特点都存在明显差异,穿插关系也说明下旋回的形成晚于上旋回,产于下旋回的 24 号矿体形成晚于产于上旋回的 3 号矿体。它们对应的岩浆通道的活动时间也有早晚,尽管它们也有可能使用一个岩浆通道。因此,对金川矿床岩浆通道分枝系统的研究不仅对理解各个矿体的成因有重要意义,也可以为深部找矿提供合理依据。

根据 1 号矿体是罕见的中心对称结构,Song 等提出了“硫化物-橄榄石晶粥”挤入的成因模式,较好地解释了 1 号矿体的各种地质和地球化学特征^[15]。该模式的重要意义在于,推测深部还存在含矿岩浆房。正是该深部含矿岩浆房的存在和分异,才能够形成从下至上硫化物熔体-橄榄石晶粥、含硫化物的橄榄石硅酸盐晶粥和贫硫化物橄榄石-硅酸盐晶粥的分层。这些晶粥依次向上挤入才能形成 II 号岩体中西部中心对称的岩相分带结构(图 4)。同时,根据稠密浸染状矿石橄榄石定向性以及 1 号矿体东端封闭等地质特征,可以推测岩浆通道入口在该矿体西段。这个判断与近年来在标高 850 m 的井下钻

探结果是一致的,即 1 号矿体在其西段(龙首矿东采区)部分勘探线向下有膨大和延伸的趋势,可推测深部含矿岩浆房也应该在这个方向上。因此,1 号矿体深部找矿的重点应该布置在西段,加大井下勘探的力度,采取“顺藤摸瓜”的方式进一步向下寻找深部含矿岩浆房。

2 号矿体向深部的膨缩变化以及新的透镜状矿体的发现,表明硫化物也来源于深部,即成矿岩浆通道是向下延伸的。尽管该透镜状矿体向深部已经尖灭,但不能排除向下“尖灭再现”的可能。理由是:①硫化物熔离一定发生在深部,硫化物来自深部。②2 号矿体不同部位块状矿体与周围浸染状矿石截然的地质界限以及地球化学特征的突然变化,说明块状矿体是纯的硫化物矿浆侵入的产物,而硫化物矿浆更可能来自深部。虽然硫化物熔浆的密度高达 $4\sim 5\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,远高于地壳岩石和二辉橄榄岩,但包括岩浆房坍塌、构造挤压等非重力因素,可能导致其短距离地向上迁移^[15],Saumur 等的模拟计算结果^[34]也证明了这种观点。鉴于硫化物矿浆密度远大于硅酸盐岩浆,深部含硫化物矿浆的岩浆房应该

不远。③这些硫化物矿浆岩浆通道有可能局部被构造挤压局部封闭,但并不意味着消失,有可能在横向的相邻部位再次出现。④由于后期推覆构造和次一级断裂的破坏,金川岩体和其中矿体的空间变化非常复杂,今后的井下勘查还应该考虑断裂破坏导致的矿体错位和构造“尖灭再现”的现象。鉴于2号矿体东西延伸上千米,不能排除2号矿体在其他部位还有其他类似的岩浆通道。例如,在Ⅳ号岩体的深部也有可能存在另一个向下延伸的岩浆通道。

鉴于24号矿体稠密浸染状富矿厚度与Ⅰ号岩体底板的起伏变化有很好的对应关系,尽管24号矿体的富矿向深部尖灭、消失,但向深部仍然有岩体底板下凹的起伏变化的可能,因此,深部可能再次出现富矿。与24号矿体相似,3号矿体向深部也有可能由于Ⅲ号岩体底板的起伏变化,在深部出现新的富矿体。

根据金川矿床岩浆通道分枝系统的特点,各个矿体的深部找矿应该遵循“顺藤摸瓜”的原则,沿各自岩浆通道向下延深的方向,制定深部找矿方案。例如,1号矿体的深部找矿应该布置在矿体西部的矿体自然延伸方向。另外,1号和2号矿体的规模远大于3号和24号矿体,因此,东岩体对应的岩浆通道分枝深部成矿条件好于西岩体对应的岩浆通道分枝。

5 存在问题

由于铜镍硫化物成矿包括了地幔部分熔融、玄武岩浆上升、分离结晶、同化混染、硫化物熔离、硫化物运移、聚集等复杂的地质、物理和化学过程^[35],还经历了蚀变和构造变形等成矿后过程,每一个矿床经历的这些过程都存在差异。因此,尽管国内外都在探索分析岩浆通道向深部延伸的方法和手段,但很难建立统一的识别和判别标志。尽管经过超过10年的研究,笔者形成了上述金川矿床岩浆通道分枝构造的新认识,希望能够指导深部找矿,但仍然需要更多的研究对这个认识进行验证、修正和完善。

此外,形成于地下深处的金川岩体暴露到地表必然是后期构造运动的结果,因此,其产出状态与矿区断裂构造关系十分密切。但由于缺乏对断裂构造深入和精细的研究,长期以来对“这些断层究竟是成矿前的导矿构造,还是成矿后的破坏性构造”的认识存在分歧。另一方面,虽然对这些断层在地表分布、性质和配套关系已经有了比较合理的定性认识,但对这些断层在三维空间延伸和变形状态的研究却非

常薄弱,还不能定量地评价这些断裂构造对矿体的破坏,非常有必要准确地判断断裂对深部岩浆通道延伸及未知含矿岩体位置的控制,并指导深部找矿。

6 结语

(1)甘肃金川超大型Ni-Cu-PGE硫化物矿床的4个主要矿体的地质产状、矿石类型及其空间分布、岩相组合、铂族元素组成都存在差异,说明它们经历了不同的形成过程。

(2)上述差异表明金川矿床的岩浆通道系统是由多个岩浆通道分枝构成的,每个岩浆通道分枝的开启时间不同,因此,4个主要矿体形成时间上有先后次序,空间上相互独立。

(3)金川矿床的深部找矿应该在认真分析岩浆通道分枝构造的基础上,采取“顺藤摸瓜”的策略。同时,后期断裂对深部岩浆通道或含矿岩体的破坏和控制还需要展开深入和细致的研究。

60多年前,汤中立院士带领地质队员发现了金川超大型矿床,为我国地质找矿事业做出了卓越贡献,是我们这一代地质工作者的榜样和楷模!谨以拙作祝贺汤院士从事地质工作七十周年,并祝先生健康、平安、长寿!本人曾有幸在甘肃省地质矿产勘查开发局酒泉地调队工作,在工作中耳濡目染了汤院士的不少感人事迹,见证了他们那一代人找到的新中国第一批超大型矿床——金川、白银、镜铁山矿床等,深感作为甘肃地质人的骄傲!2004年,本人开始金川矿床的研究工作,在野外工作中多次得到汤院士的指导。他平易近人、认真严谨的工作态度和年轻心态给我留下非常深刻的印象,他的指教和鼓励成为我开展研究工作的动力!此外,金川集团股份有限公司长期以来在工作条件和资金方面给予了大力支持,镍钴研究院、龙首矿、二矿和三矿的领导和地质人员在野外工作中提供了大量帮助,在此一并致谢!

参考文献:

References:

- [1] 金川集团股份有限公司. 甘肃省金昌市白家嘴子矿区镍铜矿资源储量核实报告[R]. 金昌:金川集团股份有限公司,2017.
Jinchuan Group Co., Ltd. Reserves of Ni-Cu Sulfide Deposit in Baijiazuizi Mining District, Jinchang, Gansu Province [R]. Jinchang: Jinchuan Group Co., Ltd., 2017.
- [2] 宋谢炎. 岩浆硫化物矿床研究现状及重要科学问题

- [J]. 矿床地质, 2019, 38(4): 699-710.
- SONG Xie-yan, Current Research Status and Important Issues of Magmatic Sulfide Deposits[J]. Mineral Deposits, 2019, 38(4): 699-710.
- [3] 汤中立, 李文渊. 金川铜镍硫化物矿床(含铂)矿床成矿模式及地质对比[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- TANG Zhong-li, LI Wen-yuan, Comparing Formation Model and Geology of Jinchuan Cu-Ni (Pt) Sulfide Deposit[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995.
- [4] 汤中立, 徐刚, 王泸文, 等. 小岩体成矿体系[J]. 矿物学报, 2011, 31(增): 397-398.
- TANG Zhong-li, XU Gang, WANG Lu-wen, et al. Ore-forming System in Small Intrusive Bodies[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2011, 31(S): 397-398.
- [5] 汤中立, 闫海卿, 焦建刚. 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, 2006, 25(1): 1-9.
- TANG Zhong-li, YAN Hai-qing, JIAO Jian-gang. New Classification of Magmatic Sulfide Deposits in China and Ore-forming Processes of Small Intrusive Bodies[J]. Mineral Deposits, 2006, 25(1): 1-9.
- [6] CHAI G, NALDRETT A J. Characteristics of Ni-Cu-PGE Mineralization and Genesis of the Jinchuan Deposit, Northwest China[J]. Economic Geology, 1992, 87(6): 1475-1495.
- [7] LI C S, XU Z H, DE WAAL S A, et al. Compositional Variations of Olivine from the Jinchuan Ni-Cu Sulfide Deposit, Western China: Implications for Ore Genesis[J]. Mineralium Deposita, 2004, 39(2): 159-172.
- [8] RIPLEY E M, SARKAR A, LI C S. Mineralogic and Stable Isotope Studies of Hydrothermal Alteration at the Jinchuan Ni-Cu Deposit, China[J]. Economic Geology, 2005, 100(7): 1349-1361.
- [9] LI X H, SU L, CHUNG S L, et al. 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, 2005, 6(11): 2005-GC001006.
- [10] YANG S H, QU W J, TIAN Y L, et al. Origin of the Inconsistent Apparent Re-Os Ages of the Jinchuan Ni-Cu Sulfide Ore Deposit, China: Post-segregation Diffusion of Os[J]. Chemical Geology, 2008, 247(3/4): 401-418.
- [11] CHEN L M, SONG X Y, KEAYS R R, et al. Segregation and Fractionation of Magmatic Ni-Cu-PGE Sulfides in the Western Jinchuan Intrusion, Northwestern China: Insights from Platinum Group Element Geochemistry[J]. Economic Geology, 2013, 108(8): 1793-1811.
- [12] DUAN J, LI C S, QIAN Z Z, et al. Geochronological and Geochemical Constraints on the Petrogenesis and Tectonic Significance of Paleozoic Dolerite Dykes in the Southern Margin of Alxa Block, North China Craton[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 111: 244-253.
- [13] KANG J, SONG X Y, LONG T M, et al. Lithologic and Geochemical Constraints on the Genesis of a Newly Discovered Orebody in the Jinchuan Intrusion, NW China [J]. Economic Geology, 2022, 117(8): 1809-1825.
- [14] SONG X Y, DANYUSHEVSKY L V, KEAYS R R, et al. Structural, Lithological, and Geochemical Constraints on the Dynamic Magma Plumbing System of the Jinchuan Ni-Cu Sulfide Deposit, NW China [J]. Mineralium Deposita, 2012, 47(3): 277-297.
- [15] SONG X Y, KEAYS R R, ZHOU M F, et al. Siderophile and Chalcophile Elemental Constraints on the Origin of the Jinchuan Ni-Cu-(PGE) Sulfide Deposit, NW China [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2009, 73(2): 404-424.
- [16] SONG X Y, ZHOU M F, WANG C Y, et al. Role of Crustal Contamination in Formation of the Jinchuan Intrusion and Its World-class Ni-Cu-(PGE) Sulfide Deposit, Northwest China [J]. International Geological Review, 2006, 48(12): 1113-1132.
- [17] 甘肃省地质矿产勘查开发局第六地质队. 白家咀子硫化铜镍矿床地质[M]. 北京: 地质出版社, 1984.
- The Sixth Geological Team of Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development. Geology of the Baijiaozuizi Cu-Ni Sulfide Deposit [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984.
- [18] ZHANG M J, KAMO S L, LI C S, et al. Precise U-Pb Zircon-baddeleyite Age of the Jinchuan Sulfide Ore-bearing Ultramafic Intrusion, Western China [J]. Mineralium Deposita, 2010, 45(1): 3-9.
- [19] TANG Z L, SONG X Y, SU S G. Ni-Cu Deposits Related to High-Mg Basaltic Magma, Jinchuan, Western China [M] // LI C S, RIPLEY E M. New Developments in Magmatic Ni-Cu and PGE Deposits. Beijing: Geological Publishing House, 2009: 121-140.
- [20] 李士彬, 宋谢炎, 胡瑞忠, 等. 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, 2007, 23(10): 2553-2560.
- LI Shi-bin, SONG Xie-yan, HU Rui-zhong, et al. Pet-

- rographic Features of Segment II of the Jinchuan Intrusion, Gansu, and Its Fractional Crystallization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(10): 2553-2560.
- [21] NALDRETT A J. Magmatic Sulphide Deposit: Geology, Geochemistry, and Exploration[M]. New York: Springer, 2004.
- [22] LONG T M, SONG X Y, KANG J, et al. Genesis of No. 2 Orebody of the Jinchuan Magmatic Ni-Cu (PGE) Sulfide Deposit, NW China: New Constraints from the Newly Discovered Deep Extension[J]. *Mineralium Deposita*, 2023, 58: 1317-1332.
- [23] 焦建刚, 汤中立, 闫海卿, 等. 金川铜镍硫化物矿床中富铜矿石铂族元素特征及矿床成因[J]. *西北地质*, 2012, 45(4): 242-253.
- JIAO Jian-gang, TANG Zhong-li, YAN Hai-qing, et al. PGE Characteristics of Cu-rich Ores in the Jinchuan Cu-Ni Sulfide Deposit and Its Genesis[J]. *Northwestern Geology*, 2012, 45(4): 242-253.
- [24] DUAN J, LI C S, QIAN Z Z, et al. 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[J]. *Mineralium Deposita*, 2016, 51(4): 557-574.
- [25] SU S G, LI C S, ZHOU M F, et al. Controls on Variations of Platinum-group Element Concentrations in the Sulfide Ores of the Jinchuan Ni-Cu Deposit, Western China[J]. *Mineralium Deposita*, 2008, 43(6): 609-622.
- [26] TONNELIER N J. Geology and Genesis of The Jinchuan Ni-Cu-(PGE) Deposit, China [D]. Sudbury: Laurentian University, 2010.
- [27] 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): 153-163.
- SONG Xie-yan, XIAO Jia-fei, ZHU Dan, et al. New Insights on the Formation of Magmatic Sulfide Deposits in Magma Conduit System[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(1): 153-163.
- [28] LIGHTFOOT P C, KEAYS R R, EVANS-LAMSWOOD D, et al. 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*, 2012, 47: 23-50.
- [29] SONG X Y, DENG Y F, XIE W, et al. Prolonged Basaltic Magmatism and Short-lived Magmatic Sulfide Mineralization in Orogenic Belts [J]. *Lithos*, 2021, 390/391: 106114.
- [30] DENG Y F, SONG X Y, XIE W, et al. The Role of External Sulfur in Triggering Sulfide Immiscibility at Depth: Evidence from the Huangshan-Jing'erquan Ni-Cu Metallogenic Belt, NW China[J]. *Economic Geology*, 2022, 117(8): 1867-1879.
- [31] 宋谢炎, 邓宇峰, 颜 炜, 等. 新疆黄山—镜儿泉铜镍硫化物成矿带岩浆通道成矿特征及其找矿意义[J]. *矿床地质*, 2022, 41(6): 1108-1123.
- SONG Xie-yan, DENG Yu-feng, XIE Wei, et al. Ore-forming Processes in Magma Plumbing Systems and Significances for Prospecting of Huangshan-Jing'erquan Ni-Cu Sulfide Metallogenic Belt, Xinjiang, NW China[J]. *Mineral Deposits*, 2022, 41(6): 1108-1123.
- [32] 苏尚国, 汤中立, 周 岱. 金川含矿超镁铁岩侵入体侵位序列[J]. *地学前缘*, 2010, 17(2): 118-126.
- SU Shang-guo, TANG Zhong-li, ZHOU Dai. Emplacement Sequence in the Jinchuan Sulfide Ore-bearing Ultramafic Intrusion, Western China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(2): 118-126.
- [33] 闫海卿, 王 强, 胡彦强, 等. 金川铜镍硫化物岩浆矿床前锋岩浆与岩浆通道[J]. *中国地质*, 2013, 40(3): 807-819.
- YAN Hai-qing, WANG Qiang, HU Yan-qiang, et al. Striker Magma and Magma Channel in the Jinchuan Copper-nickel Sulfide Magmatic Deposit[J]. *Geology in China*, 2013, 40(3): 807-819.
- [34] SAUMUR B M, CRUDEN A R, BOUTELIER D. Sulfide Liquid Entrainment by Silicate Magma: Implications for the Dynamics and Petrogenesis of Magmatic Sulfide Deposits [J]. *Journal of Petrology*, 2016, 56(12): 2473-2490.
- [35] 宋谢炎, 胡瑞忠, 陈列锰. 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 Xie-yan, HU Rui-zhong, CHEN Lie-meng. Geochemical Natures of Copper, Nickel and PGE and Their Significance for the Study of Origin and Evolution of Mantle-derived Magmas and Magmatic Sulfide Deposits [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(4): 287-305.