



引文格式: 刘庭伟, 陈国旭, 邓宇峰, 等. 东天山黄山西铜镍硫化物矿床三维模型及其成矿启示[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 131–145. DOI: 10.12401/j.nwg.2025029

Citation: LIU Tingwei, CHEN Guoxu, DENG Yufeng, et al. Three-Dimensional Model of the Huangshanxi Ni-Cu Sulfide Deposit and Its Implications for Mineralization, Eastern Tianshan, NW China[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 131–145. DOI: 10.12401/j.nwg.2025029

东天山黄山西铜镍硫化物矿床三维模型及其成矿启示

刘庭伟^{1,2}, 陈国旭^{1,2}, 邓宇峰^{1,2,*}, 李卫东³, 韩建军⁴, 谭治雄³

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省战略性矿产资源深部探测与评价利用重点实验室, 安徽 合肥 230009; 3. 新疆维吾尔自治区地质局哈密地质大队, 新疆 哈密 839099; 4. 青海省地质调查局, 青海 西宁 810001)

摘要: 东天山黄山—镜儿泉成矿带先后发现了一系列岩浆铜镍硫化物矿床, 镍储量超过 100 万 t, 是世界造山带型铜镍矿床最发育的地区之一。黄山西矿床是该区域内的大型岩浆铜镍硫化物矿床, 形成于碰撞造山作用向碰撞后伸展环境, 受区域性韧性剪切带和断裂构造控制; 断裂构造既是岩浆侵位通道, 又是硫化物熔离和聚集的主要空间。笔者基于现有钻孔、勘探线剖面图、中段地质平面图等地质资料, 利用 Surpac 软件建立了黄山西矿床三维地质模型, 根据矿体、岩体与构造的三维空间关系, 以及 Ni 元素富集空间展布规律, 并结合坑内矿石特征探讨了区域构造作用对铜镍矿体的控制作用。研究结果表明: ①黄山西含矿岩体的三维形态受断层影响较大, 近 NEE 向的 F_1 和 F_{10} 逆断层是全区最大断层, 控制着各岩相的形态, 形成了独特的“蝌蚪状”岩体形态和盆状剖面。② 32X 号矿体成岩成矿以后受构造作用叠加使硫化物重新活化并沿着南北断裂再次富集成矿, 矿石蚀变变形现象明显; 30 号矿体虽有一小部分受构造作用而造成硫化物富集, 但其矿化过程未受显著的构造作用影响且蚀变较弱, 缺乏明显的构造改造特征, 总体上为岩浆沿构造侵位后的岩相主导成矿。本研究深化了黄山西矿床成岩成矿作用认识, 对东天山地区成矿作用研究提供了新的视角, 可为相似造山带环境下的铜镍矿床成因分析和找矿提供参考。

关键词: 地质学; 岩浆铜镍硫化物矿床; 三维地质建模; 构造控矿; 黄山西

中图分类号: P612; P628

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)04-0131-15

Three-Dimensional Model of the Huangshanxi Ni-Cu Sulfide Deposit and Its Implications for Mineralization, Eastern Tianshan, NW China

LIU Tingwei^{1,2}, CHEN Guoxu^{1,2}, DENG Yufeng^{1,2,*}, LI Weidong³, HAN Jianjun⁴, TAN Zhixiong³

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 2. Anhui Provincial Key Laboratory for Deep Exploration, Evaluation and Utilization of Strategic Mineral Resources, Hefei 230009, Anhui, China; 3. Hami Geological Brigade, Geological Bureau of Xinjiang Uyghur Autonomous Region, Hami 839099, Xinjiang, China; 4. Qinghai Geological Survey, Xining 810001, Qinghai, China)

收稿日期: 2024-12-26; 修回日期: 2025-03-07; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 国家自然科学基金项目(42272083、41972304), 国家重大研发计划项目(2024YFC2909201), 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0708), 温州市科技局基础性公益科研项目(S20240037), 西安市关键金属成矿与高效利用重点实验室(长安大学)开放基金(300102272503)联合资助。

作者简介: 刘庭伟(2000–), 男, 硕士研究生, 从事三维地质建模研究。E-mail: 17640429501@163.com。

* 通讯作者: 邓宇峰(1983–), 男, 教授, 博士生导师, 从事矿物学、岩石学、矿床学研究及教学。E-mail: dyfeng_214@sina.com。

Abstract: A series of magmatic Ni-Cu sulfide deposits have been successively discovered in the Huangshan-Jingerquan mineralization belt in the eastern Tianshan, with nickel reserves exceeding 1 million tons, making it one of the most developed regions for magmatic Ni-Cu sulfide deposits in the orogenic belt. The Huangshanxi deposit is a large magmatic Ni-Cu sulfide deposit in this region, formed during the transition from collisional orogeny to a post-collision extensional environment. Regional ductile shear zones and fault structures controlled the emplacement of the Ni-Cu sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusions. The faults acted as conduits for magma emplacement and provided spaces for sulfide segregation and accumulation. Based on geological data, including drill cores, exploration section maps, and mid-section geological maps, this study constructed a 3D geological model of the Huangshanxi deposit using Surpac software. By analyzing the three-dimensional space of the orebodies, mafic-ultramafic intrusive rocks, and structures, as well as the spatial distribution of Ni and petrographic characteristics of sulfide ores, the role of structure in the formation of Ni-Cu mineralization has been discussed. The main conclusions are as follows: ① The morphology of the Huangshanxi intrusion is significantly influenced by faults. The nearly east-northeast-oriented F1 and F10 reverse faults are the most significant faults in the area and control the morphology of mafic-ultramafic rocks. Leading to a unique "tadpole-shaped" intrusion morphology and a basin-like cross-sectional profile. ② The orebody 32X was overprinted by post-mineralization structure. It was reactivated by tectonic superposition and enriched along the north-south fault. The ore alteration and deformation were apparent. In contrast, the orebody 30, while partially affected by structural processes leading to localized sulfide enrichment, shows limited deformation and weaker alteration. Mafic-ultramafic rocks primarily control the Ni-Cu mineralization after magmatic emplacement along structures. This study advances the understanding of the magmatic and mineralization processes of the Huangshanxi deposit. It provides new insights into the genesis of magmatic Ni-Cu sulfide deposits in the Northern Tianshan. It can serve as a reference for discussing the genesis and exploration of magmatic Ni-Cu sulfide deposits in the orogenic belt.

Keywords: geology; magmatic Ni-Cu sulfide deposits; 3D geological modeling; the role of structure in the formation of Ni-Cu sulfide ores; Huangshanxi

岩浆铜镍硫化物矿床是指与镁铁质-超镁铁质岩浆成矿作用有关的以硫化物为主的矿床(汤中立, 1992; 范育新等, 1999)。黄山西铜镍矿床是东天山地区典型的岩浆铜镍硫化物矿床, 硫化物的聚集成矿与岩浆、构造活动密切相关(汤中立, 1990; Naldrett, 1999; Barnes et al., 2016)。黄山西岩体的“蝌蚪状”岩体形态和盆状的地质剖面, 说明岩体就位与走滑剪切构造存在密切的联系(Branquet et al., 2012; 宋谢炎等, 2018, 2024)。并且黄山西铜镍矿床处于黄山-镜儿泉成矿带, 该成矿带位于区域性深断裂——康古尔断裂的南侧, 为幔源岩浆上升和岩体的形成提供了通道和空间(宋谢炎等, 2018)。因此, 黄山西铜镍矿床也可能受到成矿前断层或其他构造因素的影响。目前, 不同学者对于黄山西矿床的地幔源区特征、多期成岩成矿作用、硫化物熔离与成矿过程等方面做了大量研究(邓宇峰等, 2011; 毛亚晶等, 2014; Deng et al., 2017; 石煜等, 2022)。然而, 前人对于构造作用对于铜

镍成矿的控制作用研究略显不足。因此, 探讨黄山西铜镍矿床的构造特征及其与成矿作用的时空关系, 研究构造与矿体之间的成因联系对于发现深部隐伏矿体显得尤为重要。

进入 21 世纪以来, 随着矿产开采难度的不断加大和计算机信息技术的快速发展, 找矿工作的重点已经从浅部转向深部, 从二维转向三维(裴荣富等, 1990; 赵鹏大等, 2004; 袁峰等, 2019)。三维地质建模是指使用计算机技术, 通过将钻孔数据、地质剖面图数据等地质数据转化为三维数字模型, 以便于更直观、准确地表示地下的地质结构、岩层分布、矿体形态等(陈国旭等, 2015, 2019; 张夏林等, 2020; 张平松等, 2022)。这一技术不仅有效整合了时间与空间的分析, 为深入研究成矿过程提供了新视角, 还为构建成矿模型、找矿模型及开展成矿预测提供了可靠的科学依据(Wang et al., 2012; 毛先成等, 2016; 张巨伟等, 2022; Deng et al., 2022; Li et al., 2023)。

在岩浆通道成矿模型中,成矿岩体本身可以被当作岩浆通道(宋谢炎等,2010)。黄山西矿床由于形成过程涉及多期次、多阶段的岩浆活动及物质富集迁移规律,建立岩浆通道型矿床的三维地质模型能够更加直观地揭示矿床的成因机制,明确控矿因素与岩体和矿体空间分布的关系。因此,笔者利用 Surpac 软件,结合收集到的大量钻孔、勘探线剖面图、各中段平面图等地质数据,以岩浆通道成矿模型为指导,结合前人的研究成果,构建黄山西铜镍硫化物矿床三维地质模型。运用地质统计学的方法对 Ni 品位进行空间插值,探究 Ni 元素的空间品位富集分布,结合各模型之间的三维空间关联,分析黄山西矿床的成岩成矿过程,查明区域构造作用对铜镍矿体的控制作用,从而对黄山-镜儿泉成矿带岩浆通道型矿床成因以及接下来的成矿预测和找矿工作提供一定参考。

1 地质背景

1.1 区域地质概况

中亚造山带(CAOB)位于北部的西伯利亚克拉通与南部的塔里木克拉通和华北克拉通之间,是全球最大的显生代增生型造山带(图 1a)(Jahn, 2004; Xiao et al., 2009; 黄河等, 2024; 吴妍蓉等, 2024)。中国西北中亚造山带南缘由阿尔泰、准噶尔、天山造山带和塔里木地块等构造单元组成(图 1b)。黄山-镜儿泉成矿带处于区域性的康古尔断裂和雅满苏断裂之间,长约 500 km,宽度小于 50 km(图 1c)。区域构造研究表明,黄山-镜儿泉成矿带产于区域性右行走滑构造带上,二叠纪含铜镍硫化物镁铁-超镁铁岩的侵位受到同期走滑剪切作用的控制,区域性剪切作用形成的次一级张性构造为幔源岩浆上升提供了通道,并为岩浆房的形成提供了空间(陈文等, 2005; Branquet et al., 2012; Wang et al., 2014)。在中亚造山带南缘的一系列大、中、小型铜镍矿床中,黄山-镜儿泉成矿带是矿床数量最多、镍的总体储量较大、成矿作用最强烈、地质现象非常丰富的成矿带(宋谢炎等, 2018; 高晓峰等, 2025)。自 20 世纪 80 年代以来,黄山-镜儿泉成矿带先后发现了黄山西、黄山东、黄山南、图拉尔根等 4 处大型铜镍硫化物矿床,两处中型矿床以及一系列小型矿床和矿化岩体(Zhou et al., 2004; Sun et al., 2013; 赵云等, 2016; Song et al., 2021)。最新的地质年代学研究表明,黄山-镜儿泉成矿带的镁铁质-超镁铁岩体

被认为是从 380 Ma 到 270 Ma 形成(三金柱等, 2010; Song et al., 2021)。

1.2 矿床地质特征

黄山西铜镍硫化物矿床又名黄山铜镍硫化物矿床,文中统称为黄山西矿床。黄山西矿床位于康古尔剪切带西段(图 1c),岩体呈现近 EW 向的“蝌蚪状”,EW 长约 3.96 km,最宽处约 800 m,西部“蝌蚪头”部分最宽最大,向东部逐渐收窄直到尖灭(图 2)。黄山西岩体中岩石分异较好,由下至上主要由辉长苏长岩、二辉橄榄岩、辉石岩、苏长辉长岩和角闪辉长岩组成(宋谢炎等, 2022)。黄山西岩体是由不同阶段岩浆侵入形成的复合岩体,共可分为 3 个侵入阶段(王润民等, 1987; Mao et al., 2010; Zhang et al., 2011; 石煜等, 2022)。第一阶段形成二辉橄榄岩岩相,处于岩体顶部;第二阶段形成二辉橄榄岩、辉石岩、苏长辉长岩和辉长岩,从下到上分布于岩体中,各个岩相之间显示渐变过渡的接触关系;第三阶段形成辉长苏长岩,分布于岩体底部及外围。研究区构造主要以近 NEE 的逆断层为主, F_1 和 F_{10} 两个逆断层是全矿区范围最大的两个断层(图 2),EW 向构造贯穿矿区,奠定了矿区整体的构造格架(毛亚晶等, 2014)。除 NEE 向的断层外,岩体西南部断层也有多次活动的特点且较为发育(王润民等, 1987; 陈陶成, 1990; 竺国强等, 1996; 路魏魏等, 2008)。

2 研究方法

2.1 三维地质建模

对于黄山西矿床三维形态分析拟采用三维地质建模的方法,基于现有钻孔、勘探线剖面图、中段地质平面图等地质资料,为了突出建模的直观性与准确性,使用 Surpac 软件的人机交互式的显示建模并结合野外地质勘探和地质经验,构建出符合真实形态的岩体、矿体、断层以及品位模型。在进行三维地质建模时,由于受到地质数据分布范围的限制,本次研究的建模范围主要集中于研究区的 114 线至 146 线之间的区域。这一区域的数据相对完整,可以有效地支持模型的构建和精度的控制。为了分析成矿元素的三维空间分布,建立三维地质模型后需要建立矿体的块体模型,使用普通克里格法结合钻孔品位化验数据对矿体品位进行插值。

笔者中黄山西矿床的断层构造的研究数据主要

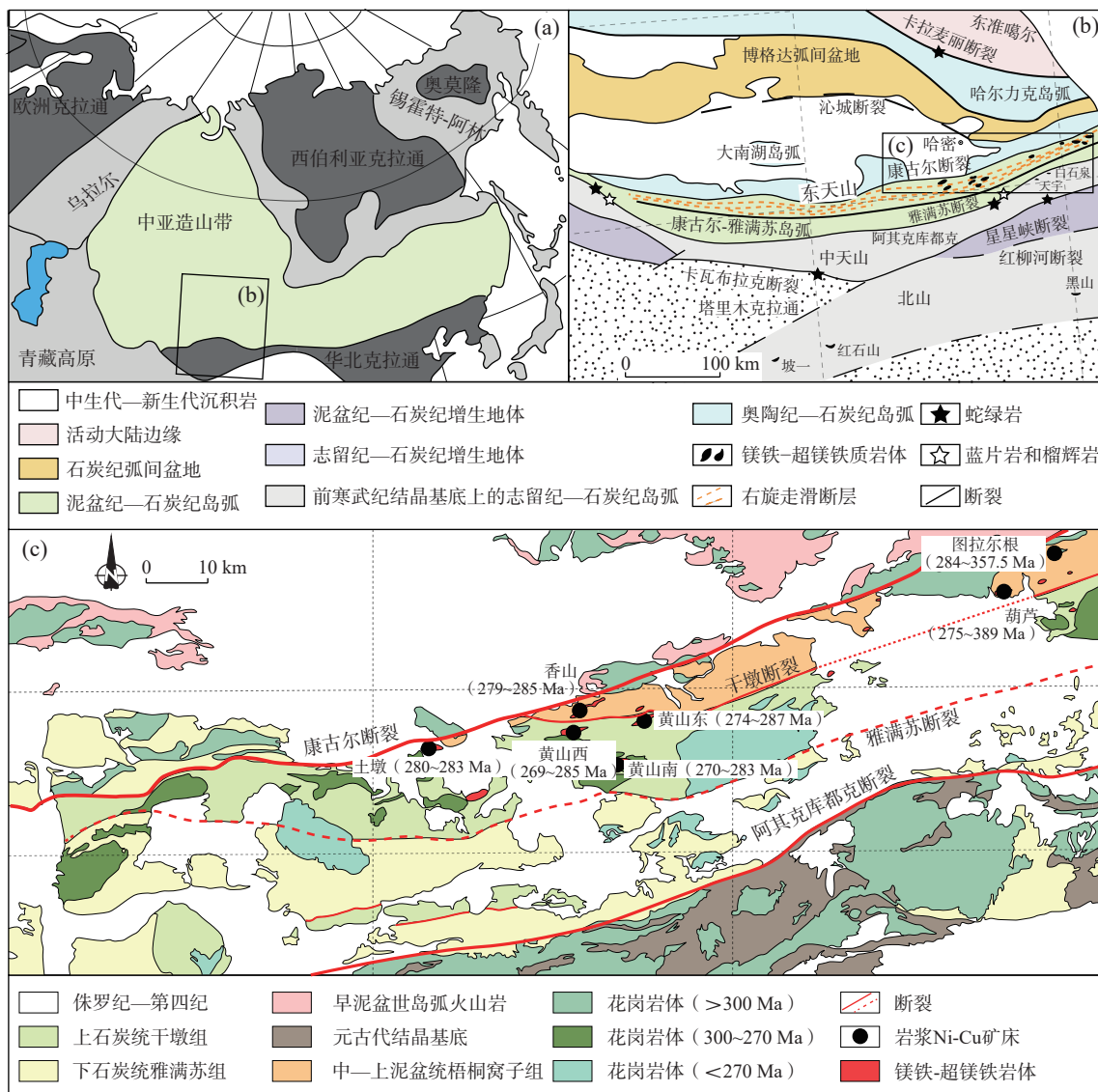


图1 中亚造山带地质简图(a)、东天山地区主要构造单元(b)、黄山-镜儿泉成矿带区域地质简图(c)(据 Jahn et al., 2000; Xiao et al., 2009; Deng et al., 2014; 韦帅, 2021; 曹盛轩等, 2024 修改)

Fig. 1 (a) Location of the Central Asian Orogenic belt, (b) sub-tectonic units in the Eastern Tianshan, and (c) simplified geological map of the Huangshan-Jingerquan mineralization belt

来源于“新疆哈密市黄山铜镍矿补充详查报告”中的勘探剖面图、地质平面图以及前人研究成果,结合钻孔柱状图的岩性特征,建立断层模型。这些柱状图记录了断层活动导致的岩石变形与蚀变特征,揭示了黄山西矿床中部分断层的分布情况。

2.2 空间关系分析

分析黄山西矿床主要断层与岩体、矿体的三维空间位置关系,探究构造对成岩成矿的影响,结合现场采集到的标本对断层控矿进行定性分析。以黄山西矿体模型为基础,采用三维空间分析对断层空间距离特征进行提取,进行构造控矿定量分析。通过获取每

一个矿体的矿化块体空间位置与控矿断层相交线之间的距离分布,可以有效地表征断层对矿体的影响程度,并进一步分析断层面与矿化作用之间的关系。

3 三维地质模型

3.1 断层

3.1.1 断层特征信息提取

构造蚀变岩带是在区域构造应力作用下,由断裂、剪切和变形等构造活动导致岩石发生蚀变作用形成的(朱光等, 2006; 胡继春等, 2017)。钻孔柱状图中糜棱

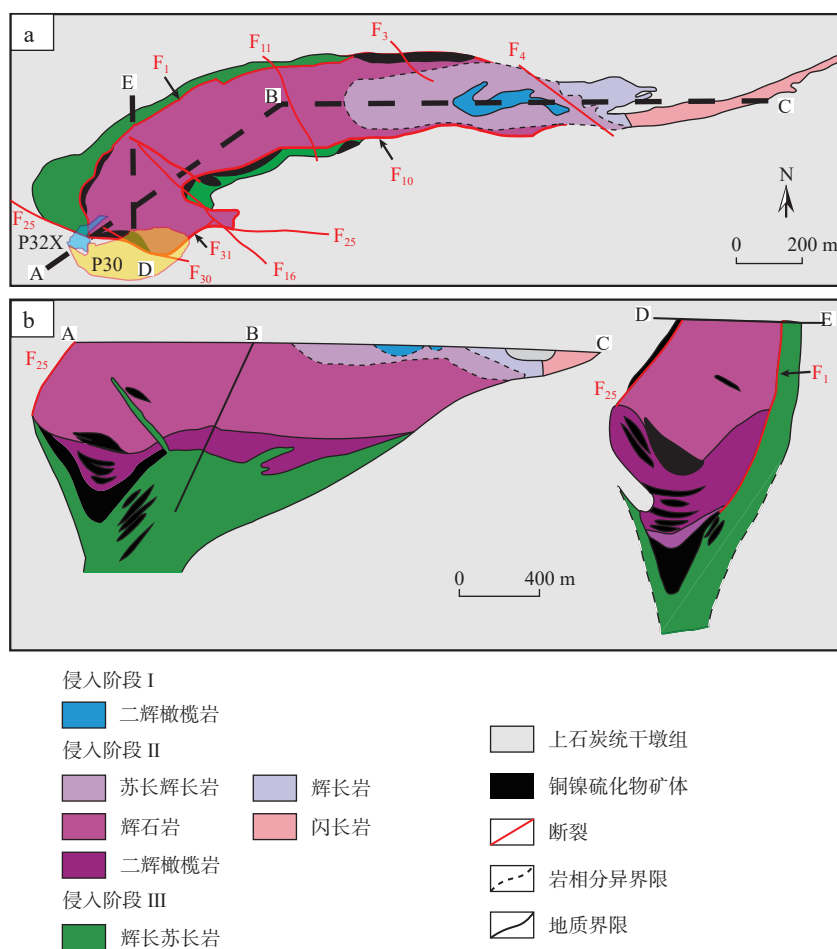


图2 黄山西矿床简化地质图(a)及剖面图(b)(据李德惠等, 1989; 王润民, 1987 修改)

Fig. 2 (a)Simplified geological map and(b) cross sections of the Huangshanxi deposit

岩化、绿泥石化、滑石化等蚀变特征是断层活动的重要标志。本研究分析了黄山西矿床钻孔数据、地质图揭示的断层破碎带信息等多源数据, 对这些信息进行了综合处理用于三维建模, 初步构建了断层的三维模型。并选取了4口典型钻孔(HSZK11401、HSZK11605、HSZK11809、HSZK12207)作为实例分析演示, 用于展示断层位置和构造蚀变特征(图3)。

HSZK11401 钻孔 0~253 m 为细碧玢岩与石英角斑岩互层, 岩石普遍已绿泥石化, 并因挤压作用出现揉皱、裂隙及片理发育。下伏 253~256 m 的绿泥-滑石千糜岩与上部岩石呈断层接触, 表明了断层活动的影响。此外, 该钻孔在 671~696 m 深度, 岩石发生明显的糜棱岩化, 显示断层活动对岩石的改造作用十分强烈; 类似的蚀变特征也出现在 HSZK11605 钻孔中, 192~338 m 深度范围内的岩石蚀变显著, 橄榄石几乎完全被滑石和菱美矿取代, 辉石则被纤闪石化代替。800 m 以下局部地段岩石因受挤压作用而表现出糜棱

岩化特征; 在 HSZK11809 钻孔中, 42~249 m 深度的细碧玢岩因断层活动导致显著糜棱岩化, 呈现出平行定向排列的糜棱结构, 732~907 m 深度的细碧玢岩与石英角斑岩互层进一步记录了断裂构造的活动轨迹; HSZK12207 钻孔从 0~411 m 深度的细碧玢岩与石英角斑岩互层自上而下呈现不同程度的糜棱岩化, 下伏 411~442 m 的二辉橄榄岩蚀变强烈, 尤其在 417~419 m 岩石因受挤压破裂而转变为绿泥-滑石片岩。

3.1.2 断层模型

黄山西矿床各断层模型如图4所示, 岩体北缘向南倾 F_1 逆断层和岩体南缘向北倾的 F_{10} 逆断层, 由 SN 挤压作用下形成一组 X 型由 SN 向中间对冲的共轭断层, 其相交线与岩体长轴平行, 贯穿整个矿区, 随岩相带的弧形转折而转折。并且由于黄山韧性剪切带具有多期次且力学性质不同的活动, 因此在黄山西杂岩体西端 F_1 与 F_{10} 两韧性剪切带上也有多期活动, WN 向的断层(F_{11} 、 F_3 、 F_4 等)对两断层以及岩体进行

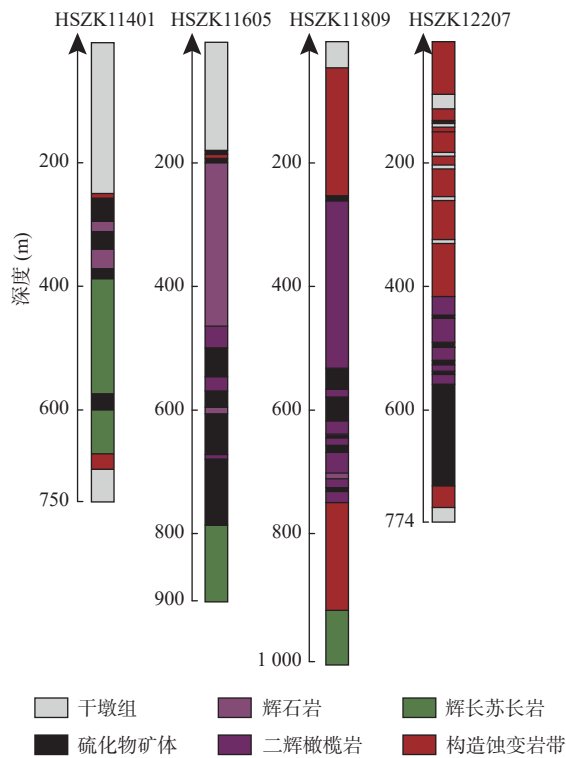


图3 黄山西矿床典型钻孔柱状图(据路魏魏, 2008 修改)

Fig. 3 Simplified cross section of typical borehole of the Huangshanxi deposit

切割(竺国强等, 1996; 毛亚晶等, 2014)。F₂₅ 断层位于研究区西南侧, 规模较大, 与 F₁₆、F₃₀、F₃₁ 等断层同样

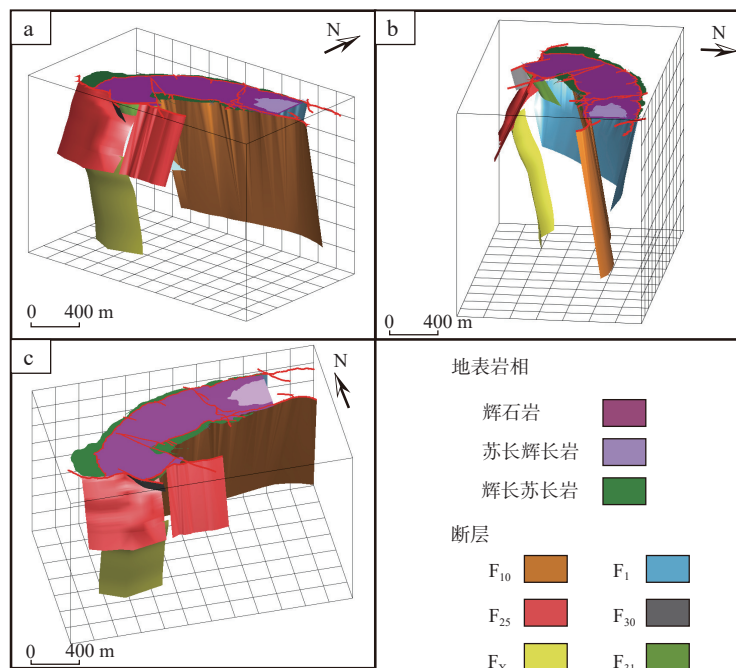
表现出明显的相互切割与叠覆关系, 显示了多次构造活动的叠加。

除地表出露的断层外, 岩体西南部存在隐伏的断层, 在矿区各中段地质平面图中, 断层 F_x 为不出露地表的深部隐伏断层, 主要分布在 30 号矿体下盘, 并且矿体紧贴断裂面, 形成一个向北倾的断层, 倾角 60°到 80°, 控制着南部岩相以及矿体的分布。岩体边缘接触带及内部不同阶段的侵入接触带, 由于构造活动的叠加而发生绿泥石、滑石片理化(王润民等, 1987)。

3.2 岩相模型

由于黄山西矿床的绝大部分矿体都赋存在的辉石岩、二辉橄榄岩及辉长苏长岩中, 且可获取的数据资料有限, 所以笔者构建的岩相模型主要集中在 114~146 线的区域。为了反映矿体赋存条件和岩相空间关系, 进而为研究黄山西矿床的成岩成矿过程提供指导, 笔者在该区域内按照从浅到深的顺序, 依次对辉石岩、二辉橄榄岩和辉长苏长岩进行建模。

辉石岩: 黄山西铜镍矿床的浅部主要为辉石岩(图 5a), 该岩体延伸到岩体西部轴向略向西南偏转, 除南部外均与辉长苏长岩体呈断层或侵入接触。东部始见于 114 线, 底界向东逐渐降低, 直至 122 线达到最低深度 850 m, 随后继续向东逐渐升高至东部 146 线的 490 m, 岩性剖面呈盆状。



a、b、c各断层不同视角

图4 黄山西矿床断层三维模型图

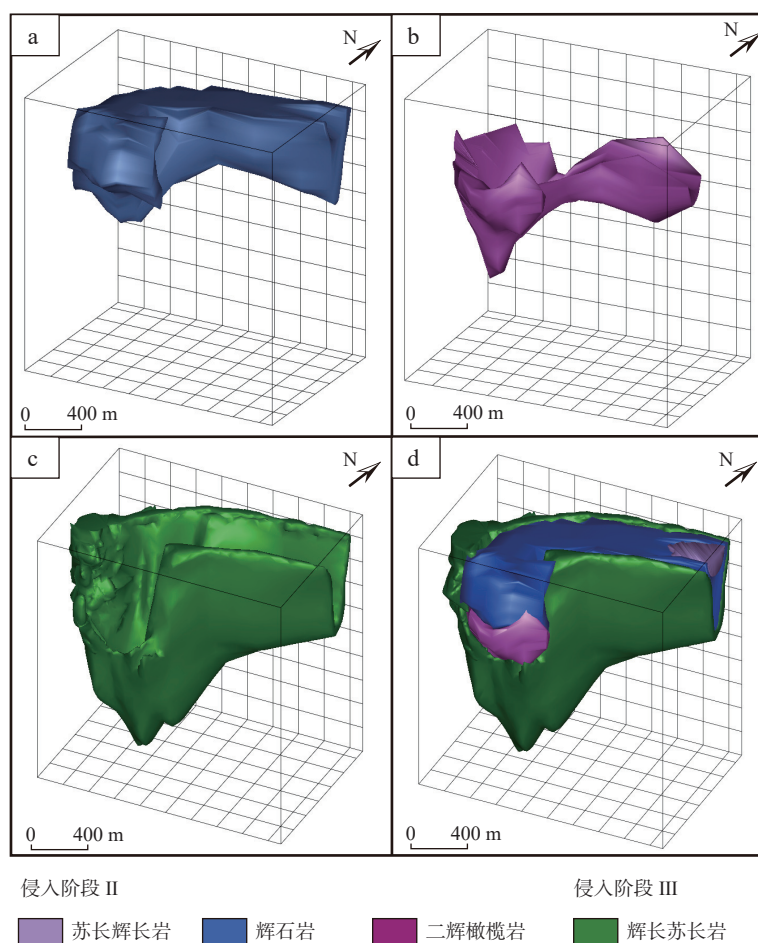
Fig. 4 3D Model of faults in the Huangshanxi deposit

二辉橄榄岩: 二辉橄榄岩相(图5b)是地表不见出露的盲岩相, 主要分布在辉石岩下, 与辉石岩相呈逐渐过渡相变关系, 同时是矿体主要赋存的岩性, 大、中规模矿体基本都赋存在二辉橄榄岩中。其岩相形态与辉石岩大致相同, 西部始见于114线, 底界最深处在122线, 深度约为940 m, 向西逐渐升高, 最厚处在136线, 约为330 m, 岩相剖面形态亦呈向形盆状。辉石岩与二辉橄榄岩就地分异作用进行得较为彻底, 形成了连续的岩相序列, 基性程度由上而下逐渐增高。

辉长苏长岩: 辉长苏长岩(图5c)分布于主岩体外缘, “蝌蚪头”南部的辉长苏长岩未在地表出露。该岩相西部出露面积最大, 又西向东出露宽度逐渐减小。144线附近由于断裂与主岩体不同岩相呈侵入接触, 在122~126号勘查线间, 沿断裂呈脉状穿插到主岩体内, 并且岩体的主要部分被辉长苏长岩体包底。

3.3 矿体模型

黄山西铜镍矿区内共圈定矿体91个(图6), 均呈隐伏状产出, 主要分布于矿区西南部114~126号勘查线之间的岩体膨大部位。最具有经济价值的矿体位于二辉橄榄岩和辉石岩相的底部。其中, 30号矿体为规模最大的主矿体, 金属储量为22.9万t, 占总资源量的45.6%, 呈规则的似层状、盆状, 埋深500 m以下, 最大延伸达1 214 m; 32X号矿体为南北走向矿体, 位于30号矿体的西边。其地表投影图沿着 F_1 逆断层由南向北展布, 与东西展布的30、31号矿体大致形成直角(图2a); 30-2号矿体分布于30号矿体下部, 赋存于二辉橄榄岩下部, 矿体东西长400 m, 118线见延伸最大并且厚度最大, 向东向西有所减薄, 矿体整体呈盆状。除30号矿体外的小型矿体(30-2号、31号、32X号)金属储量分别为13.7、3.3、2.9万t, 占总资源量的39.7%, 分布于主矿体周边, 形态以透镜状为主; 小型



a. 辉石岩; b. 二辉橄榄岩; c. 辉长苏长岩; d. 全部岩性

图5 黄山西矿床各岩性三维模型图

Fig. 5 3D Model of lithology of the Huangshanxi deposit

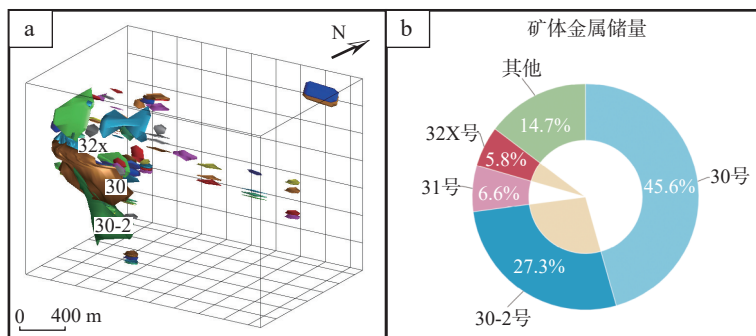


图6 黄山西矿床矿体三维模型(a)及矿体金属储量统计图(b)

Fig. 6 (a)3D orebody model and (b)statistical chart of metal reserves of Huangshanxi deposit

矿体占总资源量的14.7%，多呈脉状或零星分布。

4 讨论

4.1 断层与岩体空间关系

天山地区在晚石炭纪—早二叠世经历了由碰撞造山向后碰撞伸展环境的转变,这与黄山西镁铁—超镁铁岩体的形成年代(280~284 Ma)一致,这表明黄山西岩体的形成受后碰撞伸展背景的直接影响(顾连兴等, 2007; 周涛发等, 2010; Song et al., 2021; 张海迪等, 2021; Xie et al., 2022)。由于矿床中矿体主要受超镁铁岩控制,笔者主要探讨控岩断层与超镁铁岩的空间关系。黄山西矿床中超镁铁岩主要沿 F_1 、 F_{10} 断层分布,呈现出明显的构造控制特征,这两个断层控制了岩体的空间展布与分布(图7)。并且 F_1 、 F_{10} 两个深部相交的共轭逆断层为高通量岩浆流动创造了有利的条件,是岩浆上涌的重要通道。岩浆在浅部岩浆房沿着断层进行多期次岩浆上侵,并伴随区域性右旋走滑剪切作用。多期次岩浆上侵活动与区域性的右旋走滑剪切作用紧密相伴同步发生,使得岩体具有独特的“蝌蚪状”形态和盆状纵剖面(Branquet et al., 2012; 宋谢炎等, 2018)。

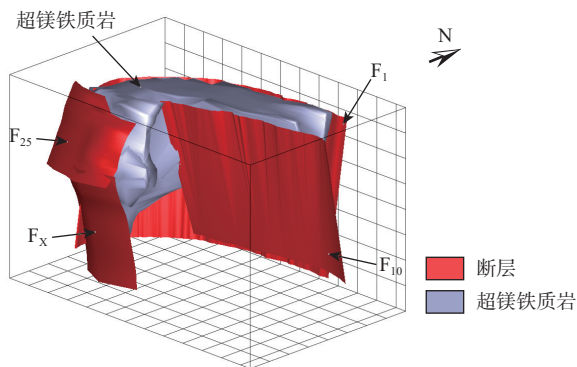


图7 黄山西矿床岩性与断层空间关系图

Fig. 7 Spatial relationship between lithology and fault of the Huangshanxi deposit

蚪状”形态和盆状纵剖面(Branquet et al., 2012; 宋谢炎等, 2018)。

4.2 矿体与岩性空间关系

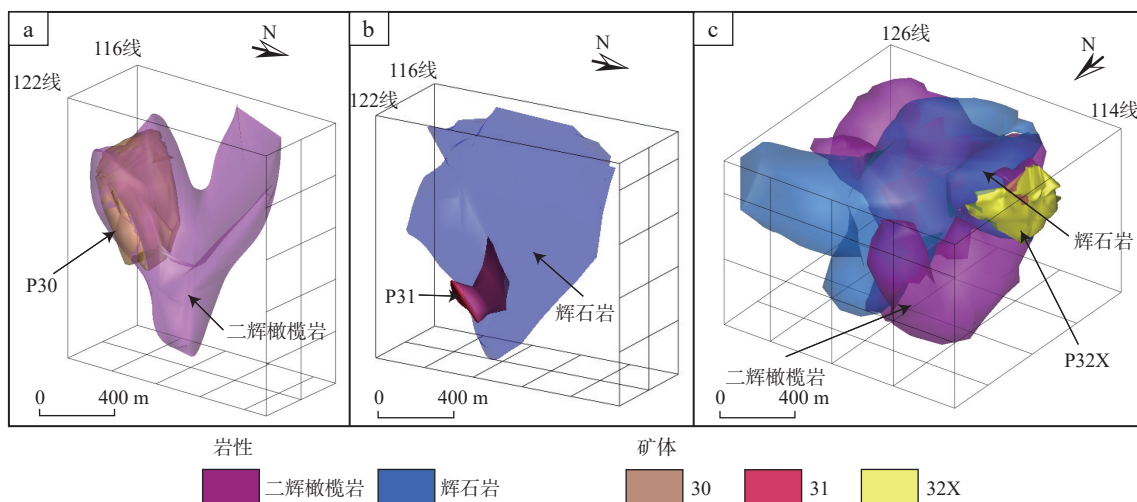
矿体与岩性的空间关系是研究矿床形成和赋存的重要内容之一,镁铁质—超镁铁质岩分异相对充分,形成了多样的岩相类型(刘伟栋等, 2024)。在黄山—镜儿泉成矿带中,成矿元素富集对岩相具有明显的选择性,铜镍硫化物矿体主要赋存于超镁铁质岩相中(秦克章等, 2012; 宋谢炎等, 2018)。

随着赋矿岩体的基性程度的增加,有用元素Cu、Ni、Co的含量也随着升高。例如,最大的30号矿体主要赋存在二辉橄榄岩体转折膨大处(图8a),平均Cu、Ni、Co品位分别为0.3%、0.46%、0.026%;31号矿体分布于二辉橄榄岩上部,辉石岩下部(图8b),平均Cu、Ni、Co品位分别为0.28%、0.44%、0.031%;但32X号矿体呈现出穿插在3种不同的岩相中的特征(图8c),且有用元素含量也偏高,平均Cu、Ni、Co品位达到了0.35%、0.53%、0.029%。

4.3 成矿元素富集特征

30号和32X号矿体金属储量分别为22.9万t、2.9万t,具有较大的经济价值,并且具有Ni储量大、平均品位较高和具有较显著的空间特性的特点,所以本节选取这两个典型矿体进行探讨。由于两矿体的控矿钻孔数目不同,得到的Ni元素地球化学数据分布频率具有差异,为了能对两个矿体的镍元素品位分布特征进行比较,需使用相对频率密度直方图(图9)以消除钻孔数量差异带来的影响。

30号矿体的Ni品位集中在较低的范围(0.3~0.5),且分布尖锐,显示其品位较集中,变异性较小,意味着30号矿体的镍品位比较稳定。而32X号矿体的Ni品位分布较为分散,在0.3~0.8之间有较为平缓的分布,且右尾相对较长,说明存在一些高品位区,变异



a. 二辉橄榄岩与30号矿体; b. 辉石岩与31号矿体; c. 辉石岩、二辉橄榄岩与32X号矿体

图8 黄山西矿床主要矿体与岩性空间关系图

Fig. 8 Spatial relationship between the main orebodies and lithology of the Huangshanxi deposit

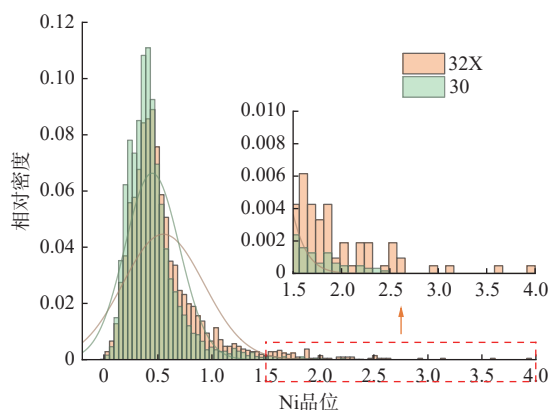


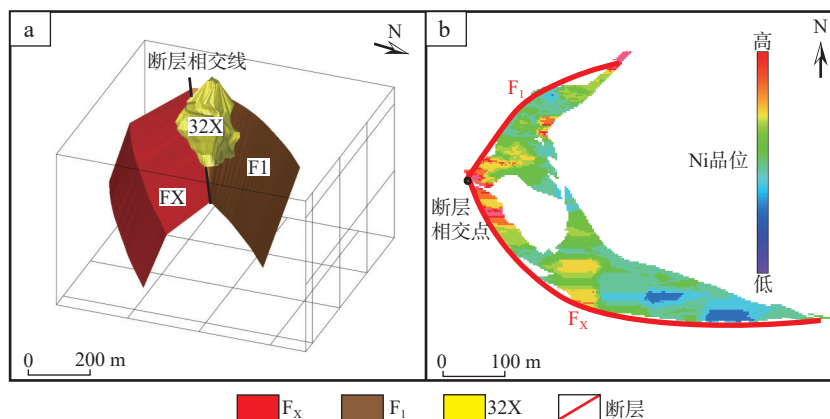
图9 黄山西矿床30号、32X号矿体品位相对密度直方图

Fig. 9 Grade-density histogram of orebody 30 and orebody 32X in the Huangshanxi deposit

性较大, 这可能表明32X号矿体的品位分布不均匀, 部分区域的矿石含有更高的金属含量, 并且该矿体在2.5到4.0区间显示出更高的相对密度, 即32X号矿体拥有更高比例的高品位矿石。

通过将30、32X号矿体的矿体模型与断层模型的空间关系分析(图10a)。矿体的空间位置与断层走向、断层交汇点具有高度的吻合性, 特别是在断层 F_1 、 F_x 交汇点附近, 矿化强度显著增强(图10b)。

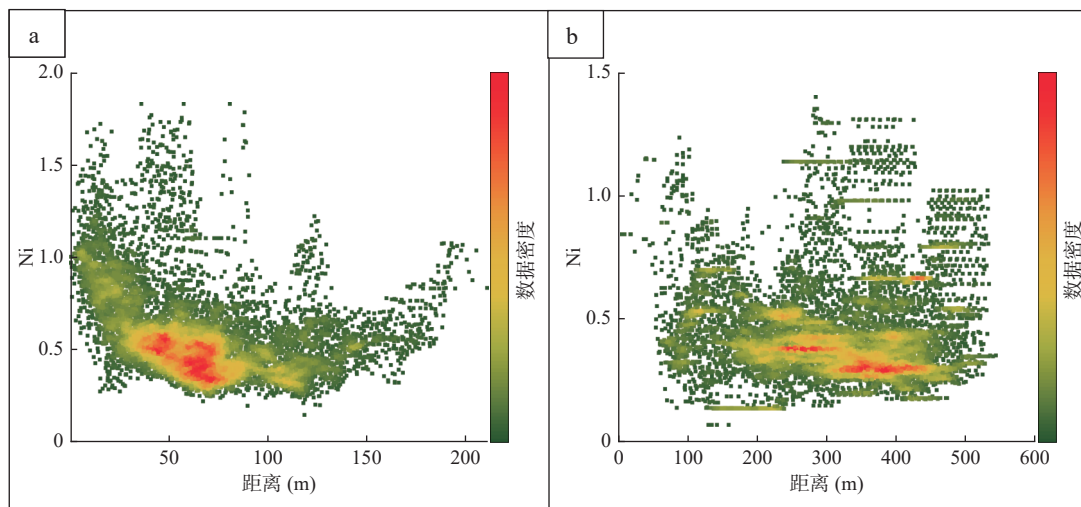
30、32X号两个矿体断层相交线距离指标的矿化定位密度散点图可以表达矿体中各品位块体距离 F_1 与 F_x 断层相交线的距离。30号矿体(图11a)的品位分布与相交线的距离关系并不明显。在距离相交线较近的区域虽然存在一些高品位点, 但总体上高品位



a. 30、32X号矿体与 F_1 、 F_x 断层空间位置; b. 30、32X矿体500 m中段平面金属品位

图10 黄山西矿床矿体与断层空间关系图

Fig. 10 Spatial relationship between the orebodies and faults of the Huangshanxi deposit



a.30 号矿体; b.32X 号矿体

图11 30号与32X号矿体品位到断层相交线距离密度散点图

Fig. 11 Scatter plot of grade - fault intersection distance density for orebody 30 and orebody 32X

区域较为分散,且没有显示出与相交线的明确对应关系。相比之下32X号矿体(图11b)的Ni品位在距离断层相交线较近的区域表现出明显的富集,尤其在距离0~100 m范围内形成了较为密集的高品位区域。断层相交处由于应力集中导致裂隙张开和剪切,会在岩体内部形成局部低压和高渗透性的地质环境,随着温度、压力和流体混合比例等因素的变化,会影响硫化物的沉淀形成再富集现象(Su et al., 2005; Saumur et al., 2017; Falkenberg et al., 2021; 郑旭阳等, 2023)。

此外,品位密度随高程的变化也可以显示矿体的成矿特点。30号矿体(图12a)Ni品位存在多段重复性变化,490 m、350 m、240 m区域品位明显增高,表现为多个密度较高的条带状区域。此外,矿体底部高程150 m区域最低品位和平均品位与其他区域相比有增加的现象,高品位矿体更多。毛亚晶(2014)根据橄榄石与辉石头的成分变化、剖面上金属元素含量变化表明了30号矿体受到过多次新鲜的岩浆补给。32X号矿体(图12b)Ni品位的分布相对更均匀,没有明显的突然变化,且在整个高度范围内都有广泛的Ni含量分布。

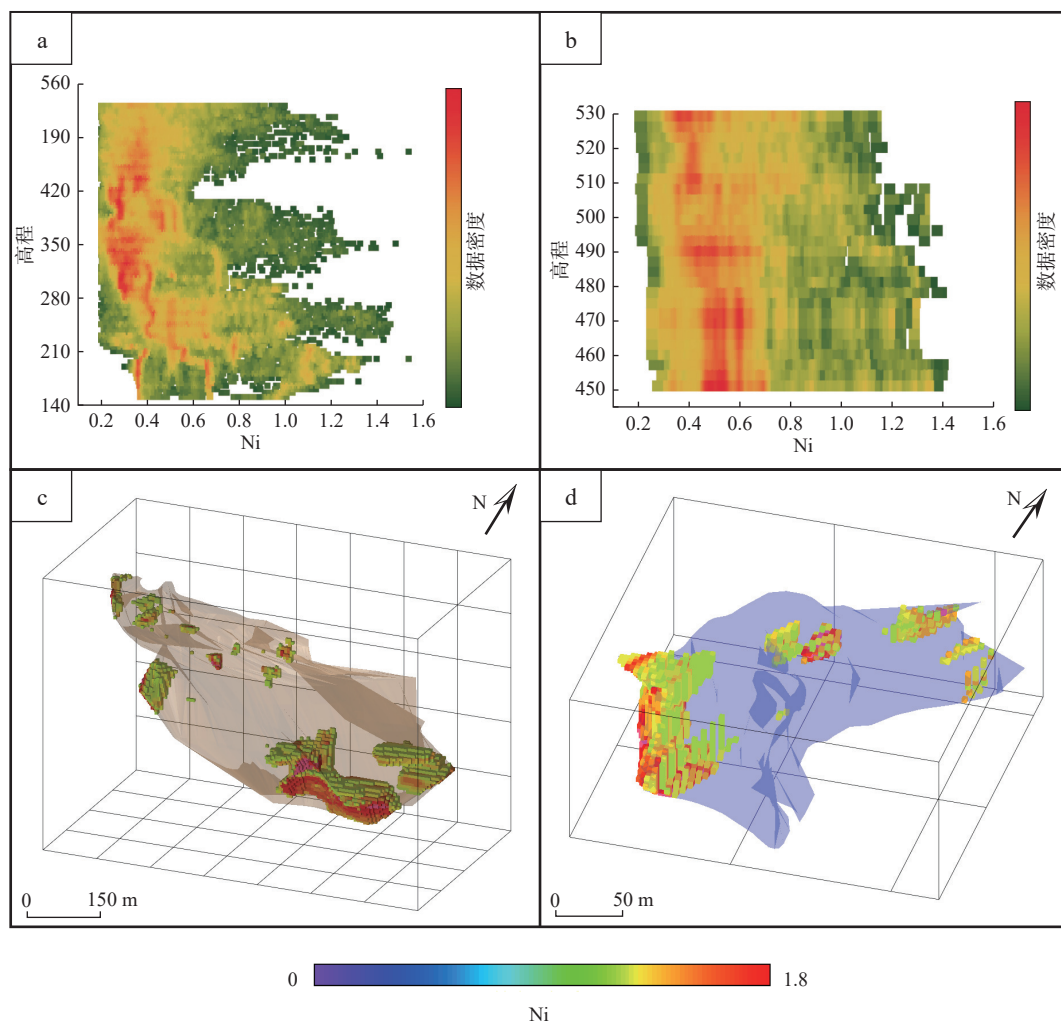
为更直观地展示高品位矿体的空间分布特征,提取两矿体高品位(Ni>1)部分并构建三维块体模型。30号矿体(图12c)高品位矿化单元大多在矿体下部,具有品位垂直分带特征,主要表现为随着高程的降低,品位增大;32X号矿体(图12d)高品位矿化单元则主要分布于矿体西南部,90.3%的高品位矿化单元分布在断层相交线50 m缓冲区内,品位随着高程的降低

而升高的现象不明显。

此外,坑道内的矿石特征也可以反映矿体与构造之间的关系,本次研究矿石来源于黄山西矿床470分层坑道内。其中30号矿体(图13a、图13b、图13e)主要表现为滑石化蚀变,辉石晶体大部分保持原有晶形结构,局部出现边缘蚀变或晶体裂隙发育的特征,呈现典型的浸染状矿化,硫化物呈现出星点状较均匀地分布于整个矿石中,并且蚀变较弱,硫化物是在一个相对稳定、且岩性条件适宜的环境中逐渐沉淀下来的;与30号矿体的情况相对,32X号矿体(图13c、图13d、图13f)则表现出明显的后期构造改造特征,受到明显蛇纹石化蚀变,辉石残晶呈破碎状,颗粒边缘碎裂;矿石类型以团块状-网脉状为主。硫化物在矿石中呈现出无定向、杂乱的分布特征,出现局部富集的现象。矿石中还存在强烈的蚀变和变形现象,反映了断裂活动导致的成矿物质集中和重新活化再富集过程。

4.4 成矿过程

综上所述,30号矿体与32X号矿体具有较大的差异:30号矿体位于二辉橄榄岩底部,整体Ni品位分布集中;与断层相交线距离关系不明显;高品位矿化单元多在矿体下部富集,随高程降低品位增大;矿石蚀变弱,呈浸染状。32X号矿体则穿插在辉石岩、二辉橄榄岩与辉长苏长岩中;Ni品位分布较分散,高品位矿石比例更高,在断层相交线区域明显富集;高品位矿化单元主要在矿体西南部分布,90.3%在断层相交线50 m缓冲区内,品位随高程降低升高现象不明显;矿石蚀变和变形现象强烈,有明显后期构造改造特征,



a、c.30号矿体; b、d.32X号矿体

图12 30号与32X号矿体高程-品位密度散点图与高品位矿体三维块体模型

Fig. 12 Elevation-Grade density scatter plot of orebody 30 & orebody 32X and High-Grade orebody 3D block model

矿石类型以团块状-网脉状为主,硫化物无定向、杂乱分布,有局部富集。通过对两矿体在赋存位置、品位分布、矿石蚀变等方面的差异分析,可以分别总结出矿体的成矿过程:

30号矿体属于岩相控制型矿体,是岩浆通过构造侵位后硫化物冷却结晶形成的。30号矿体赋存于二辉橄榄岩相转折膨大处,且矿体底部有大量高品位矿体,虽然有少部分断层相交处的矿体由于构造作用造成Ni品位升高,但总体上还是受重力分异作用控制。同时30号矿体从上到下Ni品位存在多次重复性变化,指示了存在多次的岩浆补给。30号矿体的坑道内矿石特征符合重力分异型矿体的特点,无明显蚀变,硫化物呈点状分布。

32X号矿体属于构造改造型矿体,早期岩浆侵位受控于区域构造格局,岩浆沿着构造侵位并冷却结晶,

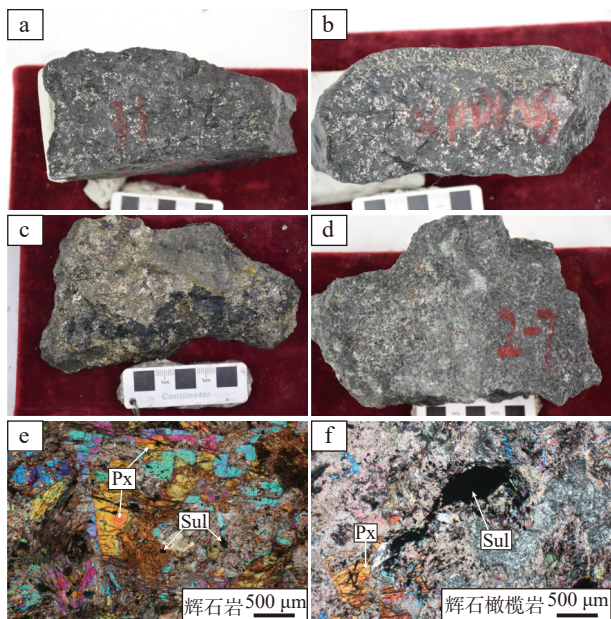
形成浸染状矿化。随后,受区域地质演化的影响,SN向断层的活动不断叠加到早期矿化之上,改变了岩体部分区域的物理条件,硫化物重新活化并沿着SN向的F1断层沉淀与再富集成矿。

4.5 找矿启示

(1)黄山-镜儿泉成矿带中的岩浆铜镍硫化物矿床,大多受区域韧性剪切作用影响,且分布于干墩组和梧桐窝子组。鉴于构造的连续性以及区域岩浆活动的普遍性,该成矿带东部第四纪覆盖区下的地层同样具备形成岩浆铜镍硫化物矿床的有利条件。

(2)黄山西矿区断层众多且存在相互切割关系,构造断裂对成矿影响显著,不可忽视。尤其是断层交汇处,随着构造不断演化,有利于成矿物质集中和重新活化,从而形成类似32X号矿体的矿体。

(3)依据矿体与岩性的空间关系来看:黄山西矿



a、b. 30 号矿体 470 中段坑内样本; c、d. 32X 号矿体 470 中段坑内样本; e. 30 号矿体辉石岩(正交偏光); f. 32X 号矿体辉石橄榄岩中硫化物(正交偏光); Px. 辉石; Sul. 硫化物

图13 黄山西矿床坑内矿石及镜下显微照片

Fig. 13 Ore samples and photomicrographs from the pit of the Huangshanxi deposit

床中, 30 号矿体处于二辉橄榄岩下部岩体转折膨大部位; 30-2 号矿体位于二辉橄榄岩底部区域; 31 号矿体则分布在辉石岩底部与二辉橄榄岩顶部。由此可见, 镁铁-超镁铁岩体底部是探寻矿体的有利地段。

5 结论

(1) 黄山西矿床的岩体三维形态在很大程度上受到区域构造作用的影响, 其形态与构造运动密切相关, 成岩成矿过程由岩浆活动和构造运动共同影响, 各侵入阶段的岩相几乎都沿着断层成岩成矿。

(2) 30 号矿体总体上还是岩浆沿着构造侵位后由岩相主导成矿, 其中部分矿体受到构造作用而造成硫化物富集。

(3) 32X 号矿体的形成在成岩成矿后又叠加了构造成矿作用使得硫化物重新活化, 并随着区域走滑作用的不断发生, 沿着 SN 向的 F_1 断层再次富集成矿。

致谢: 感谢新疆维吾尔自治区地质局哈密地质大队在地质资料与野外工作方面的大力支持与帮助, 感谢论文评审专家提出的宝贵意见。

参考文献(References):

- 曹盛轩, 哈依热提, 邓宇峰, 等. 岩浆铜镍硫化物矿床中地壳硫的深部来源: 来自黄山东矿床的证据[J]. 地质科学, 2024, 59(6): 1588-1602.
- CAO Shengxuan, HAYIRETI, DENG Yufeng, et al. Deep Source of Crustal Sulfur in Magmatic Cu-Ni Sulfide Deposits: Evidence from the Huangshandong Deposit[J]. Chinese Journal of Geology, 2024, 59(6): 1588-1602.
- 陈文, 孙枢, 张彦, 等. 新疆东天山秋格明塔什—黄山韧性剪切带 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究[J]. 地质学报, 2005, 79(6): 790-804.
- CHEN Wen, SUN Shu, ZHANG Yan, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology of the Qiugemingtashi-Huangshan Ductile Shear Zone in East Tianshan, Xinjiang, NW China[J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(6): 790-804.
- 陈陶成. 新疆哈密黄山—镜儿泉铜镍矿带成矿地质背景及矿例介绍[J]. 西北地质, 1990, 23(1): 20-25.
- CHEN Taocheng. Geological Setting of Ore-Forming and Mineral Deposit Samples in Huangshan-Jingerquan Cu-Ni Ore Belt, Hami, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 1990, 23(1): 20-25.
- 陈国旭, 吴冲龙, 张夏林, 等. 基于投影图的矿体三维可视化模型动态构建及资源储量评价[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(4): 740-749.
- CHEN Guoxu, WU Chonglong, ZHANG Xialin, et al. 3D Orebody Dynamic Modeling and Mineral Resources Visualized Evaluating Based on Projection Map[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(4): 740-749.
- 陈国旭, 田宜平, 张夏林, 等. 基于勘探剖面的三维地质模型快速构建及不确定性分析[J]. 地质科技情报, 2019, 38(2): 275-280.
- CHEN Guoxu, TIAN Yiping, ZHANG Xialin, et al. Rapid Construction and Uncertainty Analysis of 3D Geological Models Based on Exploration Sections[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2019, 38(2): 275-280.
- 邓宇峰, 宋谢炎, 陈列锰, 等. 东天山黄山西含铜镍矿镁铁-超镁铁岩体岩浆地幔源区特征研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(12): 3640-3652.
- DENG Yufeng, SONG Xieyan, CHEN Liemeng, et al. Features of The Mantle Source of The Huangshanxi Ni-Cu Sulfide-Bearing Mafic-Ultramafic Intrusion, Eastern Tianshan[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(12): 3640-3652.
- 范育新, 张铭杰. 超大型铜镍硫化物矿床研究进展[J]. 甘肃地质学报, 1999, 15(2): 47-52.
- FAN Yuxin, ZHANG Mingjie. Progress on The Study of Super-Large Cu-Ni Sulfide Deposit[J]. Acta Geologica Gansu, 1999, 15(2): 47-52.
- 高晓峰, 隋清霖, 尤敏鑫, 等. 造山带岩浆铜镍硫化物矿床深部动力学机制探讨[J]. 西北地质, 2025, 58(3): 206-220.

- GAO Xiaofeng, SUI Qinglin, YOU Minxin, et al. Study on Dynamic Mechanism of Magmatic Copper-Nickel Sulfide Deposits in Orogenic Belts[J]. *Northwestern Geology*, 2025, 58(3): 206–220.
- 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 等. 东天山黄山-镜儿泉地区二叠纪地质-成矿-热事件: 幔源岩浆内侵及其地壳效应[J]. *岩石学报*, 2007, 23(11): 2869–2880.
- GU Lianxing, ZHANG Zunzhong, WU Zhichang, et al. Permian geological, metallurgical and geothermal events of the Huangshan-Jing'erquan area, eastern Tianshan: indications for mantle magma intraplating and its effect on the crust[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(11): 2869–2880.
- 胡继春, 陈静, 何书跃, 等. 东昆仑五龙沟地区糜棱岩化花岗岩年代学、岩石成因及其构造意义[J]. *西北地质*, 2017, 50(3): 54–64.
- HU Jichun, CHEN Jing, HE Shuyue, et al. Geochronology and Petrogenesis of Mylonitized Granite from Wulonggou Area in East Kunlun and Its Tectonic Significance[J]. *Northwestern Geology*, 2017, 50(3): 54–64.
- 刘伟栋, 王硕, 魏翔, 等. 小岩体叠加成矿作用在新一轮找矿突破战略行动中的应用: 以勉略宁矿集区为例[J]. *西北地质*, 2024, 57(5): 40–52.
- LIU Weidong, WANG Shuo, WEI Xiang, et al. Application of Superimposed Mineralization of Small Intrusions in the New Round of Prospecting Breakthrough Action: A Case Study of Mian-Lue-Ning Ore Concentration Area[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(5): 40–52.
- 黄河, 王涛, 童英, 等. 中国西天山古生代岩浆岩时空架构、源区特征及构造背景[J]. *西北地质*, 2024, 57(6): 25–43.
- HUANG He, WANG Tao, TONG Ying, et al. Spatial and Temporal Framework, Evolution of Magma Sources, and Tectonic Settings of Paleozoic Magmatic Rocks in West Tianshan, China[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(6): 25–43.
- 李德惠, 包相臣, 张伯南, 等. 黄山铜镍成矿带地质、地球物理和地球化学综合研究及找矿靶区优选报告(国家“305”项目报告)[R]. 成都: 成都理工学院, 1989.
- 路魏魏, 王恒, 任刚, 等. 新疆哈密市黄山铜镍矿补充详查报告[R]. 新疆哈密: 新疆地矿局第六地质大队, 2008.
- 毛亚晶, 秦克章, 唐冬梅, 等. 东天山岩浆铜镍硫化物矿床的多期次岩浆侵位与成矿作用——以黄山铜镍矿床为例[J]. *岩石学报*, 2014, 30(6): 1575–1594.
- MAO Yajing, QIN Kezhang, TANG Dongmei, et al. Multiple Stages of Magma Emplacement and Mineralization of Eastern Tianshan, Xinjiang: Exemplified by The Huangshan Ni-Cu Deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(6): 1575–1594.
- 毛先成, 张苗苗, 邓浩, 等. 矿区深部隐伏矿体三维可视化预测方法[J]. *地质学刊*, 2016, 40(3): 363–371.
- MAO Xiancheng, ZHANG Miaomiao, DENG Hao, et al. Three-Dimensional Visualization Prediction Method for Concealed Ore Bodies in Deep Mining Areas[J]. *Journal of Geology*, 2016, 40(3): 363–371.
- 裴荣富, 吴良士. 在我国开展寻找超大型矿床的若干基础问题研究的讨论[J]. *矿床地质*, 1990, 9(3): 287–289.
- PEI Rongfu, WU Liangshi. Some Problems Concerning Fundamental Researches on The Prospecting for Supergiant Ore Deposits in China[J]. *Mineral Deposits*, 1990, 9(3): 287–289.
- 秦克章, 唐冬梅, 苏本勋, 等. 北疆二叠纪镁铁-超镁铁岩铜、镍矿床的构造背景、岩体类型、基本特征、相对剥蚀程度、含矿性评价标志及成矿潜力分析[J]. *西北地质*, 2012, 45(4): 83–116.
- QIN Kezhang, TANG Dongmei, SU Benxun, et al. The Tectonic Setting, Style, Basic Feature, Relative Erosion Degree, ore-Bearing Evaluation Sign, Potential Analysis of Mineralization of Cu-Ni-Bearing Permian Mafic-ultramafic Complexes, Northern Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 2012, 45(4): 83–116.
- 三金柱, 秦克章, 汤中立, 等. 东天山图拉尔根大型铜镍矿区两个镁铁-超镁铁岩体的锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2010, 26(10): 3027–3033.
- SAN Jinzhu, QIN Kezhang, TANG Zhongli, et al. Precise zircon U-Pb age dating of two mafic-ultramafic complexes at Tulargen large Cu-Ni district and its geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(10): 3027–3033.
- 宋谢炎. 岩浆通道成矿核心内涵“两深一浅一通道”及其找矿意义[J]. *地质学报*, 2024, 98(7): 1941–1952.
- SONG Xieyan. The Core Connotation of Magma Conduit Model “Two Deep, One Shallow and Single Channel” and Its Significances on Exploration[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2024, 98(7): 1941–1952.
- 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 Xieyan, XIAO Jiafei, ZHU Dan, et al. New insights on the formation of magmatic sulfide deposits in magma conduit system[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(1): 153–163.
- 宋谢炎, 邓宇峰, 颜炜, 等. 新疆黄山—镜儿泉铜镍成矿带岩浆作用与区域走滑构造的关系[J]. *地球科学与环境学报*, 2018, 40(5): 505–519.
- SONG Xieyan, DENG Yufeng, XIE Wei, et al. Magmatism of Huangshan-Jing'erquan Ni-Cu Ore Deposit Belt and Relationship with Regional Strike-slip Structure in Xinjiang, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2018, 40(5): 505–519.
- 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 Xieyan, DENG Yufeng, XIE Wei, et al. Ore-forming processes in magma plumbing systems and significances for prospecting of Huangshan-Jingerquan Ni-Cu sulfide metallogenesis

- ic belt, Xinjiang, NW China[J]. Mineral Deposits, 2022, 41(6): 1108–1123.
- 石煜, 王玉往, 王京彬, 等. 东天山黄山东和黄山西铜镍硫化物矿床含矿超镁铁岩的成岩-成矿作用机制: 来自斜长石成分的约束[J]. 地球科学, 2022, 47(9): 3244–3257.
- SHI Yu, WANG Yuwang, WANG Jingbin, et al. Petrogenesis and Metallogenesis Mechanism of the Ore-Bearing Ultramafic Rocks from the Huangshandong and Huangshanxi Ni-Cu Sulfide Deposits, Eastern Tianshan: Constraints from Plagioclase Compositions[J]. Earth Science, 2022, 47(9): 3244–3257.
- 汤中立. 金川硫化铜镍矿床成矿模式[J]. 现代地质, 1990, 4(4): 54–64.
- TANG Zhongli. Minerogenetic Model of the Jinchuan Copper and Nickel Sulfide Deposit[J]. Geoscience, 1990, 4(4): 54–64.
- 汤中立. 超大型岩浆硫化物矿床的类型及地质对比意义[J]. 甘肃地质学报, 1992, (1): 24–47.
- TANG Zhongli. Classification and Geological Contrastable Significance of Super Large Magmatic Sulfide Deposits[J]. Acta Geological Gansu, 1992, (1): 24–47.
- 韦帅. 北天山黄山东铜镍硫化物矿床同化混染作用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- WEI Shuai. Assimilation and contamination of Huangshandong Cu-Ni sulfide deposit in Northern Tianshan[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
- 王润民, 刘德权, 殷定泰. 新疆哈密土墩—黄山一带铜镍硫化物矿床成矿控制条件及找矿方向的研究[J]. 矿物岩石, 1987, (1): 1–178.
- WANG Runmin, LIU Dequan, YIN Dingtai. The Conditions of Controlling Metallogeny of Cu, Ni Sulfide Ore Deposits and the Orientation of Finding Ore, Hami, Xinjiang, China[J]. Miner. Rocks, 1987, (1): 1–178.
- 吴妍蓉, 周海, 赵国春, 等. 中亚造山带南蒙古地区石炭纪—二叠纪岩浆活动及其构造意义[J]. 西北地质, 2024, 57(3): 11–28.
- WU Yanrong, ZHOU Hai, ZHAO Guochun, et al. Carboniferous-Permian Magmatism of Southern Mongolia, Central Asian Orogenic Belt and Its Tectonic Implications[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(3): 11–28.
- 袁峰, 张明明, 李晓晖, 等. 成矿预测: 从二维到三维[J]. 岩石学报, 2019, 35(12): 3863–3874.
- YUAN Feng, ZHANG mingMing, LI Xiaohui, et al. Prospectivity modeling: From two-dimension to three-dimension[J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(12): 3863–3874.
- 赵云, 杨永强, 柯君君. 含铜镍岩浆起源及硫饱和机制: 以新疆黄山南岩浆铜镍硫化物矿床 Sr-Nd-Pb-S 同位素和元素地球化学研究为例[J]. 岩石学报, 2016, 32(7): 2086–2098.
- ZHAO Yun, YANG Yongqiang, KE Junjun. Origin of Cu- and Ni-Bearing Magma and Sulfide Saturation Mechanism: A Case Study of Sr-Nd-Pb-S Isotopic Composition and Element Geochemistry on the Huangshannan Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposit, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(7): 2086–2098.
- 张平松, 李洁, 李圣林, 等. 三维地质建模在煤矿地质可视化中的应用分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(5): 1725–1740.
- ZHANG Pingsong, LI Jie, LI Shenglin, et al. Application Status of 3D Geological Modeling in The Development of Coal Mine Intelligence[J]. Science Technology And Engineering, 2022, 22(5): 1725–1740.
- 张夏林, 吴冲龙, 周琦, 等. 基于勘查大数据和数据集市的锰矿床三维地质建模[J]. 地质科技通报, 2020, 39(4): 12–20.
- ZHANG Xialin, WU Chonglong, ZHOU Qi, et al. Three-Dimensional Geological Modeling of Manganese Deposits Based on Exploration Big Data and Data Market[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(4): 12–20.
- 竺国强, 杨树锋, 陈汉林. 黄山铜镍成矿带构造控岩控矿模式初探[J]. 矿物岩石, 1996, 16(1): 86–93.
- ZHU Guoqiang, YANG Shufeng, CHEN Hanlin. Tectonic Stress Analysis of Huangshan Cu-Ni Metallogenic Belt and Discussion of Structural Controlling Rock and Ore Model[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1996, 16(1): 86–93.
- 张巨伟, 张广纯, 胡玉平, 等. 内蒙古欧布拉格金铜矿区综合地质信息三维找矿模型[J]. 矿产勘查, 2022, 13(7): 1025–1032.
- ZHANG Juwei, ZHANG Guangchun, HU Yuping, et al. Three-Dimensional Prospecting Model of Comprehensive Geo-Information of the Obrag Gold-Copper Deposit, Inner Mongolia[J]. Mineral Exploration, 2022, 13(7): 1025–1032.
- 张海迪, 陈博, 吕鹏瑞, 等. 东天山黄山西角闪辉长岩成因及其地质意义: 来自锆石 U-Pb 年代学及地球化学的证据[J]. 西北地质, 2021, 54(3): 51–65.
- ZHANG Haidi, CHEN Bo, LV Pengrui, et al. The Petrogenesis and Geological Significance of the Hornblende Gabbro in Western Huangshan of East Tianshan: Evidence from Zircon U-Pb Chronology and Geochemistry[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(3): 51–65.
- 周涛发, 袁峰, 张达玉, 等. 新疆东天山觉罗塔格地区花岗岩类年代学、构造背景及其成矿作用研究[J]. 岩石学报, 2010, 26(2): 478–502.
- ZHOU Taofa, YUAN Feng, ZHANG Dayu, et al. Geochronology, Tectonic Setting and Mineralization of Granitoids in Jueluotage Area, Eastern Tianshan, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(2): 478–502.
- 朱光, 徐佑德, 刘国生, 等. 郯庐断裂带中-南段走滑构造特征与变形规律[J]. 地质科学, 2006, 41(2): 226–241.
- ZHU Guang, XU Youde, LIU Guosheng, et al. Structural and Deformational Characteristics of Strike-Slipings Along the

- Middle-Southern Sector of the Tan-Lu Fault Zone[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2006, 41(2): 226–241.
- 赵鹏大, 张寿庭, 陈建平. 危机矿山可接替资源预测评价若干问题探讨[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2004, 31(2): 111–117.
- ZHAO Pengda, ZHANG Shouting, CHEN Jianping. Discussion on prediction and appraisal of replaceable resources of crisis mine[J]. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 2004, 31(2): 111–117.
- 郑旭阳, 毛亚晶, 缪君, 等. 造山带背景铜镍矿床蚀变过程与水的来源——东天山黄山南矿床氢氧同位素的指示[J]. *岩石学报*, 2023, 39(4): 1075–1094.
- ZHENG Xuyang, MAO Yajing, MIAO Jun, et al. Alteration process and water origin of Ni-Cu deposits in orogenic belts: Insights from H and O isotopes of the Huangshannan deposit in East Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023, 39(4): 1075–1094.
- Branquet Y, Gumiaux C, Sizaret S, et al. Synkinematic mafic/ultramafic sheeted intrusions: Emplacement mechanism and strain restoration of the Permian Huangshan Ni-Cu ore belt (Eastern Tianshan, NW China)[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 56: 240–257.
- Barnes S J, Cruden A R, Arndt N T, et al. The mineral system approach applied to magmatic Ni-Cu-PGE sulphide deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 76(6): 296–316.
- Deng Y F, Song X Y, Chen L M, et al. Geochemistry of the Huangshandong Ni-Cu deposit in northwestern China: Implications for the formation of magmatic sulfide mineralization in orogenic belts[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 56: 181–198.
- Deng, Y F, Song X Y, Hollings P, et al. Lithological and geochemical constraints on the magma conduit systems of the Huangshan Ni-Cu sulfide deposit, NW China[J]. *Miner Deposita*, 2017, 52: 845–862.
- Deng H, Zheng Y, Chen J, et al. Learning 3D Mineral Prospectivity from 3D Geological Models with Convolutional Neural Networks: Application to a Structure-controlled Hydrothermal Gold Deposit[J]. *Computers & Geosciences*, 2022, 161: 105074.
- Li X H, Xue C, Chen Y F, et al. 3D Convolutional Neural Network-based 3D mineral prospectivity modeling for targeting concealed mineralization within Chating area, middle-lower Yangtze River metallogenic Belt, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2023, 157(5): 105444.
- Mao Y J, Qin K Z, Li C S, et al. Petrogenesis and ore genesis of the Permian Huangshanxi sulfide ore-bearing mafic-ultramafic intrusion in the Central Asian Orogenic Belt, western China[J]. *Lithos*, 2010, 200: 111–125.
- Naldrett A J. World-class Cu-Ni-PGE deposits: key factors in their genesis[J]. *Mineral Deposita*, 1999, 34: 227–240.
- Jahn B M, Wu F Y, Chen B. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic[J]. *Episodes*, 2000, 23(2): 82–92.
- Jahn B M. The Central Asian Orogenic Belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic[J]. *Geological Society London Special Publications*, 2004, 226(1): 73–100.
- Falkenberg J J, Keith M, Haase K M, et al. Effects of fluid boiling on Au and volatile element enrichment in submarine arc-related hydrothermal systems[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2021, 307: 105–132.
- Su S, Jim M, Wang J, et al. Interfacial tension studies between Fe-Cu-Ni sulfide and halo-norilsk basalt slag system[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48: 834–839.
- Sun T, Qian Z Z, Deng Y F, et al. PGE and isotope (Hf-Sr-Nd-Pb) constraints on the origin of the Huangshandong magmatic Ni-Cu sulfide deposit in the Central Asian Orogenic Belt, North-western China[J]. *Economic Geology*, 2013, 108(8): 1849–1864.
- Saumur B. M., Cruden A. R. Ingress of Magmatic Ni-Cu Sulphide Liquid into Surrounding Brittle Rocks: Physical & Structural Controls[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 90: 439–445.
- Song X Y, Deng Y, Xie W, et al. Prolonged basaltic magmatism and short-lived magmatic sulfide mineralization in orogenic belts[J]. *Lithos*, 2021, 390–391: 106114.
- Wang B, Cluzel D, Jahn B M, et al. Late paleozoic pre and syn-kinematic plutons of the Kangguer-Huangshan shear zone: inference on the tectonic evolution of the eastern Chinese North Tianshan[J]. *American Journal of Science*, 2014, 314: 43–79.
- Wang G, Huang L. 3D geological modeling for mineral resource assessment of the Tongshan Cu deposit, Heilongjiang Province, China[J]. *Geoscience Frontiers*, 2012, 3(4): 483–491.
- Xiao W J, Windley B F, Huang B C, et al. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98(6): 1189–1217.
- Xie W, Lu Y, Chen L M, et al. Zircon Th/U ratios suggest a post-collision extensional setting for the Permian Ni-Cu sulfide deposits in the Eastern Tianshan, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2022, 144: 104837.
- Zhou M F, Leshner C M, Yang Z X, et al. Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni-Cu-(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan District, eastern Xinjiang, northwest China; implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt[J]. *Chemical Geology*, 2004, 209(3–4): 233–257.
- Zhang M, Li C, Fu P, et al. The Permian Huangshanxi Cu-Ni deposit in western China: intrusive-extrusive association, ore genesis, and exploration implications[J]. *Miner Deposita*, 2011, 46: 153–170.