

新疆启鑫铜镍矿床钴的赋存状态及其富集机制^{*}

孟秋熠¹ 王登红^{1**} 王恒² 童英^{3,4} 汤贺军^{5,6} 赵云⁷ 秦思婷¹ 赵云彪¹
MENG QiuYi¹, WANG DengHong^{1**}, WANG Heng², TONG Ying^{3,4}, TANG HeJun^{5,6}, ZHAO Yun⁷, QIN SiTing¹ and ZHAO YunBiao¹

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037
 2. 新疆巨宜工程技术服务有限公司, 石河子 832000
 3. 中国地质科学院地质研究所, 深地探测与矿产勘查全国重点实验室, 北京 100037
 4. 中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心, 北京 100037
 5. 中国地质科学院, 北京 100037
 6. 中国地质调查局中国地质科学院地球深部探测中心, 北京 100037
 7. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 地质过程与成矿预测全国重点实验室, 北京 100083
1. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*
2. *Xinjiang Juyi Engineering Technical Service Co., Ltd., Shihezi 832000, China*
3. *State Key Laboratory of Deep Earth and Mineral Exploration, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*
4. *Beijing SHRIMP Center, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*
5. *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*
6. *China Deep Exploration Center, China Geological Survey & Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*
7. *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*
- 2025-04-27 收稿, 2025-10-12 改回.

Meng QY, Wang DH, Wang H, Tong Y, Tang HJ, Zhao Y, Qin ST and Zhao YB. 2026. The occurrence state and enrichment mechanism of cobalt in the Qixin copper-nickel deposit, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 42(6): 2120-2136, doi: 10.18654/1000-0569/2026.06.10; CSTR: 32089.14. APS-ysxb. 2026.06.10

Abstract The Qixin Cu-Ni deposit, nestled within the Beishan rift belt in southeastern Xinjiang, is a newly discovered ore system with significant potential for large-scale mineralization. Previous studies in this area have preliminarily conducted research in geology, geochemistry, geophysics and isotope geochronology. However, scientific issues regarding the occurrence state and enrichment mechanism of the strategic critical metal cobalt remain unexplored. This study selects cobalt-hosting rock masses from the Qixin Cu-Ni deposit as research subjects. Based on an investigation of the geological characteristics of the deposit, automated mineralogy analysis (TIMA) and electron probe microanalysis (EPMA) for major and trace elements were carried out to clarify the occurrence states of Co in sulfides and iron oxides (including pentlandite, pyrrhotite, chalcopyrite, chromite, magnetite, and spinel), as well as the enrichment mechanism of cobalt. TIMA results reveal that Co predominantly exists in solid solution without forming independent minerals. EPMA data indicate a sequential decrease in Co concentrations in sulfides/oxides as follows: pentlandite (1.14%) > pyrrhotite (0.083%) > magnetite (0.082%) > chromite (0.081%) > spinel (0.07%) > chalcopyrite (0.03%). The enrichment of Co in the Qixin Cu-Ni deposit is controlled by a multi-stage process. During the sulfide liquid immiscibility stage which occurs later than the magmatic crystallization differentiation stage, cobalt is equally distributed between the sulfide and oxide phases, leading to the gradual enrichment of cobalt from the magma into primary iron oxides. As the temperature decreases below 900℃, Co preferentially

^{*} 本文受国家科技重大专项项目(2024ZD1002203、2024ZD1002204)、中国地质调查局地质调查项目(DD20240202303、DD2026021102)和华锡集团企业项目(HE2412)联合资助。
第一作者简介: 孟秋熠, 女, 1995年生, 博士生, 助理研究员, 主要从事矿床学研究, E-mail: 464368527@qq.com
^{**} 通讯作者: 王登红, 男, 1967年生, 研究员, 主要从事矿床学研究, E-mail: wangdenghong@vip.sina.com

enters the monosulfide solid solution (MSS) and subsequently becomes enriched in pentlandite through exsolution. In the late-stage hydrothermal alteration, sulfide decomposition occurs, accompanied by the migration of sulfur (S) and nickel (Ni). This process releases Co^{2+} which replaces Fe^{2+} via isomorphic substitution with ionic radius compatibility of Co^{2+} 0.74 Å vs. Fe^{2+} 0.78 Å in secondary magnetite. Consequently, this leads to Ni-Co decoupling, where the Ni/Co ratio increases from approximately 18 in sulfides to over 50 in altered zones. Additionally, the Co content in secondary magnetite is significantly elevated, ranging from 0.3% to 0.6%. Although no discrete cobalt minerals have been identified, the average grade of cobalt in the ore reaches 0.04%, which meets the industrial mining grade requirement. Therefore, clarifying the distribution differences of cobalt in various minerals is of significant importance for mineral resource assessment and comprehensive utilization.

Key words Co; Occurrence state; Enrichment mechanism; Magmatic Cu-Ni sulfide deposit; Qixin; Xinjiang

摘 要 启鑫铜镍矿床位于新疆东南缘北山裂谷带中,为近期新发现的具有成为大型矿床潜力的新一轮找矿突破成果。前人在此初步开展了地质学、地球化学、地球物理以及同位素年代学等研究,但针对战略性关键金属钴的赋存状态与富集机制这一科学问题,仍属研究空白。本文选取启鑫铜镍矿床中赋钴岩体作为研究对象,在矿床地质特征研究的基础上,开展了全自动综合矿物分析(TIMA)和电子探针主微量分析(EPMA),查明了Co在硫化物及铁氧化物(镍黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、铬铁矿、次生磁铁矿、尖晶石)中的赋存状态,以及钴的富集机制。TIMA分析结果表明,启鑫铜镍矿床中Co的赋存形式以类质同象为主,尚未发现钴的独立矿物。电子探针分析结果显示,在金属硫化物及铁氧化物中Co的含量由高到低依次为:镍黄铁矿(1.14%)>磁黄铁矿(0.083%)>磁铁矿(0.082%)>铬铁矿(0.081%)>铬尖晶石(0.07%)>黄铜矿(0.03%)。此外,不同类型矿石中的镍黄铁矿钴含量也存在差异,由高到低分别为:致密团块状矿石(0.69%)、浸染状矿石(1.05%)、稀疏浸染状矿石(1.24%)、斑杂状矿石(1.67%)。启鑫铜镍矿床中钴的富集受多阶段过程控制:硫化物熔离阶段(晚于岩浆结晶分异阶段),Co通过硫化物-氧化物相间均等分配,使得岩浆中的部分Co逐渐向原生铁氧化物中Co富集;随着温度降低($<900^{\circ}\text{C}$),Co优先进入单硫化物固溶体(MSS),并在后续出溶作用中富集于镍黄铁矿;晚期热液蚀变导致硫化物分解(S、Ni迁出),释放的 Co^{2+} 以类质同象置换 Fe^{2+} (离子半径适配性: Co^{2+} 0.74 Å vs. Fe^{2+} 0.78 Å)进入次生磁铁矿,造成Ni-Co解耦(Ni/Co比值从硫化物中~18升至蚀变带 >50)及次生磁铁矿Co含量显著升高(0.09%~0.21%)。虽然尚未发现钴的独立矿物,但矿石中钴的平均品位已达0.04%,满足工业开采品位要求。因此,查明钴在不同矿物中的分布差异,对于矿产资源评价与综合利用具有重要意义。

关键词 钴;赋存状态;富集机制;岩浆型铜镍硫化物矿床;启鑫;新疆

中图法分类号 P575.1; P618.41; P618.63

钴作为一种过渡金属,因其独特的物理、化学性质,而被广泛应用于工业与材料科学、能源存储与转换、生物医学与健康、环境科学与可持续发展、资源安全与全球供应链等关键领域。2016年,钴被我国定为紧缺战略性资源(赵俊兴等,2019;王亚磊等,2023)。目前,我国钴的需求量供不应求,其中95%需靠进口供求。了解钴的赋存状态和富集机制,可以帮助更准确地评估矿床的资源潜力,优化资源开采和提取工艺。

岩浆型铜镍矿是钴的重要来源之一(如,加拿大萨德伯里、俄罗斯诺里尔斯克、中国金川及夏日哈木等;丰成友等,2004;赵俊兴等,2019;王焰等,2020;张洪瑞等,2020;Williams-Jones and Vasyukova,2022;王亚磊等,2023)。这类矿床主要发育在大火成岩省、克拉通边缘裂谷带或造山带内(Naldrett,2010;2011;Xue *et al.*,2019;Deng *et al.*,2020;张照伟等,2022;薛胜超等,2022;秦克章等,2025)。岩浆型铜镍矿中的钴主要通过类质同象置换赋存于硫化物(如镍黄铁矿、磁黄铁矿和黄铜矿等)、铁氧化物(次生磁铁矿、铬铁矿、钛铁矿等)、镁铁质硅酸盐矿物(如橄榄石、辉石、尖晶石等)中,同时可能以独立矿物(如辉钴矿、钴镍矿等)形式存在。钴在硫化物熔体中的分配行为(如Co/Ni比值变化)不仅可以示踪岩浆源区性质(如氧逸度、硫逸度),还能揭示硫化物

熔离效率与成矿潜力(赵俊兴等,2019)。因此,研究钴的赋存状态与富集机制,对了解岩浆铜镍矿床中的富集过程与岩浆演化、硫化物结晶和分离过程钴的赋存状态和富集过程具有指示意义(Naldrett,2004;Barnes and Ripley,2016)。这不仅为资源潜力评估与选冶工艺优化提供理论依据(如通过浮选优先回收镍黄铁矿中的钴),还可通过对比不同构造背景下的矿床(如塔里木与峨眉山大火成岩省),揭示区域成矿规律,指导深部找矿预测。

新疆天山-北山地区位于中亚造山带的东南部,发育有大量镁铁超镁铁质岩体,作为迄今为止全球显生宙造山带中成矿强度最高、矿床最密集的岩浆铜镍钴硫化物矿集区(Song *et al.*,2011;薛春纪等,2024)。区内不仅产出坡北、罗东等典型岩浆铜镍硫化物矿床,近期新一轮找矿工作中更在敦煌地块与北山裂谷结合带内发现了启鑫镁铁-超镁铁质杂岩体,它是仅次于坡一的第二大镁铁超镁铁质岩体。其岩体原始结晶分异程度高,且岩相多样、产状陡立。截至2018年,启鑫矿区现已发现30余处超基性岩体,已探明镍金属量2.69万t,伴生金属铜、钴金属资源量分别达到1777t和496t,达到中型规模。此外,还在深部发现了浸染状-块状硫化物连续矿化体,展现出超大型铜镍(钴)矿床的成矿潜力。

前人在此开展了矿区地质特征、成岩成矿时代、地球化

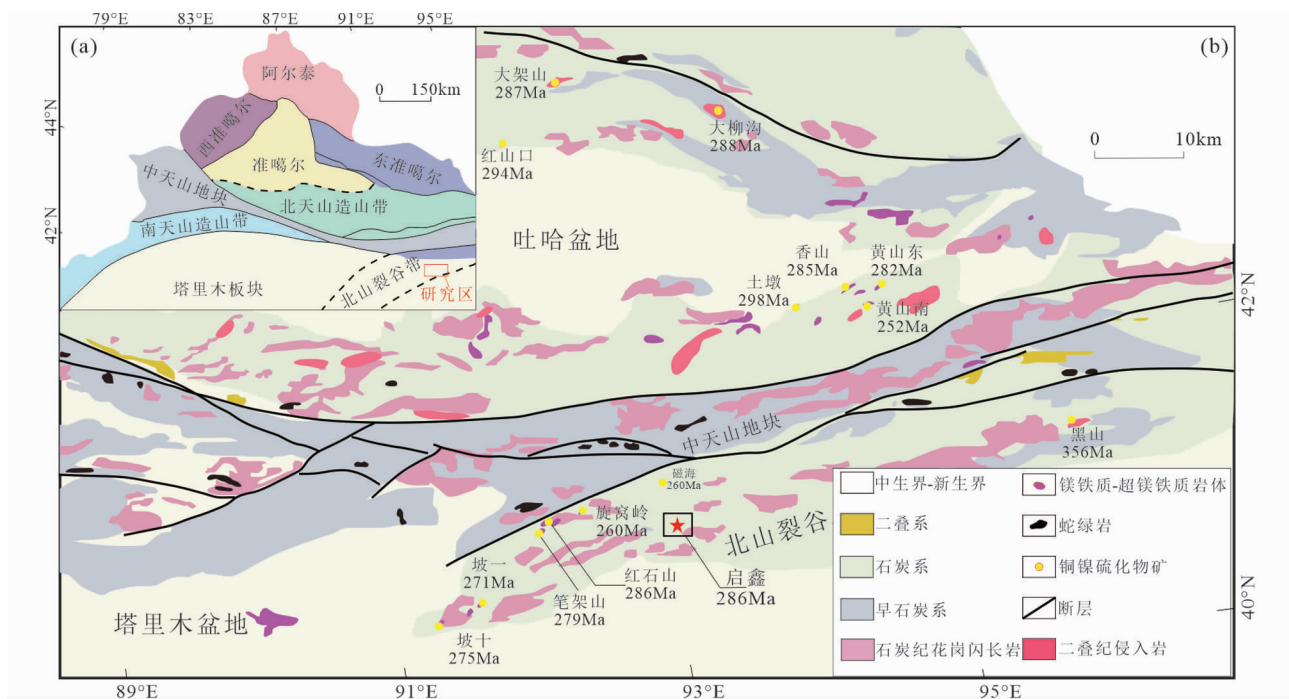


图1 新疆北部主要构造单元(a,据赵云等,2016 修改)及天山-北山区地质图(b,据 Xue *et al.* ,2019 修改)

图中数据来源于 Xue *et al.* ,2019

Fig. 1 Major tectonic units in northern Xinjiang (a, modified after Zhao *et al.* ,2016) and regional geological map of the Tianshan-Beishan area (b, modified after Xue *et al.* ,2019)

Data sources from Xue *et al.* ,2019

学、地球物理等方面的研究(黄敏等,2018;黄敏和廖云姗,2018;Xue *et al.* ,2019;薛胜超等,2022;庞振阵等,2025),了解了矿床中镍的赋存状态,以及母岩浆原始性质等,但对于矿床中钴的赋存状态、空间分布、富集过程等研究则较为薄弱。因此,笔者选取了启鑫含矿杂岩体的3个具有代表性的钻孔进行系统采样,结合硫化物和氧化物矿物原位微量成分分析,以及全岩镍钴硫含量分析,查明钴的赋存状态和空间分布规律,厘定含钴矿物的成分特征,探究钴镍在岩浆体系中的共生关系,藉此查明启鑫复式杂岩体中钴的赋存状态和富集过程,从而提高矿床中对伴生元素钴的开发及利用提供有效的依据。

1 区域地质概况

新疆地处中亚造山带最南缘,孕育了大量的镁铁-超镁铁质岩体,岩体形成时代主要为泥盆纪-三叠纪(Qin *et al.* ,2011;Song *et al.* ,2021;王路阳等,2023)。其中,作为中亚增生型造山带南缘重要构造单元的天山造山带,其主体呈EW向横跨乌兹别克斯坦至中国新疆-甘肃交界地带。带内广泛出露的古生代玄武质火山岩套及伴生的镁铁-超镁铁质层状侵入杂岩,不仅记录了古亚洲洋俯冲-碰撞过程中强烈的壳幔物质交换,更揭示了该造山带作为典型增生楔构造所经历

的复杂岩浆增生过程(Windley *et al.* ,2007;Xiao *et al.* ,2010)。而北山位于塔里木盆地东南缘和天山造山带南部之间,南有敦煌地体,自库鲁克塔格隆起,至红柳园裂谷和梧桐沟裂谷处,与两个裂谷相连,构成一条呈NEE向展布的裂谷带(图1)。

北山地区历经多期次构造演化,完整地记录了从拉张伸展、板块汇聚、地壳固结到构造活化及最终封闭的完整地质旋回(姜常义等,2012;Xue *et al.* ,2019)。区域地质调查表明,该构造带内发育良好的前寒武纪变质基底与早古生代沉积盖层呈块状叠置,由此形成错综复杂的地层格架、构造形迹及岩浆活动序列。这种独特的地质构造组合不仅造就了典型的活动大陆边缘特征,更通过多期次构造-岩浆-热液作用的叠加改造,奠定了优越的成矿地质背景,尤以金、铜、镍等金属矿床及铁、锰等沉积变质型矿床的密集产出为显著特征(徐学义等,2009)。

在长期地质演化中北山地区受到多期次、多向性构造应力场叠加改造,形成了具有显著方向分异特征的多期复合断裂体系。该体系以晚古生代形成的深大断裂为主体构架,伴随同构造期大规模韧性剪切带的发育,构成了贯穿全区的构造-岩浆成矿带。区域地层由古元古代结晶基底(北山岩群)和中元古代变质岩系(长城系古铜井岩群)构成变质核杂岩,上覆晚古生代活动陆缘火山-沉积建造(石炭系-二叠系海陆

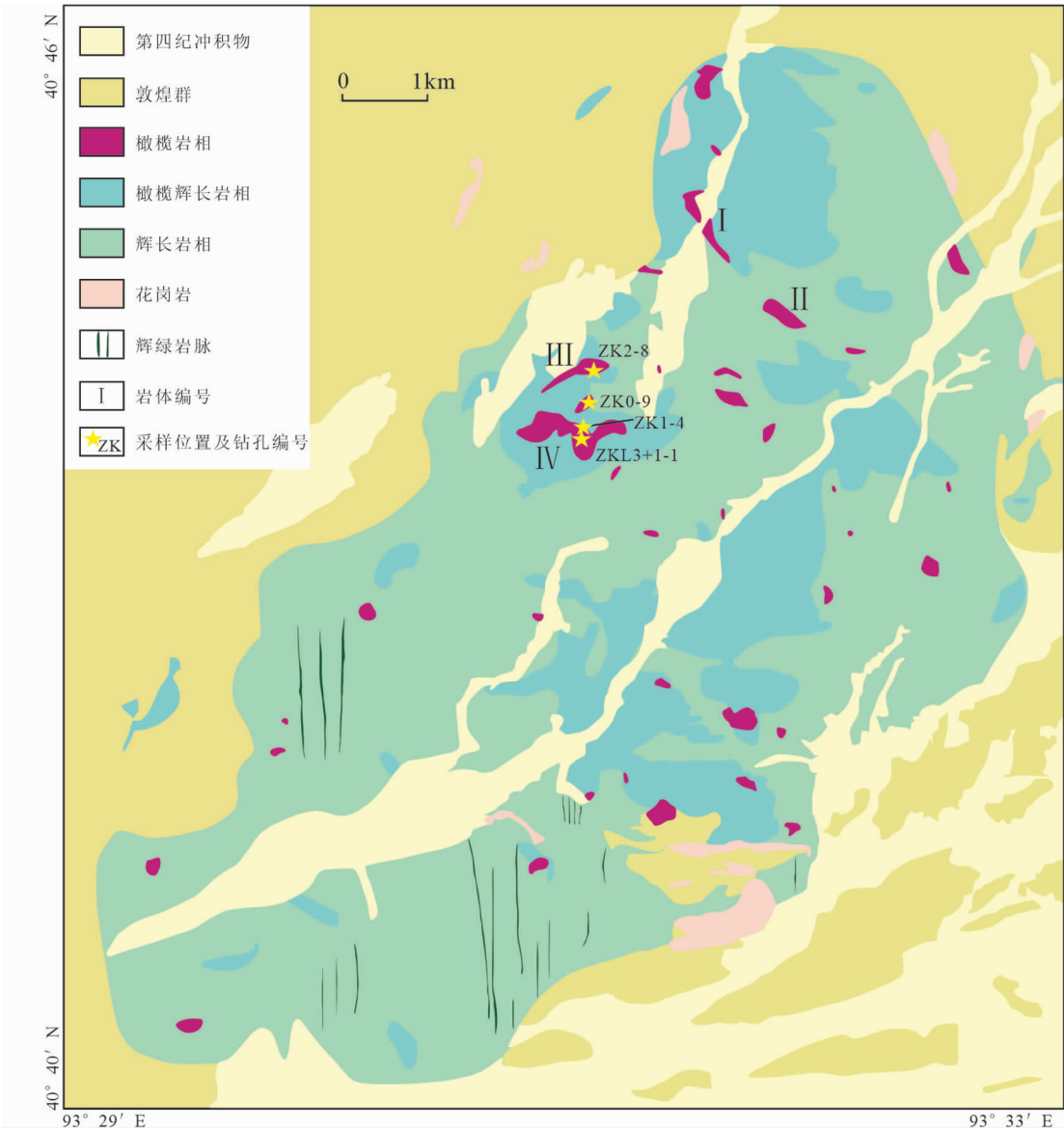


图2 启鑫矿区地质简图(据 Xue *et al.* ,2019;庞振阵等,2025 修改)
Fig.2 Geological sketch map of Qixin mining area (modified after Xue *et al.* ,2019;Pang *et al.* ,2025)

交互相碎屑岩-碳酸盐岩序列),顶部被新生代陆内拗陷盆地碎屑岩系(古近系-新近系黏土岩-砂泥岩互层)不整合覆盖。区域内发育了大量与古生代有关的镁铁-超镁铁质岩体,部分发育有铜镍矿化,自西向东主要有坡一、坡十、坡东、红石山、笔架山、旋窝岭、启鑫、黑海、黑山等矿化岩体,形成时代集中于二叠纪爆发成矿(秦克章等,2012,2025;Su *et al.* ,2013,2015;Xue *et al.* ,2016;薛春纪等,2024)。

2 矿区地质特征

启鑫镁铁-超镁铁质复式杂岩体的地理位置位于新疆哈密以南、甘肃敦煌西北处的若羌县境内。区域构造上位于塔

里木板块东北部的北山裂谷带与敦煌地块的交界处,白山大断裂和疏勒河大断裂之间,受控于白山大断裂南缘的次生断裂。岩体长约 14.7km,最大宽度 7.3km,出露面积约 107.3km²,与地层呈侵入接触,岩相较复杂。岩体主要出露地层为古元古界敦煌岩群古老变质岩系,为一套中深变质岩(云母石英片岩、黑云母花岗片麻岩等),其岩浆活动丰富,在华力西晚期侵入岩广泛发育,岩相主要有辉长岩、辉石橄榄岩、橄榄辉长苏长岩、辉绿岩、闪长岩等,具多期次、多类型特征。岩石类型从基性-超基性至中酸性岩类均有出露(图2)。启鑫铜镍矿床发育于该复式杂岩体中。探求镍金属资源量 2.9 万吨,其中,部分含矿岩体中的 Ni 平均品位为 0.20% ~ 10.99%,Cu 平均品位为 0.93%,Co 平均品位为 0.04%。

矿区主要划分为 4 个部分,其中, I 号位于矿区北部,出

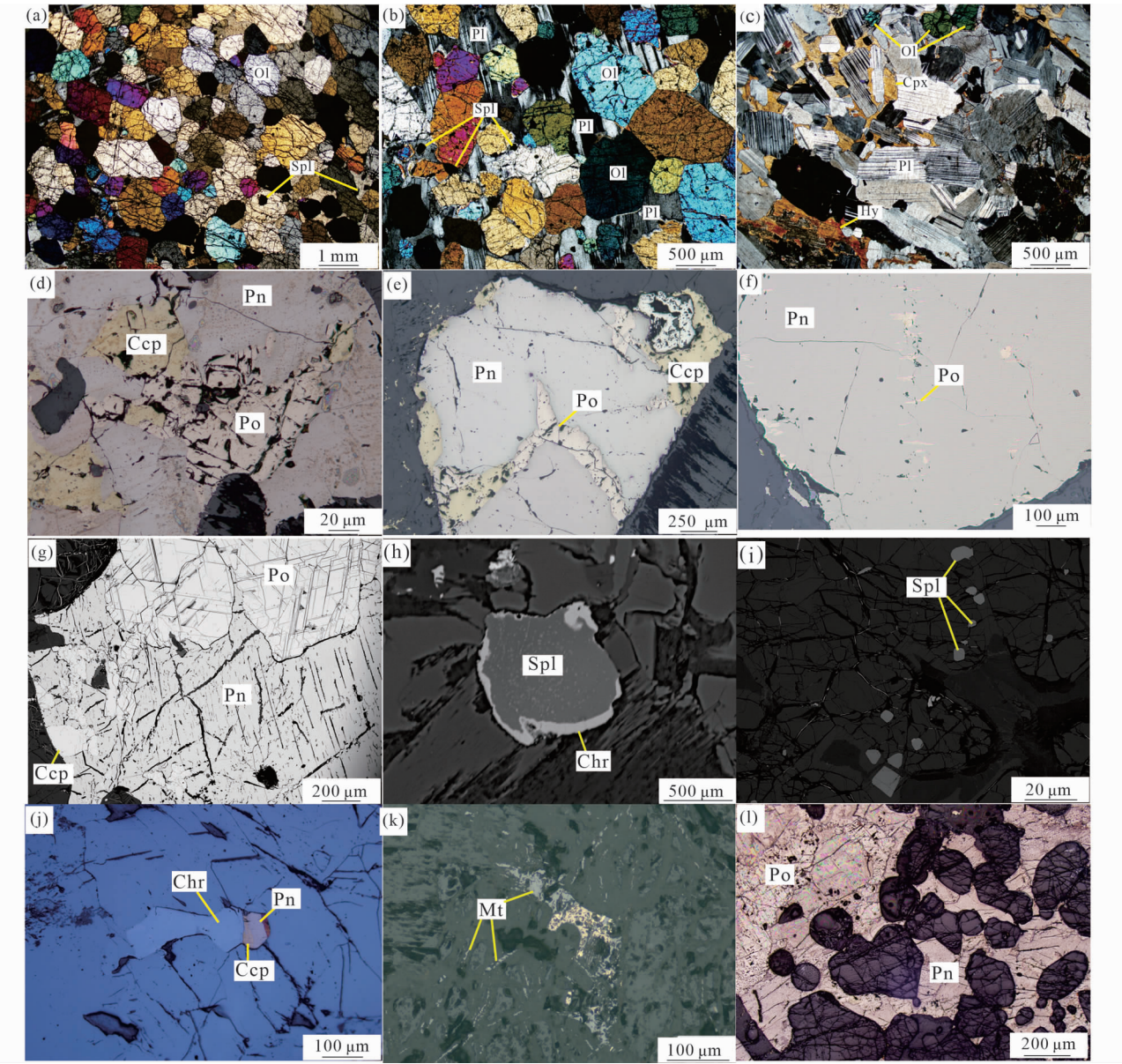


图3 启鑫铜镍矿床含矿岩体显微镜下照片及BSE图

(a)二辉橄榄岩;(b)斜长橄榄岩;(c)橄榄辉长苏长岩;(d)黄铜矿与镍黄铁矿被磁黄铁矿包裹;(e)黄铜矿与镍黄铁矿沿磁黄铁矿边缘发育;(f)镍黄铁矿呈针状发育于磁黄铁矿中;(g)镍黄铁矿、黄铜矿与磁黄铁矿共生;(h)铬尖晶石边缘出溶铬铁矿;(i)铬尖晶石呈堆晶结构发育于橄榄石裂隙中;(j)铬铁矿与硫化物共生;(k)次生磁铁矿沿橄榄石裂理发育;(l)海绵陨铁结构。Ccp-黄铜矿;Chr-铬铁矿;Cpx-单斜辉石;Hy-紫苏辉石;Mt-磁铁矿;Ol-橄榄石;Pl-长石;Pn-磁黄铁矿;Po-镍黄铁矿;Spl-尖晶石

Fig. 3 Microphotographs and BSE images of ore-bearing rock mass in Qixin Cu-Ni deposit

(a) Lherzolite; (b) Kazanskite; (c) Hyperite; (d) Chalcopyrite and pentlandite embedded in pyrrhotite; (e) Chalcopyrite and pentlandite developed along the margins of pyrrhotite; (f) Pentlandite occurring as needle-like (acicular) exsolutions within pyrrhotite; (g) Pentlandite occurring as needle-like (acicular) exsolutions within pyrrhotite; (h) Chromite exsolution at the margins of chrome spinel; (i) Chrome spinel exhibiting cumulate texture, developed within olivine fractures; (j) Chromite associated with sulfides; (k) Secondary magnetite developed along olivine parting; (l) Sideronitic texture. Ccp-chalcopyrite; Chr-chromite; Cpx-clinopyroxene; Hy-hypersthene; Mt-magnetite; Ol-olivine; Pl-plagioclase; Pn-pyrrhotite; Po-pentlandite; Spl-spinel

露地势低洼,呈北西宽、南东窄的带状展布。地表出露长大于950m,宽30~250m,总体走向144°。剖面显示该矿体为向东北倾斜的单斜构造,产状为倾向35°,倾角56°。矿体北部、北东部与橄榄辉长苏长岩呈侵入接触,南东端与辉长岩呈侵入接触,南西侧与敦煌岩群呈断层接触。Ⅱ号位于矿区北部,出露地势较高,北西至南东走向,整体呈似长方形,地表出露长大于355m,宽160m,总体走向136°。剖面表现为向东北倾斜的单斜构造,产状为倾向35°,倾角72°。矿体北

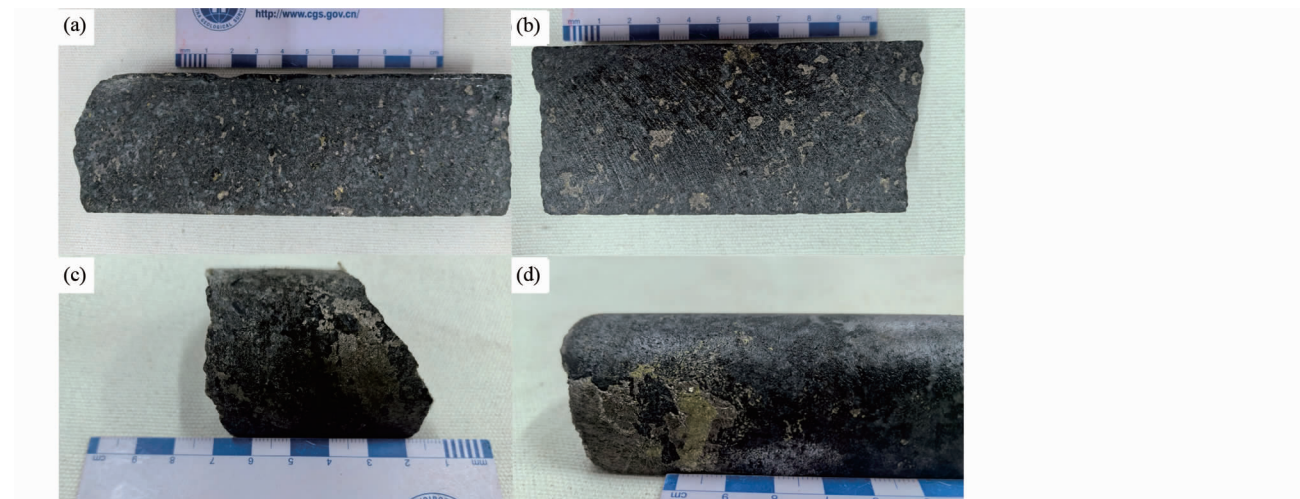


图4 启鑫铜镍矿床不同矿石类型手标本

Fig. 4 Hand specimens of different ore types in Qixin Cu-Ni deposit

东部与辉长岩呈断层接触,西部、南东部与辉长岩、橄榄辉长苏长岩呈侵入接触。Ⅲ号位于矿区西部,出露地势相对低洼。北北东至南南西向,整体呈长条形,地表出露长大于900m,宽80~200m,总体走向65°。剖面显示其为向南东倾斜的单斜构造,产状为倾向155°,倾角56°。矿体与橄榄辉长苏长岩、辉长岩呈侵入接触。Ⅳ号位于矿区西部,出露地势相对低洼。东西走向,整体呈不规则状,地表出露长大于1400m,宽300~400m,总体走向近东西。剖面呈“盆”状构造,表现为东西两端翘起、中部凹陷的特点。矿体与橄榄辉长苏长岩、辉长岩呈侵入接触。启鑫铜镍矿床含矿岩体主要为二辉橄榄岩、斜长橄榄岩及橄榄辉长苏长岩,其岩相特征如下:

二辉橄榄岩 岩石主要由橄榄石、单斜辉石、紫苏辉石以及斜长石组成,副矿物主要有尖晶石、次生磁铁矿等。可见堆晶结构、包橄结构,橄榄石被辉石包裹,部分橄榄石边界可见熔蚀现象。橄榄石含量占约40%~60%,辉石(20%~40%)在橄榄石间隙中分布,斜长石约5%~15%,可见聚片双晶发育,多呈填隙状充填于橄榄石与辉石颗粒间隙。尖晶石较为发育,主要在橄榄石边部及间隙中,自形-半自形结构(图3a)。

斜长橄榄岩 岩石主要由斜长石及橄榄石、辉石组成。其中橄榄石呈黄绿色,橄榄石沿裂纹及边部少许滑石及蛇纹石化,含量40%~50%,多被辉石包裹,呈包橄结构;斜长石呈板状,含量30%~35%;辉石呈短柱状,含量5%~10%,辉石据纤闪石化蚀变,岩石中多见硫化物,呈星散状、海绵陨铁状分布,他形粒状,个别呈滴珠状(图3b)。

橄榄辉长苏长岩 岩石主要由斜方辉石(紫苏辉石)、单斜辉石以及斜长石组成,可见少量橄榄石。其中,斜长石占约40%,板状或短柱状,聚片双晶及卡钠复合双晶发育;辉石主要为单斜辉石(约30%)和紫苏辉石(约10%),粒状或短

柱状产出;橄榄石约4%~5%,他形粒状。镜下可见辉长结构,橄榄石、辉石呈半自形粒状充填于斜长石粒间,橄榄石沿裂纹及边部少许滑石及蛇纹石化;辉石具纤闪石化蚀变(图3c)。

矿床中的金属硫化物主要有磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿,铁氧化物主要有铬尖晶石以及少量的钛铁矿和次生磁铁矿(图3e-l)。磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿呈他形粒状共生(图3d, e, g),部分可见镍黄铁矿、黄铜矿呈叶片状、针叶状出溶于磁黄铁矿中(图3f);铬尖晶石中可见铬铁矿的出溶(图3h, i);部分原生铬铁矿与硫化物共生(图3j);次生磁铁矿发育,主要沿橄榄石裂理间隙中发育,偶见其沿铬尖晶石边部发育以及沿着硫化物矿边部发育(图3k)。矿石按照矿化类型划分4种,分别为稀释浸染状(图4a)、稠密浸染状(图4b)、斑杂状(图4c)、致密块状(图4d),可见自形-半自形粒状结构、他形粒状结构、海绵陨铁结构(图3l)、固溶体分离结构等。

3 样品采集与分析

本文研究的样品采自启鑫镁铁超镁铁质杂岩体Ⅲ号、Ⅳ号矿区的3个钻孔样品。采样钻孔号及位置分别为93.521775E°、40.744443N°(ZK1-4);93.523359E°、40.745768N°(ZK2-8);93.521507E°、40.744116N°(ZK13+1-1)选取与含矿相关的超镁铁质岩中不同类型矿石及其铁氧化物作为研究对象,探讨样品中钴的赋存状态及其富集机制。

矿石的矿相分析分别在中国地质科学院矿产资源研究所(简称资源所)矿物微区物质组分与结构实验室和中国地质科学院地质所(简称地质所)完成,其中,资源所内所用测试仪器为JSM-IT500扫描电镜和Advanced Mineral

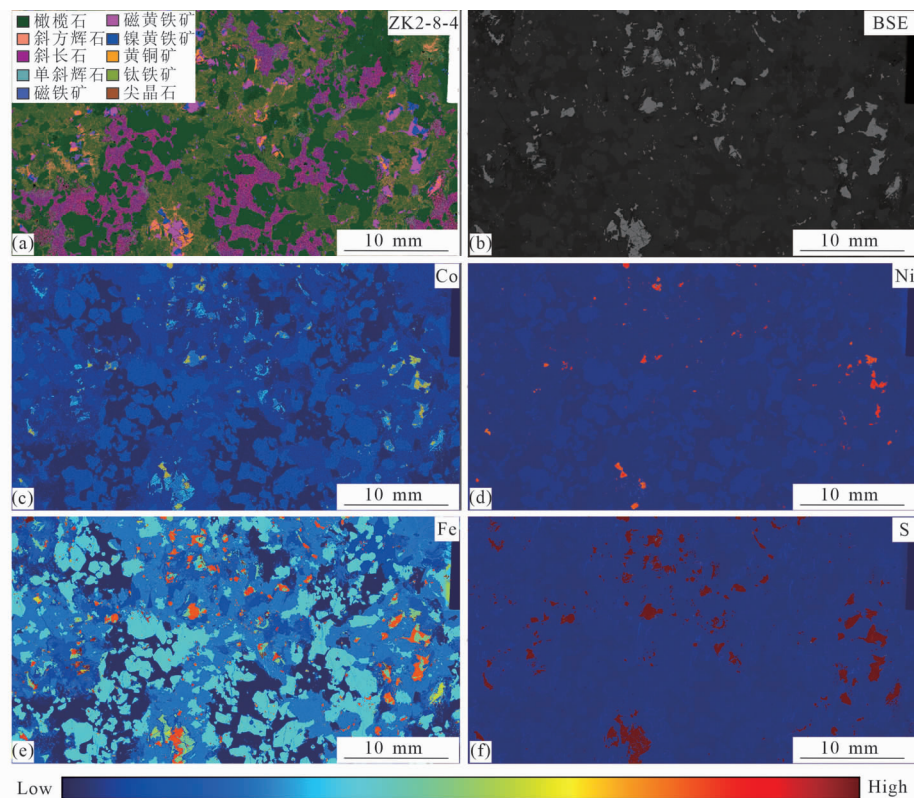


图5 斜长橄榄岩(ZK2-8-4)样品 TIMA 相图(a)、背散射图(b)及元素面扫结果(c-f)

Fig. 5 TIMA phase diagram (a), BSE image (b) and elemental mapping results (c-f) of plagioclase peridotite (ZK2-8-4)

Identification and Characterization System (AMICS) 矿物参数自动定量分析仪, AMICS 是第三代矿物参数自动定量分析系统。扫描电镜实验条件为: 加速电压 20kV, 工作距离 8.5mm, 背散射电子探测器 (HDBSD), 物镜光栏 60 μ m, 高真空模式。通过运用扫描电镜识别矿物成分, 并获取背散射图像, 利用 AMICS 矿物参数自动定量分析仪获取矿物相图; 地质所内所用测试仪器为捷克泰斯肯电镜公司 (TESCAN) 的全自动矿物分析系统 (TIMA)。采用进行薄片微域内矿相鉴定、背散射 (BSE) 图像和 X 射线元素面扫描等分析工作。采用高分辨率肖特基场发射扫描电子显微镜 (型号 TESCAN MIRA3), 搭载背散射电子、阴极发光和二次电子探测器以及 4 台快速 X 射线能谱仪。实验测试为高真空模式, 加速电压为 25kV, 电流为 9nA, 工作距离为 15mm, 电流和 BSE 信号强度使用铂法拉第杯自动程序校准。测试中使用解离分析的点阵模式获取 BSE 图和 EDS 数据, 每个点的 X 射线计数为 1000kcps。像素大小为 3 μ m, 能谱步长为 9 μ m。详细的 TIMA 矿相分析流程见陈倩等 (2021)。

硫化物及氧化物的主量元素和微量元素分析在资源所矿物微区物质组分与结构实验室完成测试, 其中, 硫化物所用测试元素为 S、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Sb、Ag、As、Au、Bi、Mn, 铁氧化物测试元素为 Al、Na、Mg、Ni、Co、Cr、K、Ti、Fe、Mn、V。测试仪器型号为 JEOLJXA-8230 场发射电子探针, 实验条件为: 加速电压 20kV; 束流 50nA; 束斑大小 5 μ m, 颗粒较小时可缩

小至 1 μ m, 修正方法 ZAF。

4 分析测试结果

4.1 矿相分布特征

在启鑫铜镍矿床Ⅲ、Ⅳ号矿区中, 斜长橄榄岩 (ZK2-8-4) (图 5a-f) 与二辉橄榄岩 (ZK0-9-16) (图 6a-f) 具有相似的矿化特征。金属硫化物以紧密共生的镍黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿组合产出。磁黄铁矿为其中含量最高的硫化物, 镍黄铁矿呈包裹、连生的形式与磁黄铁矿共生, 部分镍黄铁矿呈叶片状出溶于磁黄铁矿。金属氧化物次生磁铁矿与铬铁矿沿着矿物间隙产出, 尖晶石可见堆晶结构。通过 TIMA 面扫描及系统的矿物学分析, 并没有发现钴元素含量异常高部分, 也未见钴的独立矿物。钴元素面扫描结果表明, 钴元素的分布与镍、硫元素分布密具有高度一致性, 由此可知 Co 的富集与硫化物分布密切相关。进一步结合背散射图, 发现镍、钴含量高与镍黄铁矿分布重合, 因此, 笔者认为钴主要赋存于镍黄铁矿中。启鑫铜镍矿床中还普遍发育有原生尖晶石和少量钛铁矿, 主要与硫化物共生; 次生磁铁矿细脉发育于橄榄石裂理中。

通过稀疏浸染状矿石 (ZK2-8-4) 和浸染状矿石 (ZK0-9-16) 中钴的面扫结果可以看出, 硅酸盐矿物中的钴含量都明

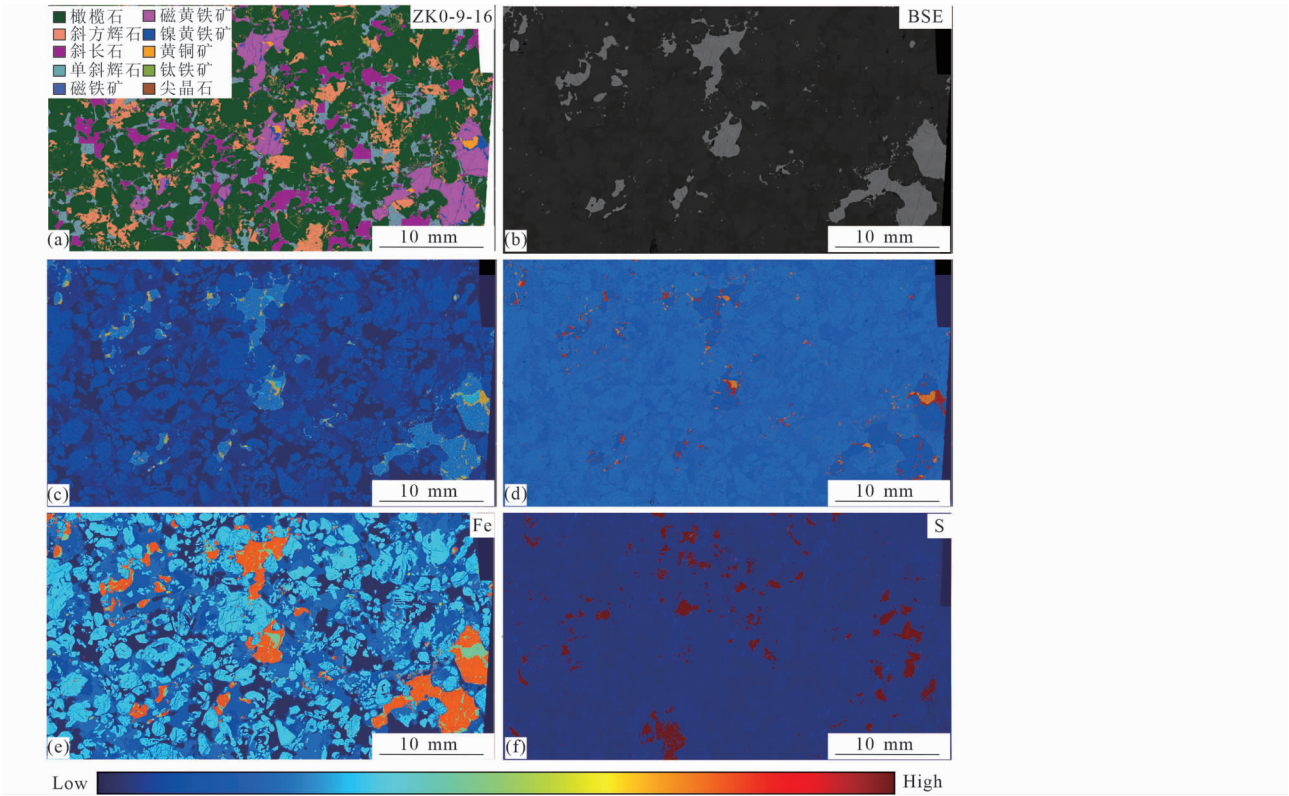


图6 二辉橄榄岩(ZK0-9-16)TIMA 相图(a)、背散射图(b)及元素面扫结果(c-f)
Fig.6 TIMA phase diagram (a),BSE image (b) and elemental mapping results (c-f) of lherzolite (ZK0-9-16)

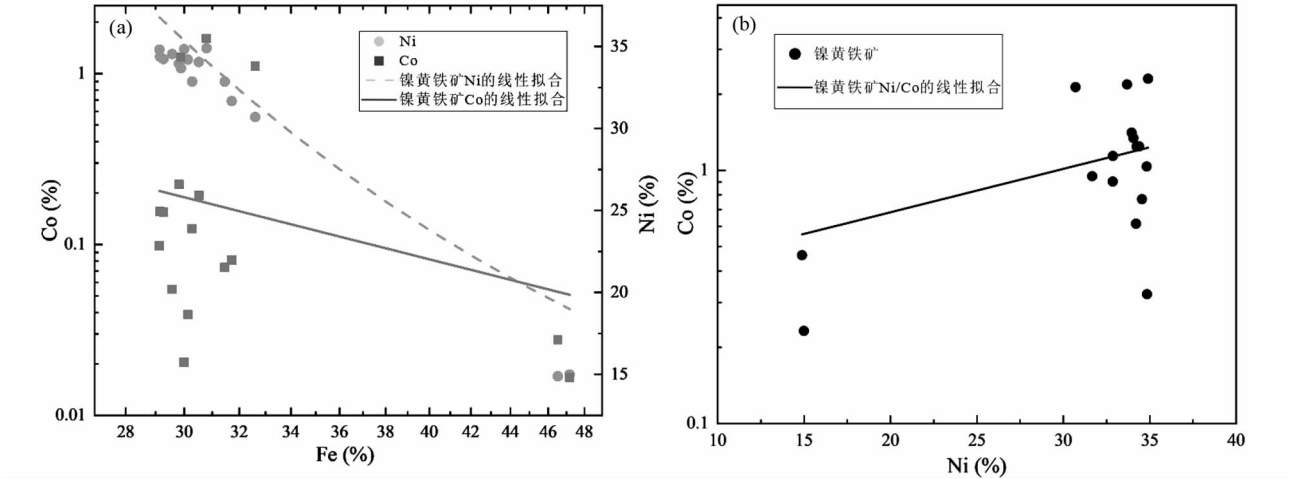


图7 启鑫铜镍矿床中镍黄铁矿元素相关关系图
Fig.7 Element correlation diagrams for pentlandite in the Qixin Cu-Ni deposit

显低于硫化物及铁氧化物中的钴含量,说明硅酸盐矿物不是主要的载钴矿物,在后续找矿过程中可以排除从硅酸盐中提取伴生元素钴。

4.2 载钴矿物的成分特征

在启鑫铜镍矿床Ⅲ、Ⅳ号矿区中,主要的金属硫化物及

铁氧化物所富集的钴元素程度不同。其中,镍黄铁矿 Co 含量为 0.232% ~ 2.299%,平均含量为 1.142%,Ni 含量为 14.882% ~ 34.901%,平均含量为 31.349%;Fe 的含量为 29.156% ~ 47.172%,平均含量为 32.375%(表 1、图 7a-b);S 含量为 34.149% ~ 38.825%,平均含量为 34.510%,均为达到检测限(表 1)。

表 1 启鑫铜镍矿床中硫化物的主量和微量元素组成 (wt%)
Table 1 Major and trace element composition (wt%) of sulfides in the Qixin Cu-Ni deposit

测点号	矿物	As	Cu	Co	Ni	Zn	S	Fe	Au	Sb	Ag	Mn
ZK1 4-B6-10	镍黄铁矿	0.029	—	2.299	34.90	—	34.58	30.79	0.162	—	—	—
ZKL3 + 1-1-B4-4		0.028	0.056	0.324	34.84	—	34.21	29.99	0	—	—	—
ZKL3 + 1-1-B4-6		—	—	1.035	34.82	—	34.15	29.14	0.027	—	—	0.003
ZKL3 + 1-1-B4-5		0.113	0.05	0.769	34.54	—	34.22	29.57	0.19	—	—	0.019
ZK0-9-16-6		—	—	1.243	34.38	—	34.18	29.16	—	—	—	—
ZK0-9-16-3		0.043	—	1.24	34.24	—	34.41	29.27	—	—	0.006	0.014
ZKL3 + 1-1-B4-2		0.019	0.059	0.615	34.20	—	34.25	30.13	—	—	0.014	—
ZK1 4-B6-14		0.069	0.049	1.341	34.05	—	34.32	30.52	—	—	0.007	—
ZK1 4-B6-5		—	—	1.409	33.95	—	34.37	29.81	—	—	0.006	—
ZK1 4-B6-1		0.009	0.002	2.185	33.68	—	34.33	29.88	0.124	—	—	0.002
ZK1 4-B6-17	磁黄铁矿	—	—	1.139	32.86	—	34.75	30.28	0.131	—	—	—
ZK2-8-4-8		—	0.043	0.903	32.86	—	35.35	31.46	0.015	—	0.005	0.011
ZK2-8-4-3		—	—	0.948	31.67	—	35.03	31.78	—	—	0.002	0.001
ZK2-8-4-4		0.027	—	2.13	30.70	—	35.12	32.61	—	—	0.004	0.001
ZK2-8-4-10		—	—	0.232	14.99	—	38.37	47.17	0.084	—	0.03	—
ZK1 4-B6-6		—	0.006	0.462	14.88	—	38.83	46.52	0.036	—	—	0.002
ZK0-9-16-9		—	0	0.151	3.259	—	39.94	55.85	0.026	—	—	0.001
ZKL3 + 1-1-B4-3		0.008	0.016	0.066	0.528	0.027	40.06	58	—	—	—	—
ZK0-9-16-12		—	0.023	0.107	0.518	—	40.13	58.76	0.026	0.005	0.013	—
ZK0-9-16-8		—	0	0.078	0.412	—	40.07	58.32	—	—	—	0.018
ZK0-9-16-2	黄铜矿	—	0.006	0.101	0.344	0.028	39.95	58.49	0.102	0.008	—	0.004
ZK1 4-B6-3		—	0.018	0.074	0.312	0.038	39.79	58.50	0.071	0.001	0.005	—
ZK1 4-B6-11		0.017	—	0.074	0.269	—	39.69	58.05	0.102	0.015	—	—
ZK1 4-B6-15		—	0.008	0.034	0.254	—	39.91	59.01	0.142	—	—	—
ZK1 4-B6-7		0.037	0.001	0.061	0.221	—	39.86	58.69	0.03	0.015	—	—
ZK0-9-16-5		—	0.032	0.104	0.212	0.007	40.57	57.06	—	0.014	—	—
ZK1 4-B6-16		0.012	0.017	0.047	0.196	—	39.88	58.55	0.02	—	0.006	—
ZK1 4-B6-12		—	0.007	0.081	0.163	0.036	39.24	59.85	—	0.002	0.014	0.032
ZK2-8-4-9		0.054	—	0.07	0.096	0.025	39.78	59.02	—	—	0.021	—
ZK0-9-16-11		0.128	0.084	0.068	0.085	0.014	39.97	58.84	0.005	—	0.006	—
ZKL3 + 1-1-B4-7		—	0.008	0.075	0.055	0.018	37.89	60.72	—	—	—	0.01
ZK2-8-4-2		—	0.006	0.114	0.054	—	38.25	60.86	0.01	0.011	0.02	0.019
ZK1 4-B6-2		—	34.77	0.021	0.02	0.002	36.03	29.56	—	—	0.018	—
ZK0-9-16-10		—	33.71	0.035	0.018	—	35.33	30.75	0.027	0.007	—	—
ZK0-9-16-1		—	34.16	0.026	0.017	0.035	35.59	29.53	0.016	—	—	—
ZKL3 + 1-1-B4-8		—	34.62	0.044	0.013	0.053	36.02	29.17	—	—	0.01	—
ZK1 4-B6-13		—	34.50	0.01	0.012	0.032	35.63	29.33	0.016	0.008	0.031	—
ZK2-8-4-6		—	34.62	0.035	0.006	0.044	35.77	29.51	—	0.02	0.013	—
ZK0-9-16-7		0.007	34.74	0.036	0.002	0.052	36.16	29.50	—	—	0.039	—
ZK1 4-B6-8		—	34.15	0.038	0.001	0.044	35.80	29.38	—	—	0.012	—
ZK1 4-B6-9		0.012	34.60	0.043	—	0.079	35.70	29.10	—	—	0.006	0.015
ZK0-9-16-4		—	34.69	0.023	—	0.002	35.91	29.49	—	0.007	0.002	0.017
ZKL3 + 1-1-B4-1		—	34.77	0.007	—	0.017	35.77	29.32	0.06	0.008	0.012	—
ZK1 4-B6-4		0.017	34.85	0.071	—	0.047	36.29	29.36	0.021	0.005	—	—
ZK2-8-4-1		0.007	35.12	0.035	—	0.04	34.07	30.44	0.057	—	0.005	0.002

注：— 表示低于检测限

磁黄铁矿中 Co 含量为 0.034% ~ 0.151%, 平均含量为 0.082%, Ni 含量为 0.054% ~ 3.259%, 平均含量为 0.436%; Fe 的含量为 55.85% ~ 60.86%, 平均含量为 58.66%; S 含量为 37.89% ~ 40.57%, 平均含量为 39.69%,

均为达到检测限(表 1)。

黄铜矿中 Co 含量为 0.01% ~ 0.07%, 平均含量为 0.03%; Ni 含量为 0 ~ 0.02%, 平均含量为 0.01%; Cu 为 33.71% ~ 35.12%, 平均含量为 34.56%; Fe 的含量为 29.10%

表 2 启鑫铜镍矿床中铁氧化物的主量和微量元素组成(×10⁻⁶)

Table 2 Major and trace element composition (×10⁻⁶) of iron oxides in the Qixin Cu-Ni deposit

测点号	矿物	Al	Na	Mg	Ni	Co	Cr	Si	K	Ti	Fe	Mn
ZK2-8-4-002	铬尖晶石	13701100	—	2877000	16521	44842	16552166	6534	—	266134	34223978	339231
ZK0-9-16-006		11548070	—	2623200	151833	83390	18610240	26135	—	748651	35505014	317545
ZK2-8-4-003		17231646	19289	3176400	68443	89684	14158835	24735	4979	444155	31177335	249389
ZKL3 + 1-1-B4-002		15148444	34869	5241000	102271	68443	18570556	8867	—	240959	26757098	252487
ZKL3 + 1-1-B4-001		16373079	21515	4983600	37762	62149	18118984	22402	14107	321278	26648206	291987
ZK1 4-B6-002		20519910	31901	5292000	110925	74737	13478740	11201	—	210989	25951297	217635
ZK1 4-B6-004		79350	55643	67200	126659	50349	—	34536	19915	101299	73516878	51117
ZK2-8-4-006	次生磁铁矿	233818	35611	72000	47989	84177	266838	—	—	246953	73474099	39500
ZK2-8-4-005		211600	—	54000	22814	113285	298995	12601	—	266134	72931973	48794
ZK1 4-B6-006		23805	58610	94800	—	48775	—	221683	25724	0	72597519	92166
ZK1 4-B6-005		24334	22999	144000	38548	95977	23947	199748	19915	5994	72553184	69705
ZK0-9-16-001		29095	43030	874800	7080	94404	27368	243617	—	0	72483960	130891
ZK0-9-16-005		20102	30418	831000	71590	60576	—	313156	—	0	72321400	52666
ZKL3 + 1-1-B4-003		2645	20773	271200	—	128232	32842	98007	2489	0	72091949	478641
ZK2-8-4-007	铬铁矿	640619	—	176400	128232	57429	5375075	40603	—	731867	65475982	137087
ZK2-8-4-001		1899110	1484	498000	194315	23601	10898622	2334	—	1330069	58426780	233125
ZK1 4-B6-003		1767389	—	656400	141606	67656	11116882	1867	4149	643156	58425225	278820
ZK0-9-16-003		1563724	—	917400	68443	86537	10713204	19601	3319	1108291	57410974	175812
ZK1 4-B6-001		2203285	2968	781800	81030	114072	12303284	8401	—	948850	56580283	302055
ZK0-9-16-004		3378194	—	856200	114072	108565	13309743	14934	830	965034	53607532	333035
ZK1 4-B6-007		4416092	79383	1030800	102271	76310	14333306	52737	71363	815783	50504110	346202
ZK2-8-4-008		3735269	7419	751200	75523	103844	14801983	23802	2489	1133465	50413885	266428

注：—表示低于检测限

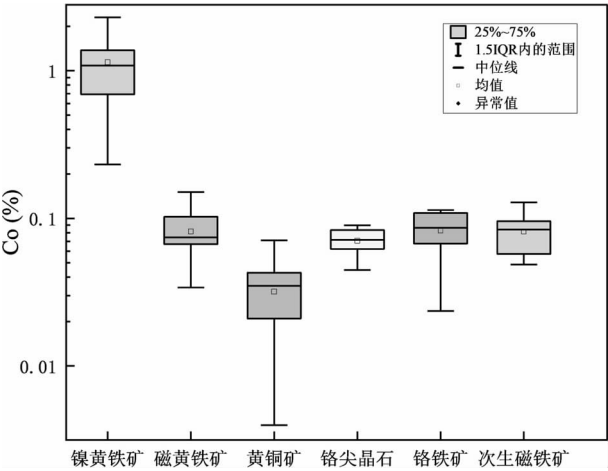


图 8 不同矿物 Co 含量箱型图
Fig. 8 Boxplot of Co content in different minerals

~ 30.75%，平均含量为 29.57%；S 含量为 34.07% ~ 36.16%，平均含量为 35.70%，大部分低于检测限(表 1)。

铁氧化物与橄榄石几乎贯穿整个成矿过程。其中,铬铁矿中 Fe 的含量 $504139 \times 10^{-6} \sim 584268 \times 10^{-6}$, 平均含量 550527×10^{-6} ; Ti 的含量 $6432 \times 10^{-6} \sim 13301 \times 10^{-6}$, 平均含量 9921×10^{-6} ; Cr 的含量 $107132 \times 10^{-6} \sim 148020 \times 10^{-6}$, 平均含量 124967×10^{-6} ; Mg 的含量 $4980 \times 10^{-6} \sim 10308 \times$

10^{-6} , 平均含量 7845×10^{-6} ; Ni 的含量 $684 \times 10^{-6} \sim 1943 \times 10^{-6}$, 平均含量 1110×10^{-6} (表 2)。其中, Cr 与 Fe 呈负相关关系, Cr 与 Mg 呈正相关关系。

铬尖晶石中 Fe 的含量 $259513 \times 10^{-6} \sim 355050 \times 10^{-6}$, 平均含量 300438×10^{-6} ; Ti 的含量 $2110 \times 10^{-6} \sim 7487 \times 10^{-6}$, 平均含量 3720×10^{-6} , Cr 的含量 $134787 \times 10^{-6} \sim 186102 \times 10^{-6}$, 平均含量 165816×10^{-6} ; Mg 的含量 $26232 \times 10^{-6} \sim 52920 \times 10^{-6}$, 平均含量 40322×10^{-6} ; Ni 的含量 $165 \times 10^{-6} \sim 1518 \times 10^{-6}$, 平均含量 813×10^{-6} (表 2)。Fe 与 Co 呈弱负相关关系, Ti、Fe 与 Mg 均呈负相关关系, Cr 与 Ti 呈弱正相关关系。

次生磁铁矿中 Fe 的含量 $654760 \times 10^{-6} \sim 735169 \times 10^{-6}$, 平均含量 719385×10^{-6} ; Ti 的含量 $60 \times 10^{-6} \sim 7319 \times 10^{-6}$, 平均含量 1503×10^{-6} ; Cr 的含量 $239 \times 10^{-6} \sim 53751 \times 10^{-6}$, 平均含量 10042×10^{-6} ; Mg 的含量 $540 \times 10^{-6} \sim 8748 \times 10^{-6}$, 平均含量 2873×10^{-6} ; Ni 的含量 $71 \times 10^{-6} \sim 1282 \times 10^{-6}$, 平均含量 633×10^{-6} (表 2)。Fe 与 Co 呈正相关关系, Ti 与 Fe、Mg 均呈负相关关系(表 2)。

总的来说, Co 的含量自镍黄铁矿、磁黄铁矿、铬铁矿、次生磁铁矿、铬尖晶石、黄铜矿中逐步递减(图 8), Co 的含量依次为 1.14%、0.083%、0.082%、0.081%、0.07%、0.03%。镍黄铁矿为 Co(0.23% ~ 2.30%) 的主要载钴矿物, 次生磁铁矿次之, 黄铜矿中 Co 的含量最低。

根据不同矿石产出类型, 镍黄铁矿中的钴含量也有一定

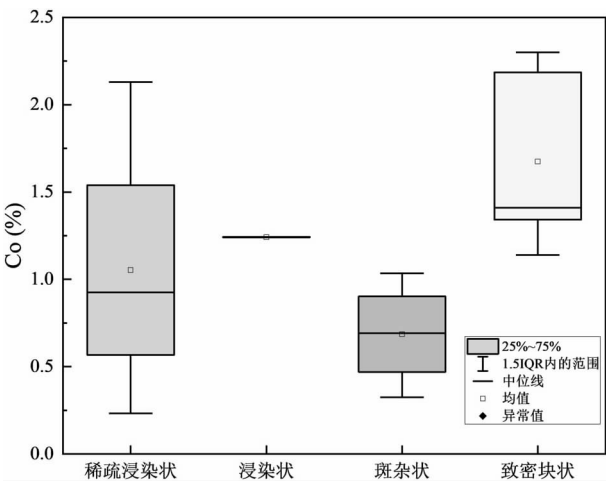


图9 启鑫铜镍矿床不同组构中镍黄铁矿中Co含量的箱形图

Fig. 9 Box plot of Co content in pentlandite from different textures in the Qixin Cu-Ni deposit

的差异。从致密团块状、浸染状、稀疏浸染状到斑杂状矿石中,镍黄铁矿中Co的含量逐级递减(图9)。致密块状矿石(ZK14-B6)中镍黄铁矿Co含量明显高于其他类型矿石,Co的含量1.34%~2.30%,平均含量1.67%,Ni的含量32.86%~34.90%,Co与Fe均呈正相关关系,与S呈负相关关系,与Ni关系不明确。

通过对镍黄铁矿不同的产出状态(图3f、图10a-d)进行对比,发现被磁黄铁矿包裹的镍黄铁矿(图10a-b)Co的含量明显高于与磁黄铁矿连生的镍黄铁矿Co的含量,而后期出溶作用产出的针状镍黄铁矿中Co的含量最少(表3)。被磁黄铁矿包裹的镍黄铁矿中Fe、S的含量略高于与其连生的镍黄铁矿的Ni、Co的含量,Co、Ni与Fe元素显示出Co元素以类质同象的形式更容易与被次生磁铁矿包裹的镍黄铁矿中的Fe所替换。综上,笔者推断被包裹的镍黄铁矿最先发育,Co相对富集,随后磁黄铁矿形成过程中,镍黄铁矿与磁黄铁矿连生形成,而随着温度不断降低,部分镍黄铁矿出溶于磁黄铁矿中,呈针叶、火焰状产出。

5 讨论

5.1 启鑫杂岩体中钴的赋存状态

钴在不同类型矿床中的赋存状态表现出多样性,可以独立矿物(如辉砷钴矿、硫镍钴矿、砷钴矿、方钴矿等;杨卉苒等,2019)、类质同象(秦克章等,2007;卢宜冠等,2021)以及吸附态或离子态(梅亚军等,2024)的形式出现。

钴作为第四周期Ⅷ族过渡金属,其电子排布呈现3d⁷4s²构型,化学性质上表现为优先失去4s轨道电子形成Co²⁺。地球化学特征显示,该元素具有显著亲铁性,在岩浆分异过

表3 启鑫铜镍矿床矿石不同产出形态的镍黄铁矿相关含量对比(wt%)

Table 3 Comparison of pentlandite content in different occurrence states of disseminated ores from the Qixin Cu-Ni deposit (wt%)

Po 的产状	S	Ni	Fe	Co	Ni/Fe
与 Pn 连生	34.59	33.70	30.42	0.92	1.11
被包裹	34.47	33.69	30.31	1.78	1.12
针状出溶	36.54	24.54	38.33	0.54	0.73

程中更易与铁族金属结合形成硫化物相。在岩浆铜镍硫化物矿床的成矿过程中,钴(Co)与镍(Ni)的地球化学行为表现出既相似又分异的特征(孙涛和王登红,2019;袁庆哈和苏本勋,2023)。实验岩石学及洋中脊玄武岩(MORB)中硫化物微区成分研究表明,硫化物熔体与硅酸盐熔体间的元素分配系数存在显著差异:钴的分配系数($D_{Co}^{Sul/Sil}$)介于17~114,而镍的分配系数($D_{Ni}^{Sul/Sil}$)高达210~1270。这种数量级的差异表明,尽管两者均表现出硫化物相富集倾向,但Ni在硫化物熔体中的相容性显著强于Co。启鑫铜镍矿床中Ni/Co比值较大,因此大部分Co以类质同象进入硫化物的晶格中,Co的独立矿物几乎没有或极少存在。

本次研究中,Co在脉石矿物(如橄榄石、透辉石、斜长石矿物)中含量较低,主要存在于硫化物及铁氧化物中;而矿石矿物的共生组合以磁黄铁矿±镍黄铁矿±黄铜矿为特征。启鑫铜镍矿床中Co元素的赋存状态主要以类质同象赋存于硫化物以及铁氧化物中,各类金属矿物的Co、Ni、Fe元素含量相对稳定,在含钴矿物中,Co与Fe基本上呈负相关关系。在图7中可以看出,镍黄铁矿中Ni-Co和Fe-Co相关性并不明显,仅有一定的变化趋势(图7a-b)。Co、Ni与Fe呈负相关关系,反映出Ni、Co以类质同象替换Fe进入晶格中,同时也可能有含Co微细矿物(硫镍钴矿)产出于镍黄铁矿中,Ni/Fe值为0.32~1.20,平均值为1.01(表1),与陈殿芬(1995)梳理的岩浆铜镍硫化物矿床中天然镍黄铁矿的Ni/Fe比值(0.91~1.27)相符。磁黄铁矿中Ni/Co值为4.6(表1),大于1,与小西南岔斑岩-浅成热液型铜金矿床中的磁黄铁矿(Co/Ni=1~8.3)和胡家峪喷气-沉积型铜矿床中的磁黄铁矿(Co/Ni=3.25)明显不同(陈殿芬,1995),这说明铜镍硫化物矿床中的磁黄铁矿是富镍贫钴的矿物。黄铜矿中Co/Ni值为4.7,大于1,属低镍区黄铜矿镍钴比值区间,Co与Fe呈弱负相关关系。综上可知,Co元素主要以类质同象置换Fe元素而赋存于镍黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿中。

铁氧化物的Co平均含量明显低于镍黄铁矿,但却普遍较高,与磁黄铁矿中Co的含量几乎持平,且远高于黄铜矿中Co的含量。不同于硫化物中的Co、Ni共生关系,在铬铁矿以及铬尖晶石中,Co和Ni含量表现为负相关关系(图11),指示出Ni和Co在铬尖晶石中可能也存在着置换关系。高Cr[#]值的铬尖晶石样品显示出高Ni低Co的特征,反之低Cr[#]值

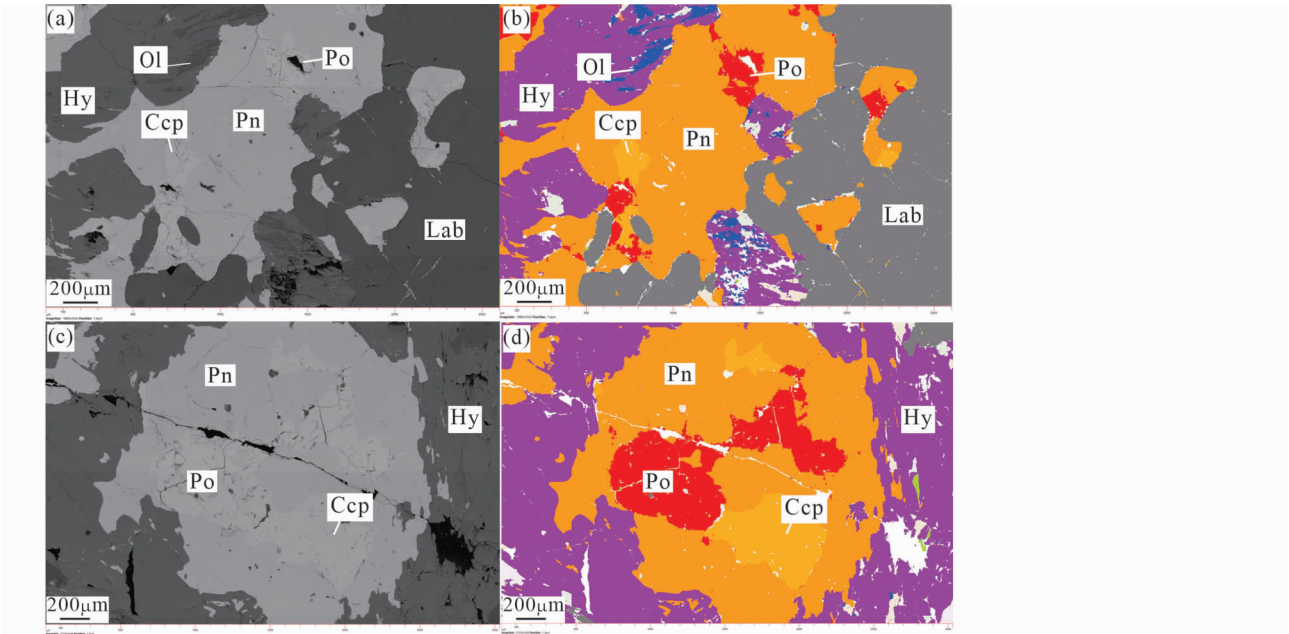


图 10 镍黄铁矿不同产出状态对比图

(a) 背散射图中镍黄铁矿与磁黄铁矿连生; (b) 图 10a 的自动化定量分析图; (c) 背散射图中镍黄铁矿被磁黄铁矿包裹; (d) 图 10c 的自动化定量分析图。Lab-拉长石

Fig. 10 Comparison charts of different occurrence states of pentlandite

(a) BSE image showing intergrowth of nickel pyrrhotite and magnetite; (b) AMICS identification map for Fig. 10a; (c) BSE image showing nickel pyrrhotite enclosed by magnetite; (d) AMICS identification map for Fig. 10c. Lab-labradorite

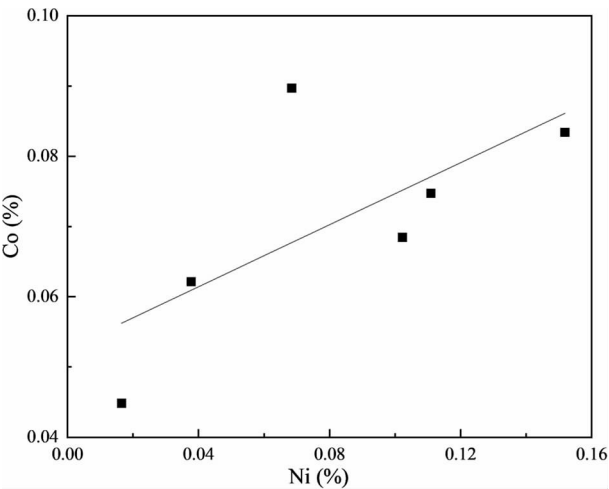


图 11 启鑫铜镍矿床中铬尖晶石 Ni-Co 相关关系图

Fig. 11 Correlation diagram of Ni vs. Co in chrome spinel from the Qixin Cu-Ni deposit

的铬尖晶石样品中表现出低 Ni 高 Co 的特征,这说明了在岩浆演化过程中 Co 以类质同象方式逐渐取代了 Ni,从而导致岩浆中的部分 Co 从岩浆中逐渐进入铬尖晶石中富集。此外,由于铬尖晶石中 Fe 含量远高于 Co,因此,Co 与 Fe 的类质同象并未造成 Fe 含量明显变化,此生磁铁矿中的高 Co 含量,主要是由于在早期岩浆结晶过程中,Ni 与 Co 优先进入橄

榄石中,而在后期次生磁铁矿中。

从 TIMA 相图(图 5a-f、图 6a-f)各元素分布特征,再结合电子探针分析结果可以看出,Co 与 Fe 基本上呈负相关关系,而 Ni 与 Co 在除黄铜矿外的硫化物中均呈正相关性,说明 Co 主要以类质同象的形式替换 Fe 赋存于硫化物及铁氧化物中,而后期由于铁氧化物中 Co 还可能与 Ni 发生类质同象进入晶格中。

5.2 钴的富集机制

钴作为典型幔源元素,在地球各圈层中呈现核幔富集、壳层贫化的分布特征。其成矿富集受多重地球化学过程控制(Patten *et al.* ,2013;Li and Audétat,2015;Wu *et al.* ,2018; Yao *et al.* ,2018;Helmy *et al.* ,2021;Liu *et al.* ,2025),具体如下:(1)原始幔源熔融体系中,Co 的赋存状态受控于地幔熔融程度及母岩浆初始含量;(2)岩浆演化阶段,Co 在硅酸盐熔体与硫化物熔体间的分配行为($D_{Ni}^{Sul/Sil}$)以及单硫化物固溶体(MSS)与硫化物熔体间的元素配分系数共同调控其迁移路径;(3)热力学条件尤其是温度梯度对硫化物液相分离效率具有关键控制作用。此外,岩浆期后热液交代及表生风化过程可促进 Co 在壳源环境中的次生富集(Tang *et al.* ,2023, 2024)。典型岩浆型钴矿床形成于超镁铁质-镁铁质岩浆体系硫化物熔离作用,其中 Co 表现出显著的硫化物熔体亲和性(金属分配系数 $Kd^{Co} > 10$),但其富集强度显著低于镍

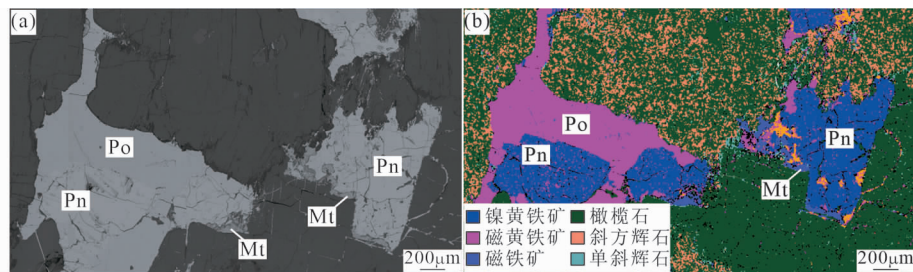


图 12 启鑫铜镍矿床中原生硫化物与次生磁铁矿矿物 BSE 图(a)和自动化定量分析图(b)

Fig. 12 BSE images (a) and TIMA images (b) of co-located sulfides and secondary magnetite minerals in the Qixin Cu-Ni deposit

($Kd^{Ni}/Kd^{Co} \approx 5 \sim 10$), 这种差异导致硫化物相中 Ni/Co 值达 10 ~ 50, 最终以类质同象形式赋存于镍黄铁矿等硫化物晶格中。

硫在铁镁质岩浆中的溶解度受控于物理化学条件以及岩浆组分变化 (Wendlandt, 1982; Lesher and Campbell, 1993; Mavrogenes and O'Neill, 1999; Park, 2004; Li and Ripley, 2005; Barnes *et al.*, 2006; 袁庆哈和苏本勋, 2023), 如分离结晶过程、地壳混染、温度下降或压力升高, 氧逸度的降低等, 均会造成硫的溶解度下降, 导致硫化物过饱和, 从而富集成矿。启鑫铜镍矿床中橄榄石和斜长石的分离结晶和壳源物质的加入可能是导致岩浆中硫达到过饱和的因素之一, 压力升高和不同成分的岩浆混合也发挥一定作用 (Xue *et al.*, 2019; 庞振阵等, 2025)。该矿床典型的熔离组构是磁黄铁矿 ± 黄铜矿 ± 镍黄铁矿的共生组合, 镍黄铁矿出溶于磁黄铁矿, 次生磁铁矿、铬铁矿与金属硫化物共生。该矿物组合与岩浆期早阶段所形成的橄榄石-铬尖晶石 (铬铁矿) 组合几乎贯穿了整个成矿过程。

根据实验岩石学研究表明, 在 Fe-Ni-Cu-S 体系中, 随着温度从岩浆初始条件下 ($>950^{\circ}\text{C}$) 逐渐降低至液相线以下, 硫化物熔体的结晶分异呈现明显的相变序列 (Craig and Kullerud, 1969; Naldrett, 1979; Ebel and Naldrett, 1996; Naldrett *et al.*, 1996, 1997; Helmy *et al.*, 2021): (1) 当体系温度降至 $950 \sim 1000^{\circ}\text{C}$ 时, 启鑫铜镍矿床中富 Fe 的单硫化物固溶体 (Monosulfide Solid Solution, MSS) 率先晶出, 形成单硫化物固溶体 (MSS) 和富铜残余硫化物熔体 (Residual Sulfide Liquid, RSL); 此时, Co、Ni 因具有较高的硫化物熔体-固溶体分配系数 (2.69 ~ 6.43; Mungall *et al.*, 2005; Barnes *et al.*, 2006), 优先进入 MSS 相富集 (Barnes *et al.*, 1997; Mungall *et al.*, 2005; Patten *et al.*, 2013), 导致残余硫化物熔体显著贫化 Co、Ni 并相对富集 Cu (Barnes *et al.*, 1997)。 (2) 当温度持续降低至 $950 \sim 450^{\circ}\text{C}$ 时, MSS 相进一步分解 (Naldrett *et al.*, 1996; Patten *et al.*, 2013), 生成镍黄铁矿 ((Fe, Ni) $_8\text{S}_8$) 与磁黄铁矿 (Fe_{1-x}S) 的共生组合, 此时大量的 Co 和 Ni 快速进入镍黄铁矿中 (Etschmann *et al.*, 2004), 而仅有少量的 Co 赋存于磁黄铁矿中, 使得磁黄铁矿中含 Co 量较低。 (3) 当温度持续降低至 $450 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 时, 残余熔体进入中间硫化物固溶体

(Intermediate Solid Solution, ISS), 结晶形成黄铜矿, 在形成黄铜矿过程中, 由于 Co 的分配受控于矿物结晶顺序和结构限制, 导致黄铜矿中 Co 含量极低, 同时黄铜矿中 Ni 的含量低于 Co 说明在熔离过程中发生了 Ni-Co 解耦 (Dare *et al.*, 2011); 同时, 在 Co、Ni 的磁黄铁矿中出溶形成呈叶片状、针叶状或火焰状的镍黄铁矿, 但在 ISS 结晶阶段所形成的镍黄铁矿中 Co 含量相对较低 (表 3; Helmy *et al.*, 2021; 袁庆哈和苏本勋, 2023)。

在基性-超基性岩浆系统中, Co 在硫化物熔体 (磁黄铁矿) 与氧化物熔体 (铬尖晶石-铬铁矿) 间的分配系数 ($D_{\text{Sul/Oxi}}^{\text{Co}}$) 受氧逸度 (f_{O_2}) 和硫逸度 (f_{S_2}) 共同控制。当岩浆处于中等氧逸度 ($\Delta\text{FMQ} = -1 \sim +1$) 且硫不饱和时, Co 倾向于均等分配至硫化物与氧化物相 ($D_{\text{Sul/Oxi}}^{\text{Co}} \approx 1$), 导致两者 Co 含量相近。启鑫铜镍矿中硫化物熔离作用要晚于橄榄石结晶分异作用 (庞振阵等, 2025), 因此可以看到原生铁氧化物与磁黄铁矿中 Co 的含量几乎持平。

此外, 启鑫铜镍矿床中部分超镁铁质岩石和矿石经历了热液蚀变改造作用, 原生硫化物与次生磁铁矿显示出共生关系, 次生磁铁矿取代了部分原生镍黄铁矿 (图 12a-b; Dare *et al.*, 2012), 与坡一铜镍矿床中次生磁铁矿相似, 启鑫次生磁铁矿也具有贫 Ni 富 Co 的特征。启鑫铜镍矿床在遭受热液蚀变时, 镍黄铁矿等硫化物中的 S 和 Ni 活化迁移的同时伴随着 Co 的释放, 迁移的 Co 在次生磁铁矿中发生沉淀, 造成 Ni 和 Co 发生明显解耦 (Williams and Vasyukova, 2022; 王路阳等, 2023)。前人实验结果表明, 在热液环境中, Co 元素主要以氯络合物的形式迁移 (Pan and Susak, 1989; Liu *et al.*, 2011; Migdisov *et al.*, 2011)。随着体系温度的升高以及 Cl 含量的增加, Co 的氯络合物配位数会从 8 次配位转变为 4 次配位 (Susak and Crerar, 1985)。此外, 当体系中存在氢和硫时, 在 200°C 至 300°C 的温度范围内, Co 主要以氯络合物 CoCl 的形式迁移, 而在低于 200°C 的温度条件下, 则主要以硫氢络合物 $\text{Co}(\text{HS})$ 的形式迁移 (Migdisov *et al.*, 2011); Ni 元素在热液过程中同样可以以氯络合物的形式迁移, 如 $[\text{NiCl}(\text{H}_2\text{O})]^-$ 、 $[\text{NiCl}]^-$ 、 NiCl_2 和 NiCl_3 等 (Tian *et al.*, 2012)。然而, Ni 的络合物类型以及其稳定存在的温度和盐度范围与 Co 的络合物存在着显著的差异。因此, 岩浆热液或岩浆期

后热液作用过程中, Co、Ni 在热液体系中的不同迁移行为会导致它们沿不同的路径迁移, 并形成不同的沉淀机制。这最终导致在超镁铁质岩体系中, 次生热液矿物中 Ni 与 Co 的解耦现象。由于启鑫铜镍矿床中硫化物熔离作用要晚于橄榄石结晶分异作用(庞振阵等, 2025), 因此 Co、Ni 高度亏损, 在 ISS 相结晶时期, 导致黄铜矿中 Co 含量过低。

6 结论

(1) 启鑫镍矿床硫化物矿物主要为磁黄铁矿和镍黄铁矿, 少量黄铜矿; 铁氧化物矿物主要为铬尖晶石, 其次为铬铁矿、次生磁铁矿。Co 主要以类质同象替换 Fe 的形式赋存于镍黄铁矿中, 其次为次生磁铁矿中, 在黄铜矿中 Co 含量最低, 独立钴矿物在该矿床中尚未发现。

(2) 启鑫铜镍矿床中硅酸盐矿物、金属硫化物及氧化物的钴含量不同, 其含量按照镍黄铁矿、次生磁铁矿、磁黄铁矿、铬铁矿、铬尖晶石、黄铜矿的顺序逐渐降低; 而在不同类型矿石中, 镍黄铁矿中 Co 含量依次从致密团块状矿石→浸染状矿石→稀疏浸染状矿石→斑杂状矿石逐渐递减。

(3) 启鑫铜镍硫化物矿中 Co 元素在硫化物熔离过程中, 更倾向于进入硫化物中; 随着温度的降低, 硫化物发生分离结晶作用, Co 元素更易进入单硫化物固溶体中, 温度持续降低, Co 元素又在出溶作用形成的镍黄铁矿中富集。由于启鑫铜镍矿床的硫化物熔离作用要晚于橄榄石结晶分异作用, Co 倾向于进入氧化物相, 从而导致铁氧化物中 Co 的含量高于磁黄铁矿; 后期经历了热液蚀变作用, 次生磁铁矿取代了部分原生镍黄铁矿, 镍黄铁矿等硫化物中的 S 和 Ni 活化迁移的同时伴随着 Co 的释放, 迁移的 Co 在次生磁铁矿中发生沉淀, 造成 Ni 和 Co 发生明显解耦, 也导致次生磁铁矿中 Co 的含量较高。

致谢 本次野外调研和样品采集工作获得了新矿集团郭勇明等人的大力支持, 中国地质科学院矿产资源研究所陈小丹老师、牛之建老师以及中国地质科学院地质研究所的董昕老师和吴双鹏博士在样品处理与实验测试中给予了极大的帮助与指导; 审稿人的修改意见提升了论文的质量; 在此表示诚挚的感谢!

References

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

Barnes SJ, Cox RA and Zientek ML. 2006. Platinum-group element, gold, silver and base metal distribution in compositionally zoned sulfide droplets from the Medvezky Creek Mine, Noril'sk, Russia.

Contributions to Mineralogy and Petrology, 152(2): 187-200

Barnes SJ and Ripley EM. 2016. Highly siderophile and strongly chalcophile elements in magmatic ore deposits. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 81(1): 725-774

Chen DF. 1995. Characteristics of main metallic minerals in some copper-nickel sulfide deposits of China. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 14(4): 345-354 (in Chinese with English abstract)

Chen Q, Song WL, Yang JK, Hu Y, Huang J, Zhang T and Zheng GS. 2021. Principle of automated mineral quantitative analysis system and its application in petrology and mineralogy: An example from TESCANTIMA. *Mineral Deposits*, 40(2): 345-368 (in Chinese with English abstract)

Craig JR and Kullerud G. 1969. Phase relations in the Cu-Fe-Ni-S system and their application to magmatic ore deposits. In: Wilson HDB (ed.). *Magmatic Ore Deposits*. New Haven: Society of Economic Geologists, 344-358

Dare SAS, Barnes SJ, Prichard HM and Fisher PC. 2011. Chalcophile and platinum-group element (PGE) concentrations in the sulfide minerals from the McCreey East deposit, Sudbury, Canada, and the origin of PGE in pyrite. *Mineralium Deposita*, 46(4): 381-407

Dare SAS, Barnes SJ and Beaudoin G. 2012. Variation in trace element content of magnetite crystallized from a fractionating sulfide liquid, Sudbury, Canada: Implications for provenance discrimination. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 88: 27-50

Deng YF, Yuan F, Hollings P, Song XY, Zhou TF, Fu B, Denysyn S and Zhao B. 2020. Magma generation and sulfide saturation of Permian mafic-ultramafic intrusions from the western part of the Northern Tianshan in NW China: Implications for Ni-Cu mineralization. *Mineralium Deposita*, 55: 515-534

Ebel DS and Naldrett AJ. 1996. Fractional crystallization of sulfide ore liquids at high temperature. *Economic Geology*, 91(3): 607-621

Etschmann B, Pring A, Putnis A, Grguric BA and Stüder A. 2004. A kinetic study of the exsolution of pentlandite (Ni, Fe)₉S₈ from the monosulfide solid solution (Fe, Ni)S. *American Mineralogist*, 89(1): 39-50

Feng CY, Zhang DQ and Dang XY. 2004. Cobalt resources of China and their exploitation and utilization. *Mineral Deposits*, 23(1): 93-100 (in Chinese with English abstract)

Helmy HM, Botcharnikov R, Ballhaus C, Deutsch-Zemlitskaya A, Wirth R, Schreiber A, Buhre S and Häger T. 2021. Evolution of magmatic sulfide liquids: How and when base metal sulfides crystallize? *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 176(12): 107

Huang M and Liao YS. 2018. The geology features of Qixin Cu-Ni sulfide deposit in Beishan, Xinjiang. *World Nonferrous Metals*, (12): 165, 167 (in Chinese with English abstract)

Huang M, Liu YX and Cai YF. 2018. Geochemical characteristics of Qixin mafic-ultramafic pluton in Beishan, Xinjiang, and its geological significance. *Xinjiang Geology*, 36(1): 44-50 (in Chinese with English abstract)

Jiang CY, Guo NX, Xia MZ, Ling JL, Guo FF, Deng XQ, Jiang HB and Fan YZ. 2012. Petrogenesis of the Poyi mafic-ultramafic layered intrusion, NE Tarim Plate. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 2209-2223 (in Chinese with English abstract)

Leshner CM and Campbell IH. 1993. Geochemical and fluid dynamic modeling of compositional variations in Archean komatiite-hosted nickel sulfide ores in Western Australia. *Economic Geology*, 88(4): 804-816

Li C and Ripley EM. 2005. Empirical equations to predict the sulfur content of mafic magmas at sulfide saturation and applications to magmatic sulfide deposits. *Mineralium Deposita*, 40: 218-230

Li Y and Audétat A. 2015. Effects of temperature, silicate melt composition, and oxygen fugacity on the partitioning of V, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Ag, Sn, Sb, W, Au, Pb and Bi between sulfide phases and silicate melt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 162: 25-45

Liu WH, Borg SJ, Testemale D, Etschmann B, Hazemann JL and Brugger J. 2011. Speciation and thermodynamic properties for cobalt chloride complexes in hydrothermal fluids at 35 ~ 440°C and 600 bar;

- An in-situ XAS study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(5): 1227-1248
- Liu XF, Brzozowski MJ, Lei RX, Li WY, Muhtar MN, Xiao F and Wu CZ. 2025. Variable enrichment of Co by deformation and hydrothermal processes in the Huangshandong Ni-Cu sulfide deposit, Eastern Tianshan. *Ore Geology Reviews*, 176: 106433
- Lu YG, Tu JR, Sun K, Qin P, Wang HQ, He SF, Zhang H, Gong PH, Guo S, Fang K and He WY. 2021. Cobalt occurrence and ore-forming process in the Chambishi deposit in the Zambian Copperbelt, Central Africa. *Earth Science Frontiers*, 28(3): 338-354 (in Chinese with English abstract)
- Mavrogenes JA and O'Neill HSC. 1999. The relative effects of pressure, temperature and oxygen fugacity on the solubility of sulfide in mafic magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(7-8): 1173-1180
- Mei YJ, Hui B and Yang YH. 2024. Distribution pattern and occurrence state of cobalt in Panxi Taihe vanadium-titanium magnetite. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 45(5): 63-70, 75 (in Chinese with English abstract)
- Migdisov AA, Zevin D and Williams-Jones AE. 2011. An experimental study of Cobalt (II) complexation in Cl^- and H_2S -bearing hydrothermal solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(14): 4065-4079
- Mungall JE, Andrews DRA, Cabri LJ, Sylvester PJ and Tubrett M. 2005. Partitioning of Cu, Ni, Au, and platinum-group elements between monosulfide solid solution and sulfide melt under controlled oxygen and sulfur fugacities. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(17): 4349-4360
- Naldrett AJ. 1979. Partitioning of Fe, Co, Ni, and Cu between sulfide liquid and basaltic melts and the composition of Ni-Cu sulfide deposits; Reply and further discussion. *Economic Geology*, 74(6): 1520-1528
- Naldrett AJ, Fedorenko VA, Asif M, Lin SS, Kunilov VE, Stekhin AI, Lightfoot PC and Gorbachev NS. 1996. Controls on the composition of Ni-Cu sulfide deposits as illustrated by those at Noril'sk, Siberia. *Economic Geology*, 91(4): 751-773
- Naldrett AJ, Ebel DS, Asif M, Morrison G and Moore CM. 1997. Fractional crystallization of sulfide melts as illustrated at Noril'sk and Sudbury. *European Journal of Mineralogy*, 9(2): 365-378
- Naldrett AJ. 2004. *Magmatic Sulfide Deposits: Geology, Geochemistry and Exploration*. Berlin: Springer, 1-612
- Naldrett AJ. 2010. From the mantle to the bank: The life of a Ni-Cu (PGE) sulfide deposit. *South African Journal of Geology*, 113(1): 1-32
- Naldrett AJ. 2011. Fundamentals of magmatic sulfide deposits. In: Li CS and Ripley EM (eds.). *Magmatic Ni-Cu and PGE Deposits: Geology, Geochemistry, and Genesis*. Society of Economic Geologists, 17: 1-50
- Pan PJ and Susak NJ. 1989. Co(II) -chloride and -bromide complexes in aqueous solutions up to 5m NaX and 90°C: Spectrophotometric study and geological implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(2): 327-341
- Pang ZZ, Xia MZ, Wang YQ, Man Y, Xia ZD and Zhang HD. 2025. The nature of the mantle source and exploration implications of the Qixin intrusion, Beishan, Xinjiang: Insights from olivine compositions. *Geological Bulletin of China*, 44(10): 2003-2018 (in Chinese with English abstract)
- Park YR. 2004. Stable Isotopic constraints on fluid-rock interaction and Cu-PGE-S redistribution in the Sonju Lake Intrusion, Minnesota. *Economic Geology*, 99(2): 325-338
- Patten C, Barnes SJ, Mathez EA and Jenner FE. 2013. Partition coefficients of chalcophile elements between sulfide and silicate melts and the early crystallization history of sulfide liquid: LA-ICP-MS analysis of MORB sulfide droplets. *Chemical Geology*, 358: 170-188
- Qin KZ, Ding KS, Xu YX, Sun H, Xu XW, Tang DM and Mao Q. 2007. Ore potential of protoliths and modes of Co-Ni occurrence in Tulargen and Baishiquan Cu-Ni-Co deposits, East Tianshan, Xinjiang. *Mineral Deposits*, 26(1): 1-14 (in Chinese with English abstract)
- Qin KZ, Su BX, Sakyi PA, Tang DM, Li XH, Sun H, Xiao QH and Liu PP. 2011. SIMS zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of Ni-Cu-bearing mafic-ultramafic intrusions in Eastern Tianshan and Beishan in correlation with flood basalts in Tarim Basin (NW China): Constraints on a ca. 280Ma mantle plume. *American Journal of Science*, 311(3): 237-260
- Qin KZ, Tang DM, Su BX, Mao YJ, Xue SC, Tian Y, Sun H, San JZ, Xiao QH and Deng G. 2012. 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. *Northwestern Geology*, 45(4): 83-116 (in Chinese with English abstract)
- Qin KZ, Wang L, Zhu YF, Tian W, Xu B, Zhang XH, Zhao C, Pang XY, Hui KX, Li GM, Li WB and Shen P. 2025. Composite orogenic metallogenesis of eastern CAO: I. Two phases of tectonic evolution and metallogenesis of Paleo-Asian Ocean. *Mineral Deposits*, 44(1): 35-66 (in Chinese with English abstract)
- Song XY, Xie W, Deng YF, Crawford AJ, Zheng WQ, Zhou GF, Deng G, Chen SL and Li J. 2011. Slab break-off and the formation of Permian mafic-ultramafic intrusions in southern margin of Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang, NW China. *Lithos*, 127:128-143
- Song XY, Deng YF, Xie W, Yi JN, Fu B, Chen LM, Yu SY, Zheng WO and Liang OL. 2021. Prolonged basaltic magmatism and short-lived magmatic sulfide mineralization in orogenic belts. *Lithos*, 390-391: 106114
- Su BX, Qin KZ, Tang DM, Sakyi PA, Liu PP, Sun H and Xiao QH. 2013. Late Paleozoic mafic-ultramafic intrusions in southern Central Asian Orogenic Belt (NW China): Insight into magmatic Ni-Cu sulfide mineralization in orogenic setting. *Ore Geology Reviews*, 51: 57-73
- Su BX, Qin KZ, Lu YH, Sun H and Sakyi PA. 2015. Decoupling of whole-rock Nd-Hf and zircon Hf-O isotopic compositions of a 284Ma mafic-ultramafic intrusion in the Beishan Terrane, NW China. *International Journal of Earth Sciences*, 104(7): 1721-1737
- Sun T and Wang DH. 2019. *Geology of Mineral Resources in China: Nickel Volume*. Beijing: Geological Publishing House, 1-912 (in Chinese)
- Susak NJ and Crerar DA. 1985. Spectra and coordination changes of transition metals in hydrothermal solutions: Implications for ore genesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49(2): 555-564
- Tang HJ, Deng Z, Zhong SH, Meng GX, Wang ZL, Yuan LL and Zhang HQ. 2023. Geochemistry and Sr-Nd-Hf-O isotopes of ore-bearing plutons from the Yundukala Au-Cu-Co deposit, East Junggar, Xinjiang, Northwest China: Implications for petrogenesis and tectonic setting. *Ore Geology Reviews*, 153: 105274
- Tang HJ, Deng Z, Zhong SH, Yan JY, Seltmann R, Wang ZL, Li H, Xue RH and Qi G. 2024. Geochronology and geochemistry of granites from the Longhua Ni-Co deposit, South China: Implication for the formation of Ni-Co mineralization. *Ore Geology Reviews*, 170: 106148
- Tian Y, Etschmann B, Liu WH, Borg S, Mei Y, Testemale D, O'Neill B, Rae N, Sherman DM, Ngothai Y, Johannessen B, Glover C and Brugger J. 2012. Speciation of nickel (II) chloride complexes in hydrothermal fluids; In situ XAS study. *Chemical Geology*, 334: 345-363
- Wang LY, Xue SC, Wang XM, Wang YL, Wang H, Wang P, Xin Y and Tian HQ. 2023. Occurrence and geochemical characteristics of cobalt of the Poyi nickel deposit in the Beishan region, Xinjiang: Insights into cobalt mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 39(2): 445-462 (in Chinese with English abstract)
- Wang Y, Zhong H, Cao Y H, Wei B and Chen C. 2020. Genetic classification, distribution and ore genesis of major PGE, Co and Cr deposits in China: A critical review. *Chinese Science Bulletin*, 65(33): 3825-3838 (in Chinese with English abstract)
- Wang YL, Li WY, Lin YH, Wang YC, Zhang ZW and Li DX. 2023. Study on the occurrence state and enrichment process of cobalt in Jinchuan giant magmatic Ni-Cu sulfide deposit. *Northwestern*

- Geology, 56(2): 133-150 (in Chinese with English abstract)
- Wendlandt RF. 1982. Sulfide saturation of basalt and andesite melts at high pressures and temperatures. *American Mineralogist*, 67 (9-10): 877-885
- Williams-Jones AE and Vasyukova OV. 2022. Constraints on the genesis of cobalt deposits: Part I. Theoretical considerations. *Economic Geology*, 117(3): 513-528
- Windley BF, Alexeiev D, Xiao WJ, Kröner A and Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31-47
- Wu CZ, Xie SW, Gu LX, Samson IM, Yang T, Lei RX, Zhu ZY and Dang B. 2018. Shear zone-controlled post-magmatic ore formation in the Huangshandong Ni-Cu sulfide deposit, NW China. *Ore Geology Reviews*, 100: 545-560
- Xiao WJ, Huang BC, Han CM, Sun S and Li JL. 2010. A review of the western part of the Altaids: A key to understanding the architecture of accretionary orogens. *Gondwana Research*, 18(2-3): 253-273
- Xu XY, He SP, Wang HL *et al.* 2009. Geological Background of Ore Deposit in the Eastern Tianshan-Beishan Area. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Xue CJ, Zhao XB, Zhao Y, Zhao WC, Mo XX, Xiao WJ, Ma HD, Zhu BY, Pak N, Nurtaev B and Deng J and Hou ZQ. 2024. Early Permian Au-Ni major metallogenic events in western Central Asian metallogenic domain. *Mineral Deposits*, 43 (4): 749-784 (in Chinese with English abstract)
- Xue SC, Qin KZ, Li CS, Tang DM, Mao YJ, Qi L and Ripley EM. 2016. Geochronological, petrological, and geochemical constraints on Ni-Cu sulfide mineralization in the Poyi ultramafic-troctolitic intrusion in the northeast rim of the Tarim craton, western China. *Economic Geology*, 111(6): 1465-1484
- Xue SC, Li CS, Wang QF, Ripley EM and Yao ZS. 2019. Geochronology, petrology and Sr-Nd-Hf-S isotope geochemistry of the newly-discovered Qixin magmatic Ni-Cu sulfide prospect, southern Central Asian Orogenic Belt, NW China. *Ore Geology Reviews*, 111: 103002
- Xue SC, Wang QF, Tang DM, Mao YJ and Yao ZS. 2022. Contamination mechanism of magmatic Ni-Cu sulfide deposits in orogenic belts: Examples from Permian Ni-Cu deposits in Tianshan-Beishan. *Mineral Deposits*, 41(1): 1-20 (in Chinese with English abstract)
- Yang HP and Wang W. 2019. Global cobalt resources status and exploitation trends. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 39(5): 41-49, 55 (in Chinese with English abstract)
- Yao ZS, Qin KZ and Mungall JE. 2018. Tectonic controls on Ni and Cu contents of primary mantle-derived magmas for the formation of magmatic sulfide deposits. *American Mineralogist*, 103(10): 1545-1567
- Yuan QH and Su BX. 2023. Distribution and controlling factors of nickel and cobalt in the Jinchuan magmatic Cu-Ni sulfide deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 39(4): 1030-1040 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HR, Hou ZQ, Yang ZM, Song YC, Liu YC and Chai P. 2020. A new division of genetic types of cobalt deposits: Implications for Tethyan cobalt-rich belt. *Mineral Deposits*, 39(3): 501-510 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZW, Li WY, Feng CY, Wang H, Wang YL, Wu JJ, Li DX, Lü XB, Zhu BP, Hui B and Liu HW. 2022. Study on metallogenic regularity of Co-Ni deposits in China and its efficient exploration techniques. *Northwestern Geology*, 55(2): 14-34 (in Chinese with English abstract)
- Zhao JX, Li GM, Qin K Z and Tang DM. 2019. A review of the types and ore mechanism of the cobalt deposits. *Chinese Science Bulletin*, 64(24): 2484-2500 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Y, Yang YQ and Ke JJ. 2016. 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. *Acta Petrologica Sinica*, 32(7): 2086-2098 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈殿芬. 1995. 我国一些铜镍硫化物矿床主要金属矿物的特征. *岩石矿物学杂志*, 14(4): 345-354
- 陈倩, 宋文磊, 杨金昆, 胡轶, 黄军, 张涛, 郑国顺. 2021. 矿物自动定量分析系统的基本原理及其在岩矿研究中的应用——以捷克泰思肯公司 TIMA 为例. *矿床地质*, 40(2): 345-368
- 丰成友, 张德全, 党兴彦. 2004. 中国钴资源及其开发利用概况. *矿床地质*, 23(1): 93-100
- 黄敏, 廖云娜. 2018. 新疆北山启鑫铜镍矿床地质特征. *世界有色金属*, (12): 165, 167
- 黄敏, 刘洋旭, 蔡永丰. 2018. 新疆北山启鑫基性-超基性岩体地球化学特征及地质意义. *新疆地质*, 36(1): 44-50
- 姜常义, 郭娜欣, 夏明哲, 凌锦兰, 郭芳放, 邓小芹, 姜寒冰, 范亚洲. 2012. 塔里木板块东北部坡—镁铁质-超镁铁质层状侵入体岩石成因. *岩石学报*, 28(7): 2209-2223
- 卢宜冠, 涂家润, 孙凯, 覃鹏, 王华青, 何胜飞, 张航, 龚鹏辉, 郭硕, 方科, 和文言. 2021. 中非赞比亚成矿带谦比希铜钴矿床钴的赋存状态与成矿规律. *地学前缘*, 28(3): 338-354
- 梅亚军, 惠博, 杨耀辉. 2024. 攀西太和钒钛磁铁矿中钴的分布规律及赋存状态. *矿产综合利用*, 45(5): 63-70, 75
- 庞振阵, 夏明哲, 王银强, 满毅, 夏昭德, 张海东. 2025. 新疆北山启鑫岩体地幔源区性质及找矿启示: 来自橄榄石成分的制约. *地质通报*, 44(10): 2003-2018
- 秦克章, 丁奎首, 许英霞, 孙赫, 徐兴旺, 唐冬梅, 毛骞. 2007. 东天山图拉尔根、白石泉铜镍钴矿床钴、镍赋存状态及原岩含矿性研究. *矿床地质*, 26(1): 1-14
- 秦克章, 唐冬梅, 苏本勋, 毛亚晶, 薛胜超, 田野, 孙赫, 三金柱, 肖庆华, 邓刚. 2012. 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. *西北地质*, 45(4): 83-116
- 秦克章, 王乐, 朱永峰, 田伟, 徐备, 张晓晖, 赵超, 庞绪勇, 回凯旋, 李光明, 李文博, 申萍. 2025. 北方东部复合造山成矿: I. 古亚洲洋两期构造演化与成矿. *矿床地质*, 44(1): 35-66
- 孙涛, 王登红. 2019. 中国矿产地质志·镍矿卷. 北京: 地质出版社, 1-912
- 王路阳, 薛胜超, 王晓曼, 王亚磊, 王恒, 王鹏, 辛雨, 田洪庆. 2023. 新疆北山坡一镍矿床中钴的赋存状态、地球化学特征及其对钴成矿的启示. *岩石学报*, 39(2): 445-462
- 王亚磊, 李文渊, 林艳海, 王永才, 张照伟, 李德贤. 2023. 金川超大型铜镍矿床钴的赋存状态与富集过程研究. *西北地质*, 56(2): 133-150
- 王焰, 钟宏, 曹勇华, 魏博, 陈晨. 2020. 我国铂族元素、钴和铬主要矿床类型的分布特征及成矿机制. *科学通报*, 65(33): 3825-3838
- 徐学义, 何世平, 王洪亮等. 2009. 东天山-北山地区成矿地质背景图. 北京: 地质出版社
- 薛春纪, 赵晓波, 赵云, 赵伟策, 莫宣学, 肖文交, 马华东, 朱炳玉, Pak N, Nurtaev B, 邓军, 侯增谦. 2024. 中亚成矿域西部早二叠世金、镍重大成矿事件. *矿床地质*, 43(4): 749-784
- 薛胜超, 王庆飞, 唐冬梅, 毛亚晶, 姚卓森. 2022. 造山带岩浆铜镍

硫化物矿床的混染模式——以天山-北山二叠纪铜镍矿为例. 矿床地质, 41(1): 1-20

杨卉茈, 王威. 2019. 全球钴矿资源现状及开发利用趋势. 矿产保护与利用, 39(5): 41-49, 55

袁庆晗, 苏本勋. 2023. 金川岩浆铜镍硫化物矿床中的镍钴分布规律及其控制因素. 岩石学报, 39(4): 1030-1040

张洪瑞, 侯增谦, 杨志明, 宋玉财, 刘英超, 柴鹏. 2020. 钴矿床类型划分初探及其对特提斯钴矿带的指示意义. 矿床地质, 39(3): 501-510

张照伟, 李文渊, 丰成友, 王辉, 王亚磊, 武军杰, 李德贤, 吕新彪, 朱伯鹏, 惠博, 刘会文. 2022. 中国钴-镍成矿规律与高效勘查技术. 西北地质, 55(2): 14-34

赵俊兴, 李光明, 秦克章, 唐冬梅. 2019. 富含钴矿床研究进展与问题分析. 科学通报, 64(24): 2484-2500

赵云, 杨永强, 柯君君. 2016. 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. 岩石学报, 32(7): 2086-2098