

文章编号:1672-6561(2012)04-0012-10

柴达木地块北缘牛鼻子梁铜镍硫化物矿床 地质特征及成因

赵彦锋^{1,2}, 康 珍^{1,2}, 凌锦兰^{1,2}, 赵双喜³, 王永刚³, 申大力³, 姜常义^{1,2}

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 西部矿产资源与地质工程教育部
重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 青海省核工业地质局, 青海 西宁 810000)

摘 要:牛鼻子梁岩体位于柴达木地块北缘俄博梁断隆区, 是一个出露面积约 8 km² 的镁铁质—超镁铁质层状杂岩体, 呈岩床状, 东西向延长; 堆晶结构与堆晶层理发育, 可划分出多个堆晶韵律与旋回, 岩石类型丰富, 具有橄榄岩相、辉石岩相和辉长岩相等多种岩石类型。中酸性端元的岩石类型有石英闪长岩和英云闪长岩, 证明岩浆经历了以分离结晶为主导性机制的分异演化过程。岩浆富水, 结晶出大量褐色普通角闪石, 形成角闪石岩。岩体中含有大量的古元古界金水口岩群捕虏体, 同化混染严重。该岩体内含有 2 层层状矿体, 一层在海拔 3 100 m 处, 另一层在海拔 2 800~2 900 m 处。此外, 在岩体西端还有一个被断层活化迁移后赋存在断层带中的热液型矿体。矿石构造主要呈浸染状、海绵陨铁状和块状; 成矿过程可划分为 3 个成矿期(岩浆期、矿浆期和岩浆热液期)和 4 个成矿阶段。结果表明: 岩浆自身的分异演化与同化混染作用共同导致了硫化物熔离; 成矿过程具有明显的多期多阶段性, 而非连续过程。

关键词: 镁铁质—超镁铁质岩体; 岩浆演化; 同化混染; 硫化物矿床; 熔离机制; 矿床成因; 成矿过程; 柴达木地块

中图分类号: P588.1

文献标志码: A

Geological Feature and Genesis of Niubiziliang Cu-Ni Sulphide Deposit in the Northern Margin of Qaidam Block

ZHAO Yan-feng^{1,2}, KANG Zhen^{1,2}, LING Jin-lan^{1,2}, ZHAO Shuang-xi³,
WANG Yong-gang³, SHEN Da-li³, JIANG Chang-yi^{1,2}

(1. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
2. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry
of Education, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Nuclear Industry Geological Bureau
of Qinghai Province, Xining 810000, Qinghai, China)

Abstract: Niubiziliang Intrusion, which is located at Eboliang Fault-uplift in the northern margin of Qaidam Block, is a mafic-ultramafic bedded complex with an outcrop area of about 8 km² in shape of sill with east-west extension; cumulate texture and cumulate layer developed, and the intrusion was divided into multiple cumulate rhythms and cycles; rock types were abundant and included peridotite phase, pyroxenite phase, gabbro phase, etc.; rock types of intermediate-acid end-member included quartz diorite and tonalite, so that magma underwent fractional crystallization which was the dominant mechanism of differentiation and evolution process.

收稿日期: 2012-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41102045); 青海省核工业地质局项目

作者简介: 赵彦锋(1986-), 男, 陕西府谷人, 理学硕士研究生, E-mail: jilik@126.com。

Magma was rich in water, so that a lot of brown hornblendes were crystallized, and hornblendite was formed. The rock body contained a large number of xenoliths in Jinshuikou Terrane of Paleoproterozoic, and the assimilation-contamination was serious. The intrusion included two layered ore bodies, and the altitudes of them were 3 100 m and 2 800–2 900 m, respectively. In addition, at the western end of rock body, there was a hydrothermal ore body in the fault zone which had been migrated and activated by faults. The structures of ore mainly included disseminated, sponge iron meteorite and massive; mineralization process could be divided into three periods (magmatic period, slurry period and magmatic hydrothermal period) and four stages. The results showed that magmatic differentiation evolution and assimilation-contamination jointly led to sulfide liquation; mineralization process was multi-phase and multi-stage rather than continuous.

Key words: mafic-ultramafic intrusion; magmatic evolution; contamination; sulphide deposit; segregation mechanism; genesis of deposit; mineralization process; Qaidam Block

0 引言

2008年,青海省核工业地质局在柴达木地块北缘的牛鼻子梁岩体中发现了铜镍硫化物矿体,这是首次在柴达木地块周缘发现该类矿床。随后,笔者对该岩体和矿床开展了初步的综合研究。与世界上近年来发现的铜镍硫化物矿床一样,牛鼻子梁矿床也赋存在一个小型镁铁质—超镁铁质层状岩体中^[1-9]。

对于铜镍硫化物矿床而言,大多数地质学家持有4点共识:①成矿金属元素全部来自于岩浆;②从质量平衡角度看,无论含矿岩体规模如何,大矿床必然是从大体积的岩浆中分凝出来的;③主要成矿阶段属于岩浆阶段,叠加有热液阶段成矿作用;④Ni、IPGE(Is、Qs和Ru)在岩浆阶段富集,而Cu、Au、PPGE(Rh、Pt和Pd)在热液阶段富集^[10]。

对于成矿过程,观点的分歧集中体现在金川模式和Noril'sk-Talnah模式的差别^[1-9,11-13]。具体表现为:①含矿岩体是岩浆通道,还是终端岩浆房;②硫化物矿浆是在岩浆通道中逐渐凝聚形成的,还是在中间岩浆房(位于终端岩浆房和地幔源区之间)形成的;③岩浆、含矿岩浆和矿浆的分凝和上侵是连续过程,还是脉动式过程;④外来硫的加入和同化混染是否是成矿不可或缺的条件^[14]。笔者以柴达木地块北缘牛鼻子梁铜镍矿为研究对象,分析确认其成矿过程是脉动式过程还是连续过程,并探讨硫化物熔离机制。

1 岩体地质与岩石组合

青海茫崖牛鼻子梁岩体位于阿尔金南缘断裂南侧约30 km处,其大地构造位置属柴达木地块北缘

的俄博梁元古宙古陆断隆区(图1),可以判定岩体产出的地质背景为古老地块边缘。岩体的直接围岩为古元古界金水口岩群,主要岩石类型有条带状和眼球状混合岩、黑云母变粒岩、各种片麻岩、斜长角闪岩、镁质大理岩、二辉石麻粒岩等。受阿尔金断裂影响,研究区内断层呈现出复杂多样、活动频繁等特征,这些断层对岩体的破坏作用很大。

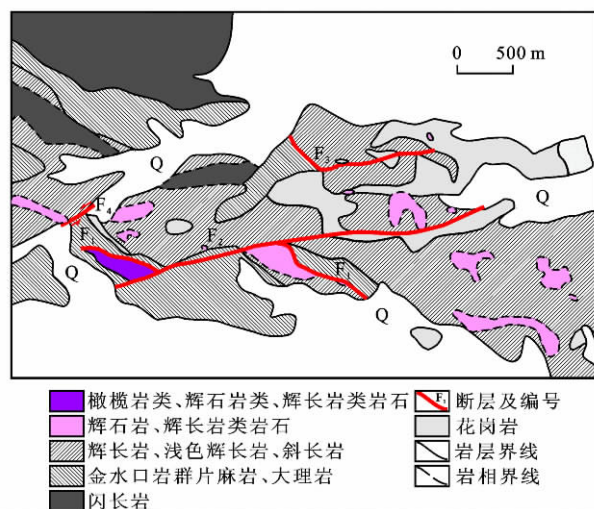


图1 牛鼻子梁岩体地质图

Fig. 1 Geological Map of Niubiziliang Intrusion

牛鼻子梁岩体的出露面积约8 km²,平面形态呈长条状,长轴近东西向,长约6 km,最大宽度约1.5 km。现有钻孔资料表明,越靠近岩体近东西向的中轴部位岩体深度越大,从中轴部位向南北两侧岩体厚度逐渐减薄。由于钻孔资料有限,尚未确定岩体的最大深度,初步判断岩体形态为岩床状。该岩体具层状和纹层状构造,超镁铁质岩石和镁铁质岩石往往呈韵律性互层,层理明显[图2(a)],具有

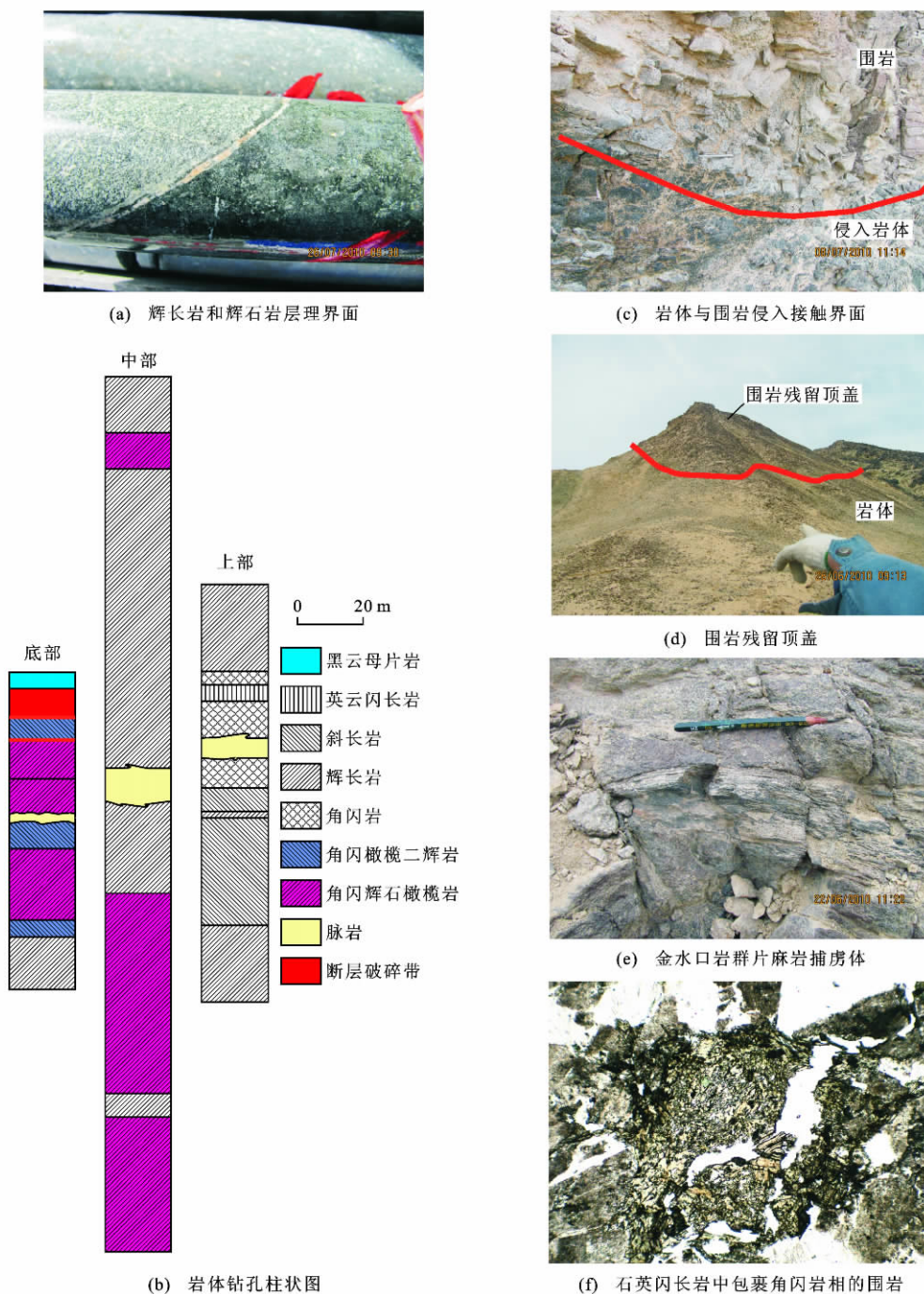


图 2 牛鼻子梁岩体特征照片和柱状图

Fig. 2 Columnar Section and Photos of Characteristics of Niubiziliang Intrusion

清晰的垂直分带。其下部以超镁铁质岩石为主,中部以镁铁质岩石为主,上部以淡色辉长岩、闪长岩为主[图 2(b)]。这表明牛鼻子梁岩体为一镁铁质—超镁铁质层状岩体,同时也证明岩浆经历了以分离结晶为主导性机制的分异演化过程。该岩体剥蚀程度较低,与围岩为侵入接触关系[图 2(c)],岩体西端仍保留了围岩的残留顶盖(或顶垂体)[图 2(d)],二者发生了较大规模的同化混染,在岩体内多处见

有金水口岩群的捕虏体[图 2(e)]。捕虏体块度一般不超过 50 cm。镜下观察表明,同化混染程度远超过肉眼所及范围[图 2(f)]。捕虏体主要为片麻状石英闪长岩、黑云母片岩和黑云斜长片麻岩。

根据牛鼻子梁岩体岩石类型、岩体见矿情况以及被 F_1 、 F_2 断层切割破坏的现状,可将牛鼻子梁岩体划分为 3 个区块(图 1):①号区块为岩体西段 F_1 断层以南、 F_2 断层以北被两断层切割限制的超镁铁质岩区

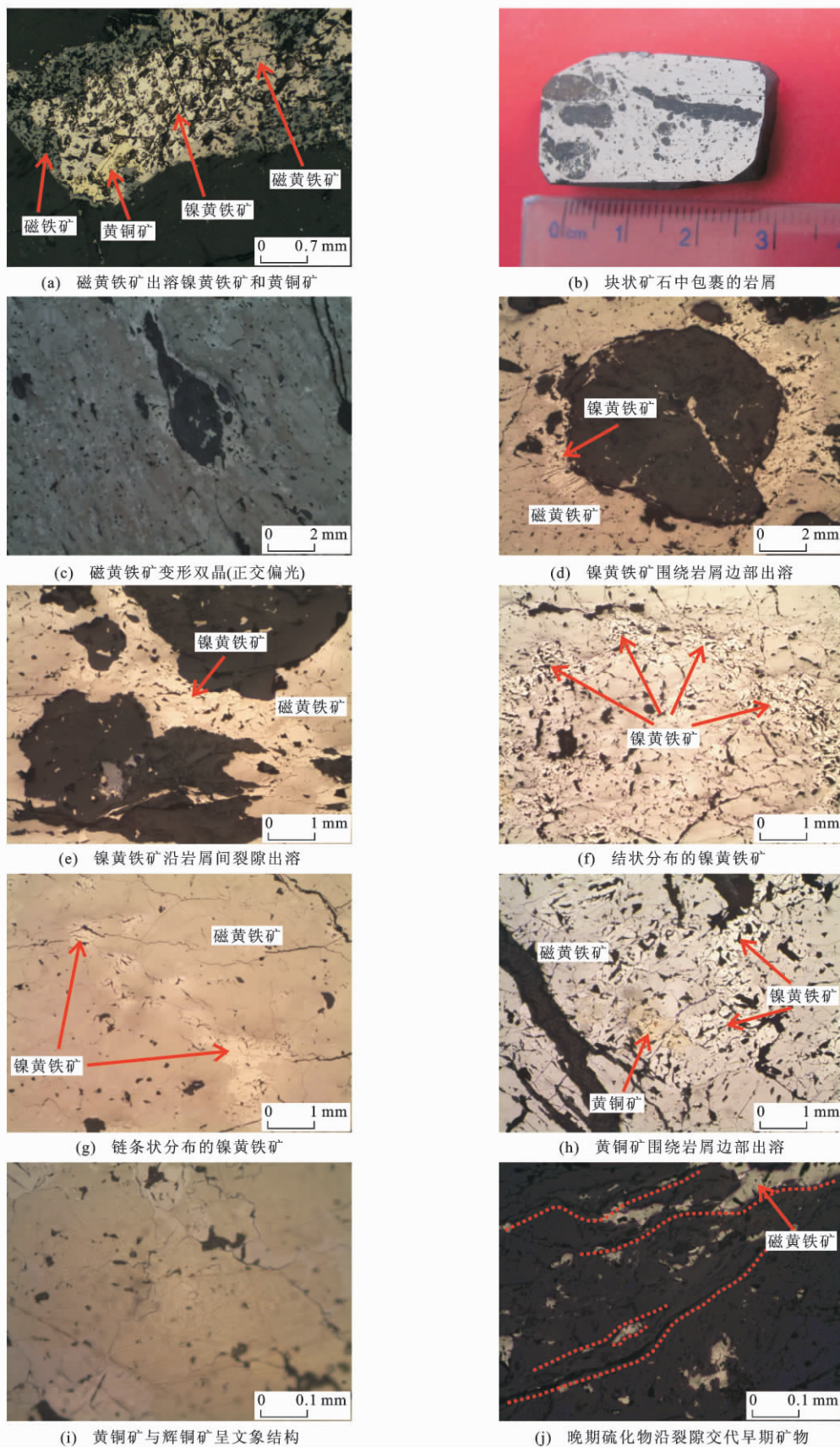


图3 矿石矿物显微照片

Fig.3 Micrographs of Ore Minerals

块;②号区块为 F_2 断层以南的镁铁质—超镁铁质岩区块;③号区块为 F_1 、 F_2 断层北侧的镁铁质岩区块。

①号区块主要岩石有斜长二辉橄榄岩、斜长单辉橄榄岩、角闪二辉橄榄岩、角闪橄榄岩、角闪橄榄二辉岩、角闪橄榄辉长岩等;②号区块主要岩石有角闪二辉橄榄岩、角闪单辉橄榄岩、角闪橄榄辉长岩、橄榄辉长岩、辉长岩、淡色辉长岩、闪长岩等。各区块岩石结构类型相似,主要有堆晶结构、包橄结构、含长结构、反应边结构、溶蚀结构、辉长结构等。矿物结晶顺序多为橄榄石、斜长石、辉石、褐色普通角闪石。橄榄石牌号(For , $MgSiO_3$ 摩尔分数)为 78%~84%,均属贵橄榄石,多已蛇纹石化、滑石化;斜方辉石牌号(En , $Mg_2(Si_2O_6)$ 摩尔分数)为 80%~84%,均属古铜辉石,蚀变较强;单斜辉石多为顽透辉石;斜长石牌号(An , $Ca(Al_2Si_2O_6)$ 摩尔分数)为 14%~84%,普遍发生钠黝帘石化和绢云母化蚀变,导致部分斜长石牌号降低为中长石、奥长石。各类岩石中均见有原生含水矿物——褐色角闪石,在斜长二辉橄榄岩和斜长单辉橄榄岩中体积分数较低,在角闪二辉橄榄岩、角闪橄榄岩、角闪橄榄二辉岩、角闪辉石岩中体积分数可达 40%,橄榄辉石角闪石岩中体积分数为 75%;此外,岩体中还有少量黑云母。这表明在岩浆演化的整个过程中是富水的,是有利的成矿因素。

2 矿床地质特征

2.1 矿体地质特征

目前进行的勘查工作主要集中在①、②号区块,③号区块尚未进行系统的勘查工作,研究程度相对较低。

①号区块已发现 5 个矿(化)体,均处于 F_1 逆断层的破碎带中,平面上可见 $M1$ ~ $M4$ 等 4 个矿(化)体, $M5$ 为钻探发现的隐伏矿化体。5 个矿(化)体含矿岩石类型、矿石矿物组合及矿石结构构造特征相似,可以认为是同一类型的一组矿体。矿(化)体含矿岩石类型多样,硫化物多穿插充填于破碎带岩块间裂隙中,显然这不是原生矿床,应为构造活化的热液型矿床。矿石矿物以黄铁矿为主,还有少量的磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、钛铁矿、硫铁镍矿、斑铜矿、闪锌矿、褐铁矿、磁铁矿、辰砂、雄黄等。矿石多为交代溶蚀结构、(稀疏)浸染状构造。地表可见 4 个矿化体呈近东西向的楔形,长 80~160 m,宽 2~22 m,深 80~160 m。5 个矿化体中 Ni 含量(质量分数,后文同)最高可达 1.57%,平均含量为

0.12%;Cu 最高为 0.31%,平均为 0.11%;Co 最高为 0.079%,平均为 0.02%。Pt 最高含量为 24.2×10^{-9} ,平均为 15.68×10^{-9} ,Pd 最高为 10.42×10^{-9} ,平均为 34.1×10^{-9} ,均接近伴生组分含量要求。以上特征表明,本区块中硫化物多为热液成因,5 个矿(化)体为后期热液作用的产物。

②号区块钻探发现规模较大的隐伏矿体,赋矿岩石为橄榄岩,矿石矿物主要有磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿,少量黄铁矿、钛铁矿、磁铁矿。矿石结构类型有海绵陨铁结构、乳滴状结构、固溶体分离结构、交代溶蚀结构等。矿石构造主要有团块状构造、浸染状构造、斑点状构造、星点状构造。本区块隐伏矿体可综合归并为 2 层。第 1 层为海拔 3 100 m 左右的上层隐伏铜镍矿(化)体,以位于西侧 7 号勘探线的矿体厚度最大、硫化物富集程度最好,向东到 8 号勘探线矿体厚度逐渐减薄、硫化物逐渐分散,由西向东呈现出矿体厚度由大到小、富集程度由集中到分散、矿石含量由高到低的特征。尽管在不同部位有所差异,但他们均属于同一层矿体应该是毫无疑问的。第 2 层为海拔 2 800~2 900 m 的下层隐伏矿体,累计视厚度已达 31 m,且由西向东呈现出与上层矿体相似的特征。总体来看,与上层矿体相比,下层矿体呈现出硫化物含量更多、厚度更大等特征。本矿体中 Ni 含量为 0.2%~2.43%,Cu 为 0.10%~0.36%,Co 为 0.017%~0.084%。矿石矿物多种特征表明,本区块矿体与 1 号区块矿体有显著差别,主要为含矿岩浆侵位后熔离成矿、矿浆贯入成矿,叠加有热液成矿作用。

③号区块面积超过岩体总面积的 50%,主要岩石为大面积的辉长岩、浅色辉长岩、斜长岩,局部有少量辉石岩。囿于研究程度较低,尚未在本区块发现有价值的铜镍矿体,仅在一出露面积不足 100 m² 的矿化蚀变体中见有明显的铜矿化,其原生硫化物大多已遭受氧化淋滤,但仍保留了原矿物形态,其粒径为 0.5~1.0 mm,个别粒径达到 2.0 mm,反映出原生矿物为海绵陨铁结构。本区块矿石矿物有黄铁矿、褐铁矿、钛铁矿、磁铁矿、尖晶石、金红石等,未见原生含铜矿石矿物。矿石矿物具交代结构、海绵陨铁结构、乳滴状结构,细脉浸染状构造、星点状构造。经镜下观察及电子探针确定该矿化蚀变体还有金矿化,为一铜金矿化体,这应该是后期热液萃取岩体中金属元素并在局部富集的结果。

2.2 矿相学特征

牛鼻子梁岩体中含有多种硫化物,其中原生硫

化物以磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿为主,表生氧化作用在局部生成少量的孔雀石、铜蓝等次生铜矿物。以上这些矿物是赋存 Cu、Ni 以及贵金属元素(PGE+Au)的主要载体。以硫化物表现出来的特征,将硫化物划分为3个成矿期。

第1期属于岩浆期,硫化物含量少,以磁黄铁矿为主,含少量镍黄铁矿和黄铜矿,分布多样。在各区块橄榄岩相、辉石岩相岩石以及块状矿石的岩屑中均可见,呈星点状、乳滴状、(稀疏)浸染状,少量海绵陨铁状。这些硫化物应为岩浆和矿浆熔离不完全而在岩浆中的残留部分。在岩浆冷却固结后较长的一段时间内,局部温度差异较小,镍黄铁矿、黄铜矿出溶相对较自由,因而镍黄铁矿和黄铜矿多在磁黄铁矿的中心或边缘出溶[图3(a)、(b)]。此类硫化物在①、②号区块中常见。

第2期属于矿浆期,硫化物含量可达80%,以磁黄铁矿为主,含少量镍黄铁矿和黄铜矿,具海绵陨铁结构、固溶体分离结构、交代溶蚀结构,块状构造。本期硫化物中普遍包裹有粒度不均一的岩屑,主要组成矿物多已蚀变为蛇纹石、滑石、伊丁石等,其原生矿物应为橄榄石和辉石。磁黄铁矿含量占本期硫化物的80%~90%,其显著特征为发育因塑性剪切而形成的变形双晶[图3(c)];镍黄铁矿大多围绕岩屑边缘[图3(d)]或者是沿岩屑间裂隙[图3(e)]呈结状[图3(f)]或链条状[图3(g)]分布,表明岩屑影响了镍黄铁矿出溶以及出溶后的分布,还可以说明在矿浆贯入前岩体已经凝固结成岩,崩碎的岩屑混入矿浆降低了局部单硫化物固溶体(MSS)的温度,使得熔点低的镍黄铁矿和熔点高的磁黄铁矿分离,因此岩屑边部常有镍黄铁矿围绕。由此可以推断,矿浆在上涌贯入岩体时,岩体已经完全固结,矿浆与岩体中崩碎的岩屑也进行了同化混染,在此过程中Ni、Cu等亲硫元素会进入硫化物熔体中,促进成矿元素的富集。黄铜矿少见,也具有围绕岩屑分布的特征[图3(h)],见有文象结构[图3(i)],应为黄铜矿出溶斑铜矿。此期硫化物多见于②号区块深部。

第3期属于热液期,硫化物种类繁多,以黄铁矿为主,少量的磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿也形成于本期。本期硫化物常沿裂隙[图3(j)]交代早期矿物,多见于①号区块。②号区块矿浆期块状矿石的岩屑中也见有星点状—细脉状热液生成的硫化物,这表明在矿浆贯入之前,岩体已遭受了至少一次的热液交代,同时也说明热液在岩体、矿体形成的整个过程中活动频繁。此类硫化物在各区块均常见。

2.3 矿石矿物晶体化学

磁黄铁矿主要见于②号区块,①号区块仅见少量,其组成见表1。通过对比发现,①号区块磁黄铁矿中Fe含量明显偏低,S含量明显偏高,Fe与S原子个数比值低,为0.71~0.84;而②号区块Fe、S含量范围较小,Fe与S原子个数比值较高,为0.97~1(表2)。其原因主要是:①号区块处于F₁断层破碎带中,遭受了长期氧化淋滤的磁黄铁矿会丢失Fe;热液阶段有雄黄生成,表明热液阶段有足量的S,热液交代作用会使被交代的磁黄铁矿S的测试含量偏高;②号区块磁黄铁矿Fe、S含量较小的变化范围反映出单硫化物固溶体从硅酸盐岩浆中熔离时的温度和压力较为稳定。

陈殿芬研究发现,磁黄铁矿中的Co、Ni含量都很高,分别为0.02%~0.15%、0.042%~1.40%, $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 为0.02~0.24,小于1,在铜镍硫化物矿床中的磁黄铁矿是富镍贫钴的矿物^[15]。①号区块磁黄铁矿中Co、Ni含量远大于陈殿芬的研究成果,而②号区块磁黄铁矿中Ni稍偏低,Co稍偏高。这表明①号区块主要被构造活化的热液交代,且在很大程度上使得磁黄铁矿中Ni、Co含量升高,②号区块主要受岩浆热液交代作用影响,其交代作用对Ni、Co含量的影响有限。②号区块中硫化物多为矿浆期生成,这表明该期单硫化物固溶体是贫镍的,致使形成的磁黄铁矿镍含量很低。部分磁黄铁矿中含有的Au应该是硫化物形成时的机械混入物。

镍黄铁矿主要元素含量见表3。其中,Ni含量为26.36%~32.08%,Fe为32.27%~36.07%,S为29.94%~33.78%。天然镍黄铁矿的Fe、Ni、S含量通常在较大范围内变动,Ni为32.57%~37.87%,Fe为27.39%~33.30%,S为32.23%~32.87%^[15]。显然,镍黄铁矿中,Ni含量偏低,Fe含量偏高。岩体中镍黄铁矿大多出溶于磁黄铁矿。由表3可知,部分矿物晶体化学式中Fe与Ni配比相对个数之和偏低(约为8)。一定程度上的类质同象会使得镍黄铁矿中Ni的相对含量偏低;其次,矿相学观察表明镍黄铁矿出溶多发生在局部,且大多镍黄铁矿并没有完全出溶,这使得镍黄铁矿中Fe含量偏高的同时在一定程度上使Ni的相对含量降低;其三,如磁黄铁矿研究所述,矿浆期单硫化物固溶体是贫镍的,致使形成的磁黄铁矿镍含量很低。值得注意的是,镍黄铁矿中Co的含量明显偏高,Co趋向于与Ni进行类质同象置换。

表 1 磁黄铁矿 X 射线电子探针分析测试结果

Tab. 1 Electron Probe X-ray Microanalyser Data of Pyrrhotite

区块编号	测试点	$w(\text{As})/\%$	$w(\text{Fe})/\%$	$w(\text{S})/\%$	$w(\text{Ni})/\%$	$w(\text{Cu})/\%$	$w(\text{Co})/\%$	$w(\text{Au})/\%$	$w_{\text{total}}/\%$	$r(\text{Fe})/r(\text{S})$	化学式
①号 区块	NS4-1		54.83	39.29	3.91	0.31	0.14	0.83	99.31	0.80	$\text{Fe}_{0.80}\text{S}$
	NS4-1-1	—	48.46	38.95	10.09	1.66	0.33	—	99.49	0.71	$\text{Fe}_{0.71}\text{S}$
	NS4-2	—	58.14	40.45	0.68	—	0.24	—	99.51	0.82	$\text{Fe}_{0.82}\text{S}$
	NS4-2-1	—	58.54	39.85	0.61	0.08	0.17	—	99.24	0.84	$\text{Fe}_{0.84}\text{S}$
②号 区块	G9-3	0.04	63.14	36.69	—	—	0.12	0.22	100.21	0.98	$\text{Fe}_{0.98}\text{S}$
	G9-4	—	62.54	36.54	—	—	0.08	0.15	99.31	0.98	$\text{Fe}_{0.98}\text{S}$
	G9-5	—	62.34	36.70	—	0.10	0.12	0.37	99.63	0.97	$\text{Fe}_{0.97}\text{S}$
	G9-7	—	62.98	36.55	—	0.06	0.09	0.35	100.03	0.98	$\text{Fe}_{0.98}\text{S}$
	G9-8	0.03	62.30	35.91	0.06	0.20	0.14	—	98.63	0.99	$\text{Fe}_{0.99}\text{S}$
	G9-9	—	62.92	36.38	0.04	—	0.13	—	99.46	0.99	$\text{Fe}_{0.99}\text{S}$
	G9-10	—	62.72	36.47	—	0.02	0.16	—	99.36	0.98	$\text{Fe}_{0.98}\text{S}$
	G9-12	—	62.13	36.80	—	—	0.13	0.40	99.46	0.96	$\text{Fe}_{0.96}\text{S}$
	G4-2	0.01	62.25	37.37	0.04	0.03	0.10	—	99.80	0.95	$\text{Fe}_{0.95}\text{S}$
	G4-4	—	62.83	36.58	—	—	0.14	0.43	99.98	0.98	$\text{Fe}_{0.98}\text{S}$
	G10-1	—	62.55	36.59	—	—	0.09	—	99.23	0.98	$\text{Fe}_{0.98}\text{S}$
	G10-2	—	62.48	36.64	0.03	—	0.12	0.13	99.40	0.97	$\text{Fe}_{0.97}\text{S}$
	G10-4	—	62.28	36.83	0.00	—	0.11	0.25	99.48	0.97	$\text{Fe}_{0.97}\text{S}$
	G10-8	0.09	62.58	35.84	—	0.07	0.14	—	98.72	1.00	FeS
	G3-1	0.31	61.88	36.61	—	—	0.13	0.25	99.18	0.97	$\text{Fe}_{0.97}\text{S}$
	G3-1-1	0.18	61.88	36.26	—	—	0.18	—	98.50	0.98	$\text{Fe}_{0.98}\text{S}$

注： $w(\cdot)$ 为元素含量； w_{total} 为元素总含量； $r(\cdot)$ 为原子个数；—表示低于检出限。

表 2 各区块磁黄铁矿组成对比

Tab. 2 Comparison of Composition of Pyrrhotites in Different Blocks

区块编号	$w(\text{Fe})/\%$	$w(\text{S})/\%$	$w(\text{Ni})/\%$	$w(\text{Cu})/\%$	$w(\text{Co})/\%$	$r(\text{Fe})/r(\text{S})$
①号区块	48.46~58.54	38.95~40.45	0.61~10.09	0.08~1.66	0.14~0.33	0.71~0.84
②号区块	61.88~63.14	35.84~37.37	0.03~0.06	0.03~0.20	0.08~0.18	0.97~1.00

表 3 镍黄铁矿 X 射线电子探针分析测试结果

Tab. 3 Electron Probe X-ray Microanalyser Data of Pentlandite

测试点	$w(\text{As})/\%$	$w(\text{Fe})/\%$	$w(\text{S})/\%$	$w(\text{Ni})/\%$	$w(\text{Cu})/\%$	$w(\text{Co})/\%$	$w(\text{Au})/\%$	$r(\text{Fe})/r(\text{Ni})$	$w_{\text{total}}/\%$	化学式
G9-11	0.08	33.40	33.44	26.36	4.37	1.44	0.89	1.33	99.99	$(\text{Fe}_{4.57}\text{Ni}_{3.48})\text{S}_8$
G10-5	—	32.27	33.74	32.08	—	1.05	—	1.06	99.14	$(\text{Fe}_{4.37}\text{Ni}_{4.20})\text{S}_8$
G10-6	—	36.07	33.78	28.36	—	1.07	—	1.34	99.28	$(\text{Fe}_{4.88}\text{Ni}_{3.71})\text{S}_8$
G3-2-2	0.12	33.34	33.07	27.17	0.00	1.72	—	1.29	95.43	$(\text{Fe}_{4.61}\text{Ni}_{3.63})\text{S}_8$
G9-13	—	34.06	31.88	29.29	0.03	1.23	—	1.22	96.49	$(\text{Fe}_{4.88}\text{Ni}_{4.06})\text{S}_8$
G4-1	0.01	33.31	29.94	26.93	0.35	1.04	—	1.30	91.58	$(\text{Fe}_{5.09}\text{Ni}_{3.97})\text{S}_8$

注：—表示低于检出限。

3 讨 论

3.1 硫饱和机制

世界级铜镍硫化物矿床研究表明,岩浆型铜镍

硫化物矿床形成的关键在于岩浆中的 S 达到饱和并与亲铜元素结合形成硫化物,随之硫化物溶体从硅酸盐岩浆中熔离出来,在一定空间内与足够的硅酸盐岩浆混合使亲铜元素含量提高,并保存于合适的

空间^[16]。富铁熔浆的硫化作用将会导致硫化物与硅酸盐熔浆的不混融,从而形成矿浆^[17]。因此,S的活度和溶解度是岩浆硫化物矿床最直接的控矿因素。岩浆中硫饱和机制的认识主要有:地壳混染、岩浆的结晶分异以及地壳硫的加入^[18-21]。对于岩浆型Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床来说,硫饱和的机制可以是一种,也可以是多种。

3.1.1 同化混染

野外宏观以及镜下微观观察表明,岩体与围岩发生了强烈的同化混染作用。岩体与金水口岩群的同化混染作用会增加SiO₂活度,降低岩浆中硫达到饱和点的溶解度,促进岩浆中硫达到饱和,从而使其熔离。块状矿石中矿浆与岩屑的同化混染作用会在一定程度上富集成矿金属元素,促进硫化物矿浆与岩浆的分离。

3.1.2 分离结晶

牛鼻子梁岩体岩浆分异充分,大多数岩石为堆晶岩,相带清楚。斜长二辉橄榄岩、斜长单辉橄榄岩、角闪二辉橄榄岩、角闪橄榄岩主要由堆晶相组成,角闪橄榄二辉岩、黑云母化二辉岩、角闪辉石岩、橄榄辉石角闪石岩、角闪橄榄辉长岩和辉长岩是适度演化的岩浆形成的,石英闪长岩和英云闪长岩是岩浆充分演化的产物。在岩浆演化过程中,橄榄石、辉石、斜长石、角闪石等矿物发生了显著的分离结晶作用,其中橄榄石、辉石的分离结晶作用会急剧降低岩浆中的Fe²⁺活度,增加SiO₂活度,从而降低硅酸盐岩浆中硫达到饱和点的溶解度,促进岩浆中硫达到饱和而使其熔离。

由此可见,以分离结晶作用为主导的岩浆分异和严重的同化混染作用共同导致了牛鼻子梁岩体的硫化物熔离与成矿。

3.2 物质来源

硫同位素在研究成矿物质来源以及矿床成因等方面都起着重要作用。所采集的5件硫化物样品在北京核工业地质研究所采用MAT-251进行单硫化物硫同位素测试,其结果见表4。

从表4可以看出,除样品NS-5外,其余4件样品硫同位素组成($\delta(^{34}\text{S})$)变化范围很窄小,均在 2.8×10^{-3} 以下。一般认为自然界硫同位素组成最稳定的载体是陨石,其 $\delta(^{34}\text{S})$ 变化范围很小,只有 $\pm 3 \times 10^{-3}$,通常以陨石硫同位素组成代表地球原始硫同位素组成。国内外众多岩浆铜镍硫化物矿床的研究结果表明,若上地幔中的硫仍保持着地球硫的原始状态,未发生过明显分馏,则硫同位素成分应与

表4 硫同位素组成分析结果

Tab. 4 Analysis of Sulfur Isotope Composition

序号	样品编号	硫化物	$\delta(^{34}\text{S})/10^{-3}$
1	NS-1	黄铁矿	-1.4
2	NS-2	胶黄铁矿	-1.8
3	NS-3	胶黄铁矿	-0.1
4	NS-4	胶黄铁矿	-2.8
5	NS-5	黄铁矿	-8.4

注: $\delta(^{34}\text{S})$ 是相对于国际标准V-CDT值得来的。

陨石硫相近。金川矿床 $\delta(^{34}\text{S})((-2.60 \sim 3.07) \times 10^{-3})$ ^[22]、红旗岭3号岩体 $\delta(^{34}\text{S})((-1.7 \sim 0.3) \times 10^{-3})$ ^[23]、红旗岭7号岩体 $\delta(^{34}\text{S})((-2.8 \sim 1.94) \times 10^{-3})$ ^[24]和喀拉通克矿床 $\delta(^{34}\text{S})((-2.50 \sim 3.0) \times 10^{-3})$ ^[25]均接近上地幔 $((-3 \sim 3) \times 10^{-3})$ ^[26],表明这些矿床中的硫均源于上地幔。对于牛鼻子梁岩体来说,除样品NS-5外,其余4件样品的 $\delta(^{34}\text{S})((-1.4 \sim -2.8) \times 10^{-3})$ 与陨石硫相近,因此可以推断牛鼻子梁岩体中的硫主要源于幔源岩浆。样品NS-5的 $\delta(^{34}\text{S})$ 为 -8.4×10^{-3} ,较其他硫化物差异很大,考虑围岩是一套高级变质岩(一般 $\delta(^{34}\text{S})$ 为 $(-20 \sim 20) \times 10^{-3}$)^[27],且野外观察和镜下研究均表明岩体和围岩发生了强烈的同化混染,因此,应有少量硫来自于围岩或深循环地下水。

3.3 成矿过程

根据牛鼻子梁岩体中3个成矿期硫化物分布特点,矿床至少经历了4个成矿阶段:第1阶段主要为星点状—(稀疏)浸染状分布的矿化体,是含矿岩浆上涌而成;第2阶段主要为位于海拔3100 m左右的层状矿体,为含矿岩浆熔离-矿浆贯入型矿床,形成浸染状、海绵陨铁状和块状矿石;第3阶段主要为位于海拔2800~2900 m的层状矿体,为岩浆熔离-贯入型矿床,形成浸染状、海绵陨铁状和块状矿石,因距离断层较近,因此形成的矿体受到的热液交代作用更广泛;第4阶段主要为岩浆演化的残余热液对岩体或者矿体进行交代形成的叠加矿体。包裹在块状矿石中的岩屑含有少量海绵陨铁状的硫化物,并且硫化物具热液交代蚀变特征;因此,在矿浆贯入前至少发生了一次热液交代作用,热液交代活动频繁且广泛。

牛鼻子梁层状岩体的堆晶层理可以划分出多个堆晶韵律和旋回,表明该岩体是由多批次的岩浆贯入形成。与此相对应,成矿过程也表现为多阶段性。由此证明,在该岩体下面应该有一个中间岩浆房。在该岩浆房内及从该岩浆房向终端岩浆房(岩体体现

存的空间)上侵的过程中,以及进入终端岩浆房之后,原本均匀的岩浆分异成为不含矿岩浆(以镁铁质岩浆为主)、含矿岩浆(以固结后形成橄榄岩的超镁铁质岩浆为主)和矿浆。这些具有不同化学组成的液态物质多批次上侵,形成了层状岩体和层状矿体。成矿过程具有多阶段性的最直接证据是一些块状矿石中含有超镁铁岩角砾。超镁铁岩固结并经构造作用而破碎之后,矿浆才贯入;因此,岩体与矿体的形成过程都具有多阶段脉动式特点,而非连续过程。

4 结 语

(1)牛鼻子梁岩体为镁铁质—超镁铁质层状岩体,堆晶结构与堆晶层理发育,具多个堆晶韵律与旋回,岩石类型丰富,具有橄榄岩相、辉石岩相和辉长岩相等多种岩石类型。岩浆富水且经历了以分离结晶为主导的分异演化过程。

(2)岩浆与围岩之间经历了严重的同化混染作用。

(3)牛鼻子梁岩体中硫化物分布特点表明,矿床至少经历了 3 个成矿期和 4 个成矿阶段。

(4)硫同位素分析表明,成矿物质主要来源于上地幔。牛鼻子梁矿床为一深部熔离—贯入式矿床。

(5)岩浆自身的分异演化与同化混染作用共同导致了硫化物熔离;成矿过程具有明显的多期多阶段性,而非连续过程。

参考文献:

References:

- [1] 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(1): 24-47.
TANG Zhong-li. Classification and Geological Contrastable Significance of Super Large Magmatic Sulfide Deposits[J]. Acta Geologica Gansu, 1992, 1(1): 24-47.
- [2] 汤中立, 李文渊. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
TANG Zhong-li, LI Wen-yuan. Metallogenic Models and Geology Comparison of Jinchuan Cu-Ni Sulphide (Bearing-PGE) Deposits [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995.
- [3] 汤中立. 中国岩浆硫化物矿床的主要类型[J]. 甘肃地质学报, 1996, 5(1): 45-49.
TANG Zhong-li. Main Types of Magmatic Sulfide Deposits in China[J]. Acta Geologica Gansu, 1996, 5(1): 45-49.
- [4] 汤中立. 超大型 Ni-Cu(Pt) 岩浆矿床的划分与找矿[J]. 地质与勘探, 2002, 38(3): 1-7.
TANG Zhong-li. Dividing and Prospecting for Super-large Scale Ni-Cu(Pt) Magmatic Sulfide Deposits[J]. Geology and Prospecting, 2002, 38(3): 1-7.
- [5] 汤中立. 中国的小岩体岩浆矿床[J]. 中国工程科学, 2002, 4(6): 9-12.
TANG Zhong-li. Magmatic Ore Deposits in Small Rockbody in China [J]. Engineering Science, 2002, 4(6): 9-12.
- [6] 汤中立. 中国镁铁、超镁铁岩浆矿床成矿系列的聚集与演化[J]. 地学前缘, 2004, 11(1): 113-119.
TANG Zhong-li. The Accumulation and Evolution of Metallogenic Series of the Mafic-ultramafic Magmatic Deposits in China[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(1): 113-119.
- [7] 汤中立, 钱壮志, 姜常义, 等. 中国镍铜铂族岩浆硫化物矿床与成矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
TANG Zhong-li, QIAN Zhuang-zhi, JIANG Chang-yi, et al. Magmatic Ni-Cu-PGE Sulphide Deposits and Metallogenic Prognosis in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.
- [8] 汤中立, 闫海卿, 焦建刚, 等. 中国小岩体镍铜(铂族)矿床的区域成矿规律[J]. 地学前缘, 2007, 14(5): 92-103.
TANG Zhong-li, YAN Hai-qing, JIAO Jian-gang, et al. Regional Metallogenic Controls of Small-intrusion-hosted Ni-Cu(PGE) Ore Deposits in China[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(5): 92-103.
- [9] 汤中立, 钱壮志, 姜常义, 等. 岩浆硫化物矿床勘查研究的趋势与小岩体成矿系统[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(1): 1-9.
TANG Zhong-li, QIAN Zhuang-zhi, JIANG Chang-yi, et al. Trends of Research in Exploration of Magmatic Sulfide Deposits and Small Intrusions Metallogenic System[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(1): 1-9.
- [10] 许成, 黄智龙, 刘丛强, 等. 铂族元素地球化学研究评述[J]. 地学前缘, 2003, 10(4): 520-528.
XU Cheng, HUANG Zhi-long, LIU Cong-qiang, et al. Review on Geochemistry of Platinum-group Elements [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(4): 520-528.
- [11] NALDRETT A J. Magmatic Sulfide Deposits[M]. Oxford: Clarendon Press, 1989.
- [12] NALDRETT A J, SINGH J, KRSTIC S, et al. The Mineralogy of the Voisey's Bay Ni-Cu-Co Deposit, Northern Labrador, Canada: Influence of Oxidation State on Textures and Mineral Compositions[J]. Economic Geology, 2000, 95(4): 889-900.

- [13] NALDRETT A J, LIGHTFOOT P C, FEDORENKO V, et al. Geology and Geochemistry of Intrusions and Flood Basalts of the Noril'sk Region USSR, with Implication for the Origin of the Ni-Cu Ores[J]. *Economic Geology*, 1992, 87(4): 975-1004.
- [14] 姜常义, 夏昭德, 凌锦兰, 等. 寄主岩浆硫化物和氧化物矿床的镁铁质—超镁铁质岩体对比分析与成矿过程评述[J]. *岩石学报*, 2011, 27(10): 3005-3020.
JIANG Chang-yi, XIA Zhao-de, LING Jin-lan, et al. Comparison of Host Magmatic Sulphide and Oxide Deposits of Mafic-ultramafic Intrusions and Review the Mineralizing Process[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(10): 3005-3020.
- [15] 陈殿芬. 我国一些铜镍硫化物矿床主要金属矿物的特征[J]. *岩石矿物学杂志*, 1995, 14(4): 345-354.
CHEN Dian-fen. Characteristics of Main Metallic Minerals in Some Copper-nickel Sulfide Deposits of China[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1995, 14(4): 345-354.
- [16] NALDRETT A J. Magmatic Sulfide Deposits: Geology, Geochemistry and Exploration[M]. Berlin: Springer, 2004.
- [17] 罗照华, 马拉库舍夫 A A, 潘妮亚 H A, 等. 铜镍硫化物矿床的成因——以诺里尔斯克(俄罗斯)和金川(中国)为例[J]. *矿床地质*, 2000, 19(4): 330-339.
LUO Zhao-hua, MARAKUSHEV A A, PARNIAKH H A, et al. The Origin of Copper-nickel Sulfide Deposits—Exemplified by Norilsk(Russia) and Jinchuan(China)[J]. *Mineral Deposits*, 2000, 19(4): 330-339.
- [18] LI C, NALDRETT A J. High Chlorine Alteration Minerals and Calcium-rich Brines in Fluid Inclusions from the Strathcona Deep Copper Zone, Sudbury, Ontario[J]. *Economic Geology*, 1993, 88(7): 1780-1796.
- [19] RIPLEY E M. Systematics of Sulfur and Oxygen Isotopes in Mafic Igneous Rocks and Related Cu-Ni-PGE Mineralization[C] // KEAYS R R, LESHER C M, LIGHTFOOT P C, et al. Dynamic Processes in Magmatic Ore Deposits and Their Application to Mineral Exploration. Toronto: Geological Association of Canada, 1999: 111-158.
- [20] LI C S, RIPLEY E M. Empirical Equations to Predict the Sulfur Content of Mafic Magmas at Sulfide Saturation and Applications to Magmatic Sulfide Deposits[J]. *Mineralium Deposita*, 2005, 40(2): 218-230.
- [21] 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.
- [22] 杨合群. 金川铜镍矿床硫同位素地球化学[J]. *西北地质*, 1989(2): 20-23.
YANG He-qun. Sulfur Isotope Geochemistry of Jinchuan Copper-nickel Deposit[J]. *Northwestern Geology*, 1989(2): 20-23.
- [23] 董国振, 叶满华, 戴晓光, 等. 吉林红旗岭矿区3号岩体铜镍硫化物矿床岩石学和地球化学特征研究[J]. *矿产勘查*, 2012, 3(3): 297-304.
DONG Guo-zhen, YE Man-hua, DAI Xiao-guang, et al. Petrology and Geochemistry Characteristics of the Cu-Ni Sulfide Deposits of the 3rd Rocks in Hongqiling Area, Jilin[J]. *Mineral Exploration*, 2012, 3(3): 297-304.
- [24] 刘 默. 吉林红旗岭铜镍硫化物矿床地质特征及成因研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
LIU Mo. Studies on Geological Characteristics and Genesis of Cu-Ni Sulphide Deposit in Hongqiling of Jilin[D]. Changchun: Jilin University, 2005.
- [25] 孙 涛, 钱壮志, 党新生, 等. 喀拉通克铜镍矿床硫同位素组成特征及其地质意义[J]. *地球科学与环境学报*, 2010, 32(4): 344-349.
SUN Tao, QIAN Zhuang-zhi, DANG Xin-sheng, et al. Characteristics of Sulfur Isotope in Kalatongke Cu-Ni Deposit and Its Geological Significance[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2010, 32(4): 344-349.
- [26] CHAUSSIDON M, LORAND J P. Sulphur Isotope Composition of Orogenic Spinel Iherzolite Massifs from Ariege(North-eastern Pyrenees, France): An Ion Microprobe Study[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54(10): 2835-2846.
- [27] WHITE W M. *Geol. 656 Isotope Geochemistry*[R]. Ithaca: Cornell University, 2003.