

# 大兴安岭北段霍洛台铜(钼)矿床黄铁矿和黄铜矿地球化学特征及其地质意义

陶善夫<sup>1</sup>,肖启亮<sup>2\*</sup>,孙志远<sup>1</sup>,孙永刚<sup>1</sup>,李焕纪<sup>1</sup>,李晓林<sup>1</sup>,陈旭升<sup>3</sup>

(1. 宿州学院资源与土木工程学院; 2. 四川省第八地质大队; 3. 黑龙江省齐齐哈尔地质勘查院)

**摘要:**霍洛台铜(钼)矿床作为大兴安岭北段新发现的斑岩型铜矿床,关于其主要金属硫化物(黄铁矿和黄铜矿)的研究相对薄弱,限制了对成矿环境和矿床成因的认识。以霍洛台铜(钼)矿床中的黄铁矿和黄铜矿为研究对象,对其进行电子探针分析。电子探针分析结果显示:黄铁矿中As和Ni元素可能以矿物包裹体形式存在,Co和Mo元素可能以类质同象形式存在;黄铜矿中Zn和Mo元素可能以矿物包裹体形式存在,As和Co元素可能以类质同象形式存在。黄铁矿与黄铜矿的S和Fe含量均低于理论值,整体表现为贫Fe贫S特征。黄铁矿 $w(S)/w(Fe)$ 值为1.181~1.216,大于1.148,说明其形成于硫逸度较高的环境。黄铜矿 $[n(Cu)+n(Fe)]/n(S)$ 平均值为0.941,推断黄铜矿的形成温度接近200℃,表明黄铜矿等金属硫化物很可能在中温热液环境下形成。黄铁矿的 $\delta Fe$ 和 $\delta S$ 分别为-0.095~-0.050和-0.044~-0.007, $w(S)/w(Se)$ 值为 $0.128 \times 10^4 \sim 0.241 \times 10^4$ ,指示黄铁矿为岩浆热液成因。

**关键词:**大兴安岭北段;霍洛台;黄铁矿;黄铜矿;电子探针;岩浆热液成因;铜(钼)矿床

中图分类号:TD11 P574.2

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)07-0104-09

doi:10.11792/hj20250716

## 引言

斑岩型矿床在全球铜和钼生产中占据主导地位,提供约60%的铜和95%的钼产量<sup>[1]</sup>。此类矿床也是金、银、锌、锡和钨等金属的重要来源。在中国,大兴安岭地区是关键的矿产勘探区之一,其内的许多矿床与岩浆活动具有密切联系,成矿类型主要包括斑岩型、矽卡岩型和浅成低温热液型<sup>[2-3]</sup>。作为大兴安岭成矿带的重要组成部分,大兴安岭北段蕴藏众多斑岩型矿床,如多宝山铜(钼)矿床、铜山铜(钼)矿床和八大关铜(钼)矿床、霍洛台铜(钼)矿床等<sup>[4-6]</sup>。前人对斑岩型矿床的研究较为全面,覆盖了成矿地质环境、成矿年代学、地球化学特征、成矿流体性质及成因机理等多个方面<sup>[7-16]</sup>。然而,对于该区近年来新发现的晚侏罗世斑岩型铜矿床金属硫化物的研究相对薄弱。

硫化物是一种普遍存在的矿物类型。目前,对其进行定性分析的技术如电子探针分析已相对成熟。硫化物的主要特点包括成分复杂、高硫含量、稳定性较差及标准样品稀少等<sup>[17]</sup>。这些特性使得对其进行定量分析颇具挑战。然而,随着分析技术的持续发

展,用于硫化物的定量分析方法也在不断优化<sup>[18]</sup>。电子探针(EPMA)分析能对样品的微米级区域进行定性和定量化学分析。此技术支持点分析、线扫描(获取成分线性分布)和面扫描(生成成分二维分布图),这些功能使其能有效识别样品的非均质性,并支持自动化批量分析。电子探针分析的主要特性包括检测限达100 μg/g,可适用于微区分析;样品无损伤,不被污染,极大地减少样品的使用数量;操作快捷方便,灵敏度高,可分析元素范围广泛<sup>[19-22]</sup>。

黄铁矿和黄铜矿是霍洛台铜(钼)矿床分布最为广泛的金属硫化物,但对这些金属硫化物成因的研究十分薄弱,限制了对成矿环境和矿床成因的认识。因此,以霍洛台铜(钼)矿床主要金属硫化物(黄铁矿和黄铜矿)为研究对象,对黄铁矿和黄铜矿进行电子探针分析,进而探讨微量元素的赋存形式和矿床的成矿环境,为确定矿床成因类型提供理论支持。

## 1 区域地质概况

中国东北地区位于中亚造山带东部,由4个地块构成,分别为额尔古纳地块、兴安地块、松嫩—张广才

收稿日期:2025-02-15;修回日期:2025-04-19

基金项目:安徽省教育厅高校自然科学重点科研项目(2024AH051826,2024AH051827);宿州学院2022年博士科研启动基金项目(2022BSK009);宿州学院大学生创新创业训练计划项目(ZCXM24-238)

作者简介:陶善夫(2005—),男,大学本科,研究方向为岩石地球化学;E-mail:2480431406@qq.com

\*通信作者:肖启亮(1987—),男,高级工程师,从事区域地质调查和矿产勘查工作;E-mail:363897158@qq.com

岭地块和佳木斯地块,它们通过新林—喜桂图、贺根山—黑河和牡丹江—依兰 3 个缝合带分隔<sup>[23]</sup>(见图 1)。显生宙时期,中国东北地区的地质特征受 3 个主要构造域影响:古亚洲洋、蒙古—鄂霍茨克洋和古太平洋。该地区受到多次板块俯冲和大陆碰撞的影响,因而频繁发生造山、构造和岩浆活动<sup>[10,24-25]</sup>。大兴安岭处于中国东北地区的西部,由 3 个地块构成,分别为松嫩—张广才岭地块西部、兴安地块及额尔古纳地块<sup>[26]</sup>。

大兴安岭北段(见图 2)的地质历史主要经历了 4 个关键阶段,按时间的先后顺序为前寒武纪、古生代、中生代、新生代,其对应的地质过程分别为基底形成、海洋沉积、陆相碎屑岩沉积和板内火山活动<sup>[27]</sup>。该地区主要发育浅成低温热液型和造山型金矿床、矽卡岩型铅—锌矿床、斑岩型铜—钼矿床和斑岩型钼矿床。最近,在大兴安岭北段,特别是漠河和黑河地带,斑岩型铜—钼矿床的勘探活动获得了突破性进展,发现了多处晚中生代斑岩型铜(钼)矿床,包括富克山、小柯勒河、霍洛台及 770 等具有较大规模的矿床<sup>[28-33]</sup>。

## 2 矿床地质特征

### 2.1 矿床地质特征和矿体特征

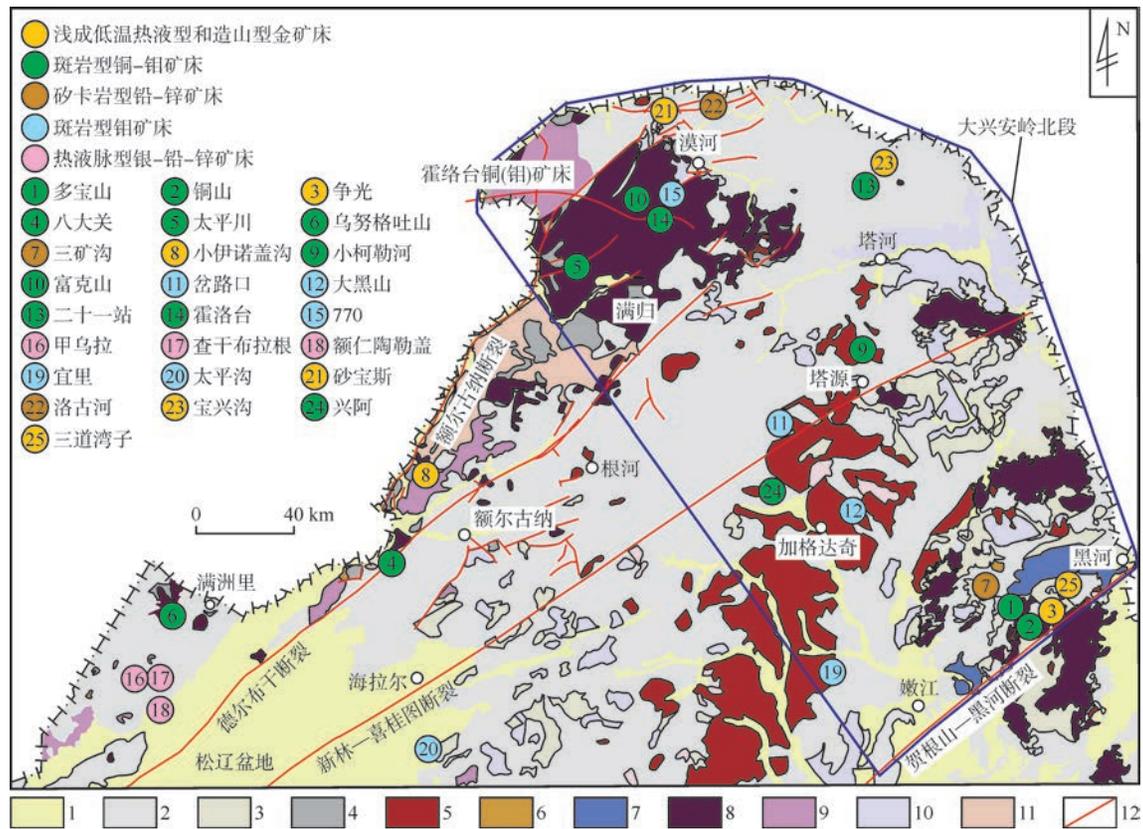
霍洛台铜(钼)矿床位于黑龙江省漠河市南西约 50 km 处。矿区出露地层仅为第四系(见图 3-a),发育北北西向霍洛台河断裂,岩浆岩可分为成矿前、成矿期和成矿后 3 个阶段。成矿前岩浆岩主要为中细粒二长花岗岩,成矿期岩浆岩以花岗闪长斑岩为主,成矿后岩浆岩则包括闪长玢岩、花岗斑岩及石英闪长斑岩脉(见图 3-b)。

矿区共发现 66 条铜(钼)矿体,平面上呈条带状/透镜状,南北向展布,倾向约 90°,倾角 20°~35°,平均



图 1 中国东北地区大地构造位置图

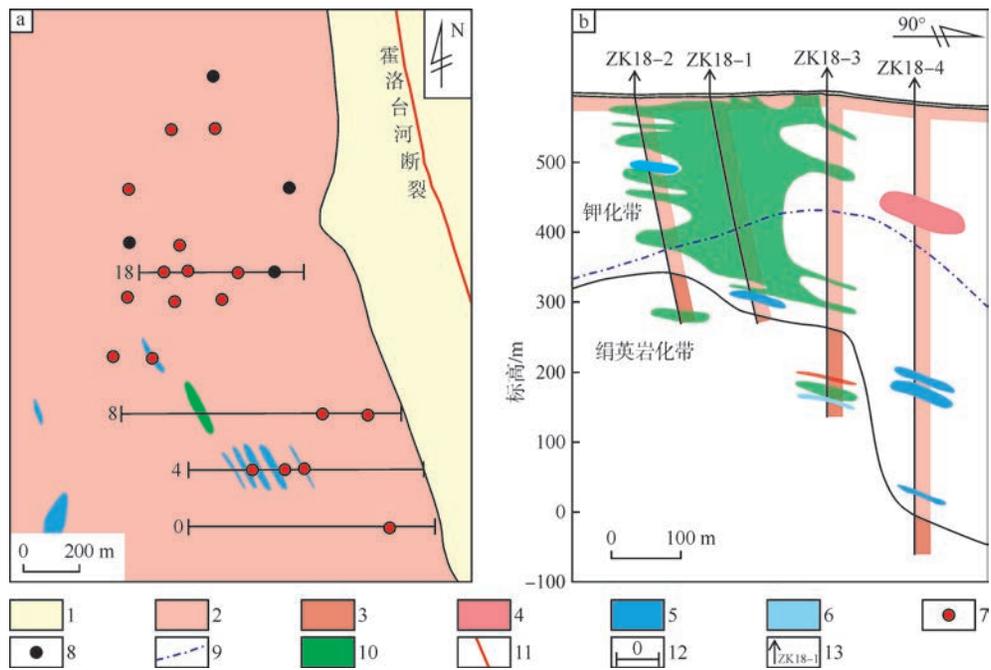
Fig. 1 Geotectonic location map of northeastern China



1—新生界地层 2—中生界地层 3—古生界地层 4—新元古界地层 5—白垩纪花岗岩 6—晚侏罗世花岗岩 7—中侏罗世花岗岩 8—晚三叠世—早侏罗世花岗岩 9—早—中三叠世花岗岩 10—古生代花岗岩 11—新元古代花岗岩 12—断裂

图 2 大兴安岭北段地质简图

Fig. 2 Geological sketch map of the northern segment of the Greater Khingan Mountains



1—第四系 2—中细粒二长花岗岩 3—花岗闪长斑岩 4—花岗斑岩脉 5—闪长玢岩脉 6—石英闪长斑岩脉 7—矿化钻孔 8—未见矿钻孔  
9—蚀变界线 10—铜(钼)矿化体( $w(\text{Cu}) > 0.1\%$ ,  $w(\text{Mo}) > 0.03\%$ ) 11—断裂 12—勘探线及编号 13—剖面钻孔及编号

图3 霍洛台铜(钼)矿区地质图(a)及地质剖面图(b)

Fig. 3 Geological map (a) and geological profile (b) of the Huoluotai Cu (Mo) District

厚度约3 m,推断工业铜金属资源量2 452 t,平均铜品位0.485%;工业钼金属资源量126 t,平均钼品位0.085%。

## 2.2 围岩蚀变及分带

通过深入的野外实地勘查和蚀变矿物组合特征分析,在矿区发现并识别出3种主要蚀变类型,按时间顺序划分依次为钾化、绿泥石-绿帘石化和绢英岩化。根据蚀变类型及分布特点,可以将蚀变带从矿区中心向外围划分为钾化带和绢英岩化带,并且蚀变带的分布主要围绕花岗闪长斑岩。热液蚀变的形成与花岗闪长斑岩关系紧密。值得注意的是,虽然有存在青磐岩化带的可能性,但由于该带大部分已遭到剥蚀,目前露出的青磐岩化带十分有限。

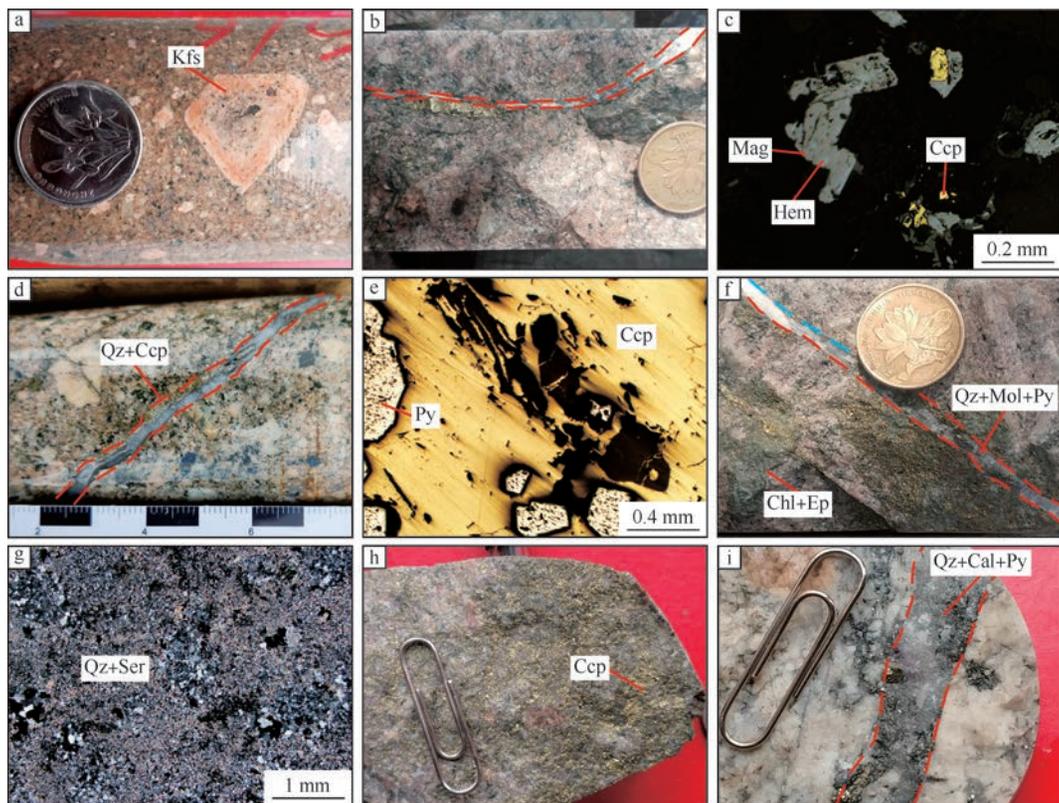
钾化蚀变特征主要表现为钾长石和次生黑云母。其中,钾长石呈粉红色(见图4-a)。在钾化蚀变带内,磁铁矿、黄铜矿、赤铁矿是主要金属矿物,仅含少量的辉钼矿(见图4-b~f)。磁铁矿通常以浸染状或与石英、黄铜矿共同形成的细脉状形式存在<sup>[34]</sup>(见图4-b)。铜矿体主要富集在钾化带内,其中,黄铜矿常以浸染状、团块状或与石英共同形成的脉状出现(见图4-d、f)。在局部区域,钾化蚀变与绿帘石化或绿帘石化蚀变叠加,形成了更为复杂的蚀变类型(见图4-f)。绢英岩化蚀变特征表现为绢云母和次生石英的形成(见图4-g)。在绢英岩化带内,发育的主要金属

矿物包括黄铁矿、黄铜矿和辉钼矿(见图4-h、i)。黄铜矿在该带内分布形式为浸染状,辉钼矿则多为浸染状或与石英、黄铁矿及黄铜矿共同形成脉状结构(见图4-f)。

## 2.3 成矿阶段划分

基于矿脉间的矿物组合、穿插关系和热液蚀变类型,将霍洛台铜(钼)矿床的热液成矿期按时间顺序划分为4个阶段(见图5),分别为:石英-贫硫化物阶段(成矿I阶段)、石英+黄铜矿±黄铁矿±辉钼矿阶段(成矿II阶段)、石英-多金属硫化物阶段(成矿III阶段)、石英+方解石±黄铁矿±萤石阶段(成矿IV阶段)。

石英-贫硫化物脉数量在成矿I阶段发育较少,且这些矿脉与其他阶段矿脉没有明显的穿切关系,主要分布在钾化蚀变带内。铜矿物主要形成于成矿II阶段,矿脉呈连续、不规则分布,主要由石英构成,硫化物包括辉钼矿、黄铁矿和黄铜矿,该阶段的矿化位置与成矿I阶段的矿化位置基本相同,位于钾化蚀变带内。成矿III阶段矿脉一般连续、平直分布,主要由石英构成,硫化物主要包括黄铜矿和少量的黄铁矿、辉钼矿,成矿III阶段矿化一般与绢英岩化蚀变有关。成矿IV阶段矿脉通常呈不规则分布,主要由石英和方解石构成,次要矿物为萤石,黄铁矿是观察到的唯一硫化物<sup>[35]</sup>。



a—发育钾化蚀变的花岗闪长斑岩 b—成矿 I 阶段石英-贫硫化物脉(钾化花岗闪长斑岩中) c—成矿 I 阶段他形磁铁矿和少量他形黄铜矿、赤铁矿  
d—成矿 II 阶段石英+黄铜矿细脉 e—半自形黄铁矿和他形黄铜矿 f—绿泥石+绿帘石化蚀变叠加于钾化蚀变之上,成矿 III 阶段石英+辉钼矿+黄铁矿  
细脉穿切绿泥石+绿帘石化蚀变和钾化蚀变 g—石英和绢云母是绢英岩化蚀变的矿物组合 h—绢英岩化带内浸染状黄铜矿  
i—成矿 IV 阶段石英+方解石+萤石+黄铁矿细脉 Qz—石英 Kfs—钾长石 Chl—绿泥石 Ep—绿帘石 Ser—绢云母 Cal—方解石  
Hem—赤铁矿 Mag—磁铁矿 Mol—辉钼矿 Ccp—黄铜矿 Py—黄铁矿

图 4 霍洛台铜(钼)矿床热液蚀变和矿化特征

Fig. 4 Hydrothermal alteration and mineralization characteristics of the Huoluotai Cu (Mo) Deposit

矿物	热液成矿期				表生氧化期
	成矿 I 阶段	成矿 II 阶段	成矿 III 阶段	成矿 IV 阶段	
磁铁矿	—				
赤铁矿	—				
黄铁矿	—	—	—	—	
黄铜矿	—	—	—	—	
辉钼矿		—	—	—	
闪锌矿			—	—	
方铅矿			—	—	
石英	—	—	—	—	
钾长石	—	—	—		
黑云母	—	—	—		
绢云母		—	—	—	
绿泥石		—	—	—	
绿帘石		—	—		
伊利石		—	—	—	
方解石				—	
萤石				—	
孔雀石					—
蓝铜矿					—

— 大量    — 少量    - - 极少量

图 5 霍洛台铜(钼)矿床成矿阶段及矿物生成顺序

Fig. 5 Metallogenic stages and mineral paragenesis sequence of the Huoluotai Cu (Mo) Deposit

### 3 样品采集与分析方法

#### 3.1 样品采集

本次研究的金属硫化物(黄铁矿和黄铜矿)样品均采自霍洛台铜(钼)矿床 ZK18-1 和 ZK18-3 钻孔,处于石英+黄铜矿±黄铁矿±辉钼矿脉(成矿 II 阶段)中,共采集样品 6 件。

#### 3.2 电子探针分析

电子探针分析工作在武汉上谱分析科技有限责任公司完成,使用的设备型号为 JXA8230,由日本电子公司(JEOL)生产。采用电子探针波谱仪定性分析了样品中的主要元素,查明了重叠干扰元素的种类及含量范围,在此基础上先后选择 15 kV 和 20 kV 加速电压,10 nA 和 20 nA 束流,1 μm 束斑,对部分样品区域进行预分析。分析发现,样品硬度比较低,20 kV 加速电压和 20 nA 束流下样品损伤严重,剥蚀坑显著。综合考虑样品特性及分析元素范围,选定测试硅酸盐时电流为  $2 \times 10^{-8}$  A,加速电压为 15 kV,束斑直径为 1~3 μm,各元素检出限为 150~350 μg/g,定量分析总量允许偏差小于 3%,实验室实际测试误差小于

1%。采样时间: peak 10 s、back 5 s、peak 30 s、back 15 s。金属硫化物的测试电流为 $5 \times 10^{-8}$  A,束斑直径为1  $\mu\text{m}$ ,其余测试条件和硅酸盐测试条件相同。硅酸盐矿物各元素含量校正标样均为天然矿物,部分金属及硫化物元素含量校正标样为纯物质,其余为天然矿物标样。

### 3.3 分析结果

#### 3.3.1 黄铁矿

黄铁矿电子探针分析结果见表1。由表1可知:黄铁矿  $w(\text{Fe})$  为 42.143% ~ 44.227%, 平均值为 43.404% ;

$w(\text{S})$  为 51.117% ~ 53.095%, 平均值为 51.890% ;  $w(\text{Zn})$  为 0.028% ~ 0.049%, 平均值为 0.036% ;  $w(\text{As})$  为 0.046% ~ 0.063%, 平均值为 0.054% ;  $w(\text{Ni})$  为 0.002% ~ 0.006%, 平均值为 0.005% ;  $w(\text{Co})$  为 0.071% ~ 0.092%, 平均值为 0.081% ;  $w(\text{Mo})$  为 0.623% ~ 0.655%, 平均值为 0.639% 。

#### 3.3.2 黄铜矿

黄铜矿电子探针分析结果见表2。由表2可知:黄铜矿  $w(\text{Fe})$  为 29.164% ~ 29.699%, 平均值为 29.439% ;  $w(\text{S})$  为 33.738% ~ 34.409%, 平均值为

表1 黄铁矿电子探针分析结果

Table 1 Electron probe analysis results of pyrite

元素	ZK18-1-EP1-1	ZK18-1-EP1-2	ZK18-1-EP1-3	ZK18-1-EP1-4
Fe	42.143	44.227	43.280	43.965
Bi	—	—	—	—
Pb	—	—	0.098	—
Zn	—	0.032	0.028	0.049
Ag	—	—	—	—
S	51.235	53.095	51.117	52.113
Th	0.023	0.057	0.017	—
Te	0.002	—	0.001	—
Re	—	—	—	—
Se	—	0.022	0.04	—
As	0.046	0.063	0.049	0.058
Ge	—	—	0.027	0.030
Ni	0.002	0.005	0.005	0.006
Au	—	—	—	0.025
Hg	—	—	—	—
Co	0.092	0.071	0.088	0.072
Sb	0.005	0.003	0.005	—
Cu	—	0.001	0.012	0.007
Mo	0.655	0.623	0.641	0.636
$w(\text{S})/w(\text{Fe})$	1.216	1.201	1.181	1.185

34.050% ;  $w(\text{Cu})$  为 29.842% ~ 30.282%, 平均值为 30.026% ;  $w(\text{Pb})$  为 0.017% ~ 0.176%, 平均值为 0.117% ;  $w(\text{Zn})$  为 0.016% ~ 0.039%, 平均值为 0.027% ;  $w(\text{Th})$  为 0.019% ~ 0.032%, 平均值为 0.027% ;  $w(\text{Se})$  为 0.016% ~ 0.054%, 平均值为 0.032% ;  $w(\text{As})$  为 0.012% ~ 0.075%, 平均值为 0.047% ;  $w(\text{Co})$  为 0.006% ~ 0.079%, 平均值为 0.047% ;  $w(\text{Mo})$  为 0.441% ~ 0.498%, 平均值为 0.471% 。

## 4 讨论

### 4.1 微量元素赋存形式

在硫化物中,可以通过与主量元素的关联性来判断微量元素的赋存形式,主要分为3种类型:类质同象、矿物包裹体及多种形式赋存。这些类型分别与负相关性、正相关性和无相关性相对应<sup>[36-38]</sup>。在研究霍洛台铜(钼)矿床中黄铁矿的微量元素分布时,分析了黄铁矿中主量元素与微量元素间的相关性,结果见图6。由图6可知:黄铁矿中As和S呈现正相关,Co

表 2 黄铜矿电子探针分析结果

Table 2 Electron probe analysis results of chalcopyrite

%

元素	ZK18-3-EP1-1	ZK18-3-EP1-2	ZK18-3-EP2-1	ZK18-1-EP1-1	ZK18-1-EP1-2	ZK18-2-EP2-1
Fe	29.699	29.225	29.164	29.378	29.556	29.612
Bi	—	—	—	—	—	—
Pb	0.176	0.134	0.017	0.126	0.151	0.097
Zn	0.016	0.020	0.039	0.021	0.034	0.029
Ag	—	0.006	—	0.001	0.003	—
S	33.738	33.861	34.409	33.911	34.231	34.148
Th	0.032	0.032	0.027	0.019	0.029	0.025
Te	—	—	—	—	—	—
Re	—	—	0.018	—	—	0.009
Se	0.016	0.030	0.054	0.048	0.021	0.020
As	0.051	0.075	0.012	0.061	0.034	0.046
Ge	—	—	0.018	0.014	—	0.010
Ni	—	—	—	—	—	—
Au	—	0.010	—	—	—	0.010
Hg	—	—	—	—	—	—
Co	0.006	0.079	0.069	0.068	0.051	0.011
Sb	—	—	0.022	0.020	—	—
Cu	30.017	29.842	30.282	29.885	29.983	30.145
Mo	0.498	0.441	0.487	0.459	0.455	0.483
总计	94.249	93.755	94.618	94.011	94.548	94.645

和 Fe 呈现负相关, Mo 和 S 呈现负相关, Ni 和 Fe 呈现正相关; 推测 As 和 Ni 元素在黄铁矿中的赋存形式为

矿物包裹体, 而 Co 和 Mo 元素在黄铁矿中的赋存形式为类质同象。

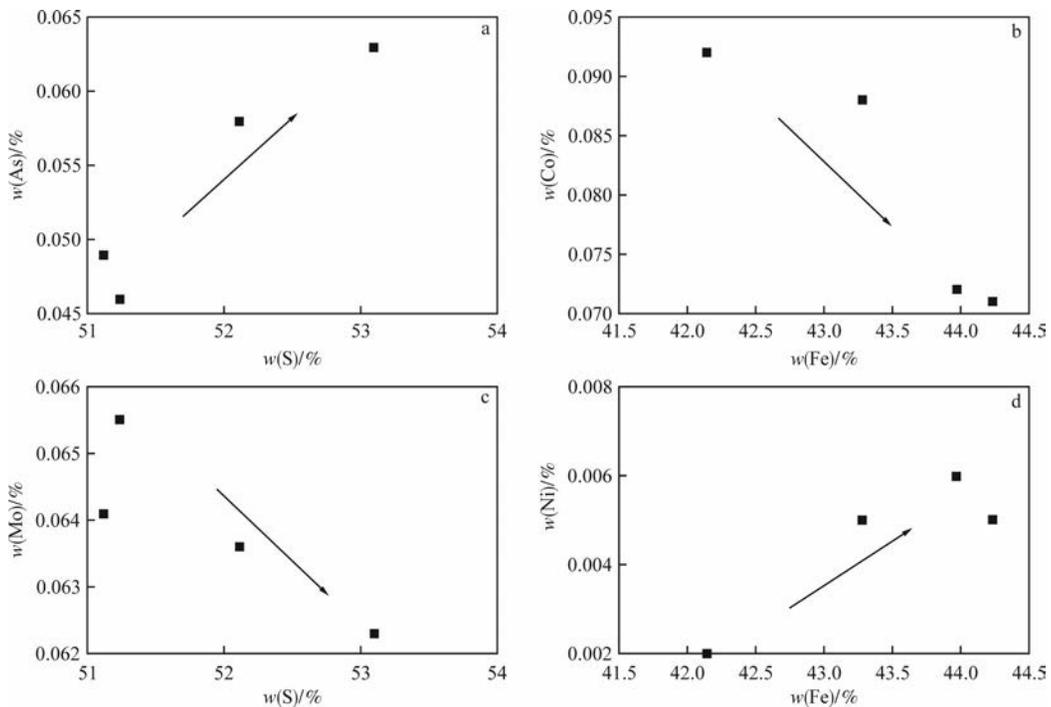


图 6 黄铁矿主量元素与微量元素关系图解

Fig. 6 Relationship diagrams of major and trace elements in pyrite

经过分析, 发现黄铜矿中除了主量元素 Fe、Cu 和 S 外, 还含有其他微量元素, 主要是 Zn、Mo、As 和 Co。

黄铜矿主量元素与微量元素关系图解见图 7。由图 7 可知: 黄铜矿中 Zn 和 Cu 呈现正相关, Mo 和 Cu 呈现正

相关,As和Cu呈现负相关,Co和Fe呈现负相关;推测Zn和Mo元素可能主要以矿物包裹体形式赋存于黄

铜矿中,而As和Co元素可能主要以类质同象形式赋存于黄铜矿中<sup>[39]</sup>。

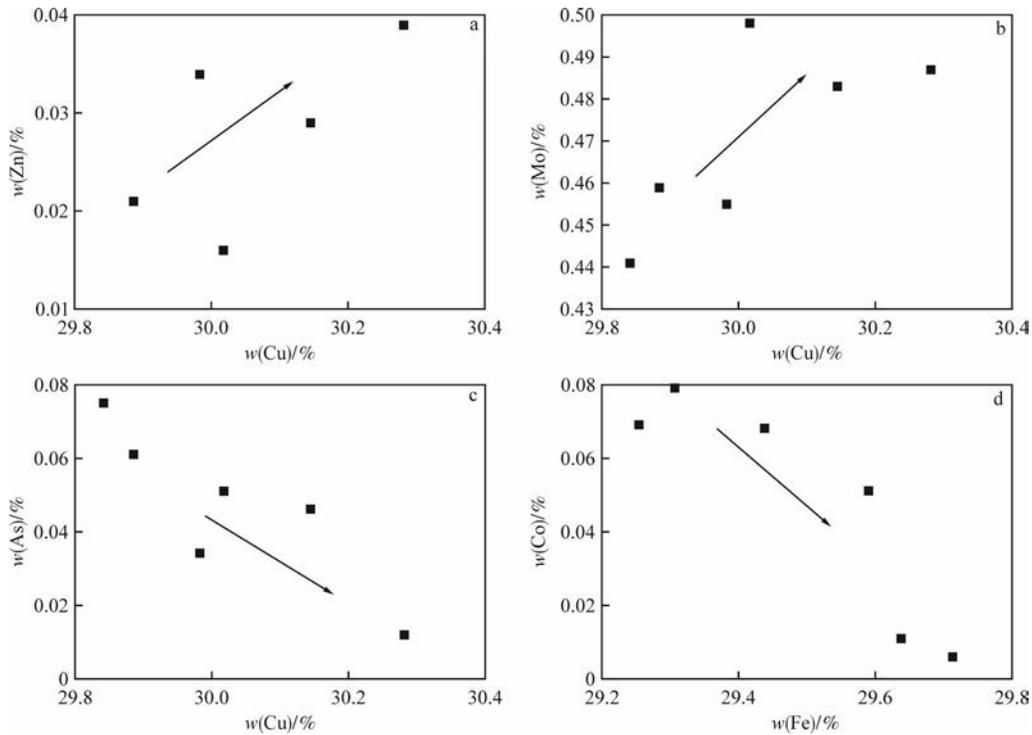


图7 黄铜矿主量元素与微量元素关系图解

Fig. 7 Relationship diagrams of major and trace elements in chalcopyrite

#### 4.2 对成矿环境的指示

黄铁矿  $w(S)-w(Fe)$  图解见图8。由图8可知:黄铁矿中  $w(S)$  和  $w(Fe)$  理论值分别为 53.45% 和 46.55%<sup>[40]</sup>,然而,黄铁矿实际的S与Fe含量由于形成过程中微量元素的掺杂,通常低于理论值。当  $w(S)$  低于 53.45% 时,这种情况被称作贫硫;当  $w(Fe)$  低于 46.55% 时,被称为贫铁。据戴福盛<sup>[36]</sup>研究结果,黄铁矿  $w(S)/w(Fe)$  值能够反映矿床形成过程中的硫逸度,若  $w(S)/w(Fe)$  值小于 1.148,说明其可能形成于硫逸度较低的环境,反之,则可能在硫逸度较高的环境下形成。霍洛台铜(钼)矿床黄铁矿  $w(S)$  集中在 51.117% ~ 53.095%,  $w(Fe)$  集中在 42.143% ~ 44.227%,S、Fe具有一定正相关性。霍洛台铜(钼)矿床黄铁矿  $w(S)$  低于理论值,  $w(Fe)$  也低于理论值,  $w(S)/w(Fe)$  值为 1.181 ~ 1.216,平均值为 1.196 (> 1.148),黄铁矿整体表现为贫Fe贫S特征,且硫逸度较高。

铜矿物中均不同程度含Se和As,特别是含较高的Ge(质量分数大于  $2 \times 10^{-6}$ ),表明矿床与火山-次火山热液作用紧密相关<sup>[41]</sup>。霍洛台铜(钼)矿床  $w(Ge)$  为  $100 \times 10^{-6} \sim 180 \times 10^{-6}$ ,远大于  $2 \times 10^{-6}$ ,表明霍洛台铜(钼)矿床与火山-次火山热液作用紧密相关。

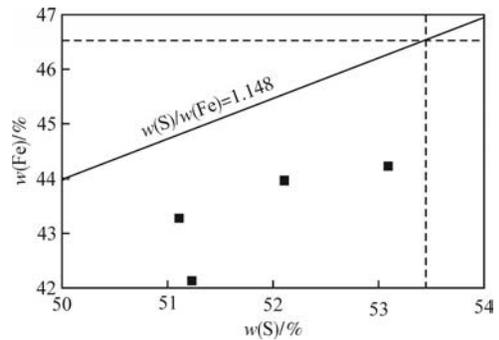


图8 黄铁矿  $w(S)-w(Fe)$  图解

Fig. 8  $w(S)-w(Fe)$  diagram of pyrite

当成矿温度低于 200 °C 时,黄铜矿的组成与理想化学式相符,即  $[n(Cu)+n(Fe)]/n(S)=1$ ;当温度超过 200 °C 时,该比值大于 1<sup>[40]</sup>。霍洛台铜(钼)矿床黄铜矿  $[n(Cu)+n(Fe)]/n(S)$  平均值为 0.941,表明其形成温度接近 200 °C。黄铜矿  $[n(Cu)+n(Fe)]/n(S)$  图解见图9。由图9可知:黄铜矿  $[n(Cu)+n(Fe)]/n(S)$  值均位于热液环境范围内,显示黄铜矿等金属硫化物可能是在中温热液环境下形成的。

#### 4.3 对矿床成因的指示

黄铁矿理论化学式为  $FeS_2$ , 主量元素包括S和Fe。前人通过分析多种不同成因类型黄铁矿中的主量元素,提出了运用  $\delta Fe$  和  $\delta S$  来分析黄铁矿主量元素标型特征的方法<sup>[42]</sup>。 $\delta Fe$  和  $\delta S$  是用来衡量黄铁矿

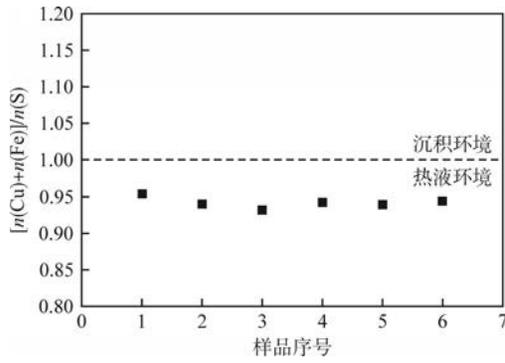


图9 黄铜矿  $[n(\text{Cu})+n(\text{Fe})]/n(\text{S})$  图解

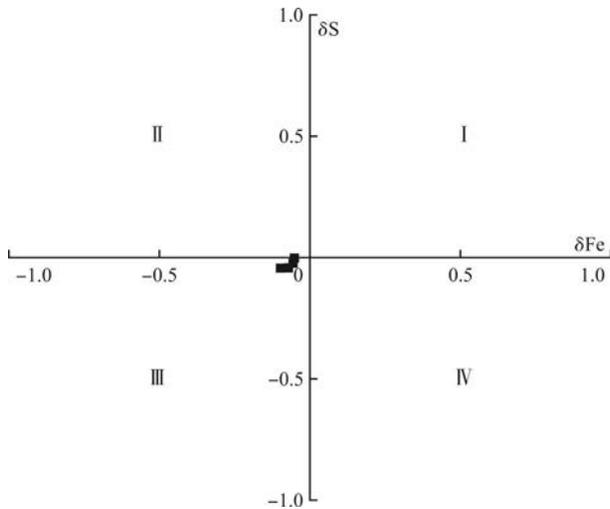
Fig. 9  $[n(\text{Cu})+n(\text{Fe})]/n(\text{S})$  diagram of chalcopyrite

样本中 Fe、S 与理论值的偏离程度 ( $\delta\text{Fe}$ 、 $\delta\text{S}$ ), 计算公式如下:

$$\delta\text{Fe} = \left[ \frac{w(\text{Fe}) - 46.55}{46.55} \right] \times 100 \% \quad (1)$$

$$\delta\text{S} = \left[ \frac{w(\text{S}) - 53.45}{53.45} \right] \times 100 \% \quad (2)$$

黄铁矿  $\delta\text{Fe}$ - $\delta\text{S}$  图解见图 10。由图 10 可知: $\delta\text{Fe}$ 、 $\delta\text{S}$  分别为  $-0.095 \sim -0.050$  和  $-0.044 \sim -0.007$ 。样品分布在岩浆成因黄铁矿区域。此外, 研究发现, 沉积型黄铁矿的  $w(\text{S})/w(\text{Se})$  值通常为  $25 \times 10^4 \sim 50 \times 10^4$ , 而岩浆热液型矿床的  $w(\text{S})/w(\text{Se})$  值为  $1.00 \times 10^4 \sim 2.67 \times 10^4$ <sup>[33-44]</sup>。霍洛台铜(钼)矿床黄铁矿  $w(\text{S})/w(\text{Se})$  值为  $0.128 \times 10^4 \sim 0.241 \times 10^4$ , 平均值为  $0.185 \times 10^4$ , 这也暗示其为岩浆热液成因。



I—沉积成因 II—沉积改造成因 III—岩浆成因 IV—热液成因

图 10 黄铁矿  $\delta\text{Fe}$ - $\delta\text{S}$  图解

Fig. 10  $\delta\text{Fe}$ - $\delta\text{S}$  diagram of pyrite

## 5 结论

1) 霍洛台铜(钼)矿床黄铁矿和黄铜矿的电子探针分析结果表明, 黄铁矿中 As 和 Ni 元素可能以矿物包裹体形式存在, Co 和 Mo 元素可能以类质同象形式存在; 黄铜矿中 Zn 和 Mo 元素可能以矿物包裹体形式存在, As 和 Co 元素可能以类质同象形式存在。

2) 黄铁矿具有贫 Fe 贫 S 的特征, 指示成矿环境的硫逸度较高; 黄铜矿  $[n(\text{Cu})+n(\text{Fe})]/n(\text{S})$  平均值显示, 霍洛台铜(钼)矿床很可能形成于中温热液环境。

3) 黄铁矿  $\delta\text{Fe}$ 、 $\delta\text{S}$  和  $w(\text{S})/w(\text{Se})$  值指示, 霍洛台铜(钼)矿床为岩浆热液成因。

### [参考文献]

- [1] MEINERT L D. Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods [J]. Economic Geology, 2007, 102 (7): 1355.
- [2] CHEN Y J, CHEN H Y, ZAW K, et al. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: An overview [J]. Ore Geology Reviews, 2007, 31 (1/2/3/4): 139-169.
- [3] 武广, 陈衍景, 孙丰月, 等. 大兴安岭北端晚侏罗世花岗岩类地球化学及其地质和找矿意义 [J]. 岩石学报, 2008, 24 (4): 899-910.
- [4] ZENG Q D, LIU J M, CHU S X, et al. Re-Os and U-Pb geochronology of the Duobaoshan porphyry Cu-Mo-(Au) deposit, northeast China, and its geological significance [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 79 (2): 895-909.
- [5] 聂钊茹. 多宝山矿田铜山铜矿的资源潜力及勘查分析 [J]. 世界有色金属, 2019 (4): 125, 127.
- [6] 赵青青. 黑龙江岔路口超大型斑岩铜矿床地质地球化学与成矿机制研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2021.
- [7] 刘大中, 郝宇杰, 杨群, 等. 大兴安岭中北段古中公路钼矿床形成时代与矿床成因 [J]. 世界地质, 2017, 36 (2): 507-519.
- [8] 尚毅广, 孙丰月, 姜和芳, 等. 大兴安岭北段霍洛台铜铅锌矿区花岗闪长岩的岩石成因: 地球化学和锆石 U-Pb 年代学制约 [J]. 世界地质, 2017, 36 (2): 474-485.
- [9] 刘宇崴. 大兴安岭阿里河地区早白垩世花岗岩地质、地球化学特征及构造背景 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [10] 李华伟, 周丹, 李碧乐, 等. 大兴安岭北段霍洛台 I 区南铜钼矿床成矿流体特征及矿床成因 [J]. 黄金, 2019, 40 (5): 3-10.
- [11] 孟凡波, 邓昌州, 冯雨周, 等. 大兴安岭北段晚中生代斑岩铜钼矿床成矿岩体黑云母地球化学特征及地质意义 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2012, 40 (4): 914-924.
- [12] 杨元江, 邓昌州, 李成禄, 等. 大兴安岭大洋山钼矿区侵入岩年代学、岩石地球化学特征及岩石成因 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2012, 51 (4): 1 064-1 081.
- [13] 孙永刚. 大兴安岭北段晚侏罗世斑岩型铜(钼)矿床成矿作用及找矿方向研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [14] 胡永慕, 范月野, 房冬昱, 等. 大兴安岭北段南木地区斑岩型铜矿地质特征与成矿预测 [J]. 地质与资源, 2022, 31 (6): 748-753.
- [15] 许成瀚. 大兴安岭地区内生金属矿床成矿作用研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [16] 张元厚, 张世红. 岩浆热液系统金矿床研究进展 [J]. 黄金, 2005, 26 (10): 14-18.
- [17] 王珊珊, 丁正江, 滕飞, 等. 与伟德山期岩浆岩有关的多金属成矿作用研究——以奈北砂卡岩型铜矿床为例 [J]. 黄金, 2024, 45 (10): 1-8.
- [18] 陈娟, 李和平. 硫化物矿物的主微(痕)量元素分析进展 [J]. 矿物学报, 2013, 33 (3): 351-362.
- [19] 赵珊茸, 边秋娟, 凌其聪. 结晶学及矿物学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2018.
- [20] 于风云, 刘晓英, 李春艳. 电子探针定量分析影响因素浅析 [J]. 科技与创新, 2021 (21): 101-104.
- [21] 梁培伟. 电子探针在地质实验测试中的应用 [J]. 世界有色金属

- 属, 2024(4): 78-80.
- [22] 陈德进. 金属矿鉴定中电子探针分析技术的应用研究[J]. 中国金属通报, 2024, 29(5): 207-209.
- [23] LIU Y J, LI W M, FENG Z Q, et al. A review of the Paleozoic tectonics in the eastern part of Central Asian Orogenic Belt [J]. *Gondwana Research*, 2017, 43(3): 123-148.
- [24] WU F Y, SUN D Y, GE W C, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 41(1): 1-30.
- [25] XU W L, PEI F P, WANG F, et al. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: Constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 74(25): 167-193.
- [26] FENG Z Q, JIA J, LIU Y J, et al. Geochronology and geochemistry of the Carboniferous magmatism in the northern Great Xing' an Range, NE China: Constraints on the timing of amalgamation of Xing' an and Songnen Blocks [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 113(1): 411-426.
- [27] WU F Y, YANG J H, LO C H, et al. The Heilongjiang Group: A Jurassic accretionary complex in the Jiamusi Massif at the western Pacific margin of northeastern China [J]. *Island Arc*, 2017, 16(1): 156-172.
- [28] 黑龙江省地质矿产局. 黑龙江省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [29] DENG C Z, SUN D Y, HAN J S, et al. Late-stage southwards subduction of the Mongol-Okhotsk oceanic slab and implications for porphyry Cu-Mo mineralization: Constraints from igneous rocks associated with the Fukeshan deposit, NE China [J]. *Lithos*, 2019, 326/327(2): 341-357.
- [30] FENG Y Z, CHEN H Y, XIAO B, et al. Late Mesozoic magmatism at Xiaokelehe Cu-Mo deposit in Great Xing' an Range, NE China: Geodynamic and metallogenic implications [J]. *Lithos*, 2020, 374/375(12): 105713.
- [31] SUN Y G, LI B L, DING Q F, et al. Mineralization age and hydrothermal evolution of the Fukeshan Cu (Mo) Deposit in the northern Great Xing' an Range, northeast China: Evidence from fluid inclusions, H-O-S-Pb isotopes, and Re-Os geochronology [J]. *Minerals*, 2020, 10(7): 591.
- [32] XU Q, ZENG L S, ZHAO L H, et al. Geochemical characteristics and petrogenesis of Miocene high Sr/Y rocks in Xigatze fore-arc basin, southern Tibet [J]. *Lithos*, 2020, 366/367(8): 105543.
- [33] 李焕纪, 谢铖铖, 孙永刚, 等. 大兴安岭北段霍洛台地区辉绿玢岩的锆石 U-Pb 年龄、岩石成因和构造背景 [J]. *吉林地质*, 2024, 43(2): 1-9.
- [34] 晏国龙, 祁小军, 肖淳, 等. 东秦岭钼多金属成矿带夜长坪斑岩-矽卡岩型钼钨矿床磁铁矿成因类型与指示意义 [J]. *黄金*, 2024, 45(11): 34-44, 136.
- [35] 马敏霞, 孙凌云, 孙金磊, 等. 吉林省西岔金银矿床多阶段石英原位组成及地质意义 [J]. *黄金*, 2024, 45(6): 65-76.
- [36] 戴福盛. 个旧锡多金属矿区黄铁矿标型特征的研究 [J]. *地质与勘探*, 1988, 24(12): 22-27.
- [37] 宫丽, 马光. 黄铁矿的成分标型特征及其在金属矿床中的指示意义 [J]. *地质找矿论丛*, 2011, 26(2): 162-166.
- [38] 李志丹, 薛春纪, 董新丰, 等. 新疆霍什布拉克铅锌矿床微量元素地球化学 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2014, 33(3): 540-550.
- [39] 孙永刚, 靳皇玉, 王永胜, 等. 大兴安岭北段斑岩型钼(铜)矿床主要硫化物化学成分特征及地质意义——以 770 钼(铜)矿床为例 [J]. *黄金*, 2024, 45(11): 27-33, 136.
- [40] 李胜荣, 许虹, 申俊峰. 结晶学与矿物学 [M]. 北京: 地质出版社, 2008.
- [41] 刘文元. 福建紫金山斑岩—浅成热液成矿系统的精细矿物学研究 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2015.
- [42] 严育通, 李胜荣, 贾宝剑, 等. 中国不同成因类型金矿床的黄铁矿成分标型特征及统计分析 [J]. *地学前缘*, 2012, 19(4): 214-226.
- [43] 徐国风, 邵洁涟. 黄铁矿的标型特征及其实际意义 [J]. *地质论评*, 1980, 26(6): 541-546.
- [44] 邵洁涟. 金矿找矿矿物学 [M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1988.

## Geochemical characteristics and geological significance of pyrite and chalcopyrite from the Huoluotai Cu (Mo) Deposit in the northern Greater Khingan Mountains

Tao Shanfu<sup>1</sup>, Xiao Qiliang<sup>2</sup>, Sun Zhiyuan<sup>1</sup>, Sun Yonggang<sup>1</sup>, Li Huanji<sup>1</sup>, Li Xiaolin<sup>1</sup>, Chen Xusheng<sup>3</sup>

(1. School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University; 2. The 8th Geological Brigade of Sichuan;

3. Qiqihar Institute of Geological Exploration of Heilongjiang Province)

**Abstract:** The Huoluotai Cu (Mo) Deposit, a newly discovered porphyry-type copper deposit in the northern Greater Khingan Mountains, remains understudied with respect to its main metal sulfides (pyrite and chalcopyrite) which restricts understanding of its ore-forming environment and genesis. This study focuses on the geochemical characteristics of pyrite and chalcopyrite within the deposit, based on electron probe analysis. The results show that arsenic (As) and nickel (Ni) in pyrite likely occur as mineral inclusions, while cobalt (Co) and molybdenum (Mo) may be present in isomorphic substitution. In chalcopyrite, zinc (Zn) and Mo may also occur as mineral inclusions, while As and Co are possibly present in isomorphic substitution. Both pyrite and chalcopyrite generally show Fe- and S-deficient characteristics compared with their theoretical compositions. The  $w(S)/w(Fe)$  ratio of pyrite ranges from 1.181 to 1.216, exceeding 1.148, indicating formation under relatively high sulfur fugacity conditions. The average value of  $[n(Cu)+n(Fe)]/n(S)$  in chalcopyrite is 0.941, suggesting a formation temperature close to 200 °C, which implies that chalcopyrite and associated metal sulfides were likely precipitated from a medium-temperature hydrothermal system. The  $\delta Fe$  and  $\delta S$  values of pyrite range from -0.095 to -0.050 and -0.044 to -0.007, respectively, and the  $w(S)/w(Se)$  ratio ranges from  $0.128 \times 10^4$  to  $0.241 \times 10^4$ , indicating a magmatic hydrothermal origin.

**Keywords:** northern Greater Khingan Mountains; Huoluotai; pyrite; chalcopyrite; electron probe; magmatic hydrothermal origin; Cu (Mo) deposit