

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

孟凡波¹ 邓昌州^{2*} 冯雨周³ 田振东² 李成禄⁴ 龚林³ 陈旭升¹ 吕凤彤¹

1. 黑龙江省齐齐哈尔地质勘查院 黑龙江 齐齐哈尔 161006; 2. 中国科学院 地球化学研究所 贵阳 550081;
3. 中国科学院 广州地球化学研究所 广州 510640; 4. 黑龙江省自然资源调查院 哈尔滨 150036

摘要: 为了解大兴安岭北段晚中生代斑岩型铜钼矿床的成矿信息, 利用电子探针对晚侏罗世霍洛台铜钼矿床和早白垩世宝泉矿床成矿岩体中的黑云母开展了地球化学研究。结果表明, 这些黑云母均为镁质黑云母, 成矿岩浆为活动陆缘构造背景下壳幔熔体混合的产物。黑云母温压计计算结果显示, 霍洛台和宝泉黑云母的结晶温度和压力分别为 738 ~ 761 °C、67 ~ 95 MPa 和 725 ~ 749 °C、102 ~ 141 MPa, 对应的深度分别为 2.55 ~ 3.60 km 和 3.85 ~ 5.33 km。黑云母氧逸度位于 HM 缓冲剂附近, 指示岩浆具有较高的氧逸度。而黑云母适中的 $\lg(f_{\text{HF}}/f_{\text{HCl}})$ 、 $\lg(f_{\text{H}_2\text{O}}/f_{\text{HCl}})$ 和 $\lg(f_{\text{H}_2\text{O}}/f_{\text{HF}})$ 等卤素逸度比值, 指示岩浆具有同时产生 Cu 和 Mo 矿化的条件。黑云母地球化学特征显示, 大兴安岭北段地区晚中生代良好的构造和岩浆条件触发了斑岩型铜钼矿床的形成。

关键词: 黑云母; 地球化学; 斑岩型铜钼矿; 成岩成矿; 大兴安岭北部

中图分类号: P588.1 文章编号: 1007-2802(2021)04-0914-11 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2021.40.050

Mineral Geochemistry of Biotites from the Mineralized Intrusive Bodies in the Late Mesozoic Porphyry Cu-Mo Deposits, Northern Great Xing'an Range and Its Geological Implications

MENG Fan-bo¹, DENG Chang-zhou^{2*}, FENG Yu-zhou³, TIAN Zhen-dong¹, LI Cheng-lu⁴,
GONG Lin³, CHEN Xu-sheng¹, LYU Feng-tong¹

1. Qiqihar Institute of Geological Exploration of Heilongjiang Province, Qiqihar Heilongjiang 161006, China; 2. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 4. Heilongjiang Institute of Natural Resource Survey, Harbin 150036, China

Abstract: Compositions of biotites from mineralized intrusive bodies of the late Mesozoic Huoluotai and Baoquan Cu-Mo deposits in the northern Great Xing'an range were measured here by using the electron probe micro-analyzer with the aim to understand the metallogenic information of these deposits. The results show that the biotites from the Huoluotai and Baoquan deposits belong to the magnesium biotites. The biotite-bearing mineralized porphyry bodies are products of mixtures of crust and mantle melts formed in the active continental margin setting. The calculation results by using the biotite thermobarometer show that crystallization temperatures of biotites of the Huoluotai and Baoquan deposits range from 738 to 761 °C and 725 to 749 °C, respectively. Their solidification pressures are 67-95 MPa and 102-141 MPa, respectively, corresponding to the depths of 2.55-3.60 km and 3.85-5.33 km, respectively. Oxygen fugacities of the studied biotites are near the HM buffer, indicating the relatively high oxygen fugacity environments for those magmas. Moderate $\lg(f_{\text{HF}}/f_{\text{HCl}})$, $\lg(f_{\text{H}_2\text{O}}/f_{\text{HCl}})$ and $\lg(f_{\text{H}_2\text{O}}/f_{\text{HF}})$ values of the biotites indicate that those magmas have favorable conditions for the simultaneous Cu and Mo mineralization. Biotite geochemical characteristics indicate that the northern Great Xing'an range has beneficial tectonic and magmatic conditions for the formation of late Mesozoic porphyry Cu-Mo deposits.

Key words: biotite; geochemistry; porphyry Cu-Mo deposit; diagenesis and metallogenesis; northern Great Xing'an range

收稿编号: 2021-037 2021-03-26 收到 2021-04-16 改回

基金项目: 黑龙江省自然资源厅国土科研项目(201701)

第一作者简介: 孟凡波(1977-) 男, 工程师, 研究方向: 斑岩型铜钼矿床普查与勘探. E-mail: 104445056@qq.com.

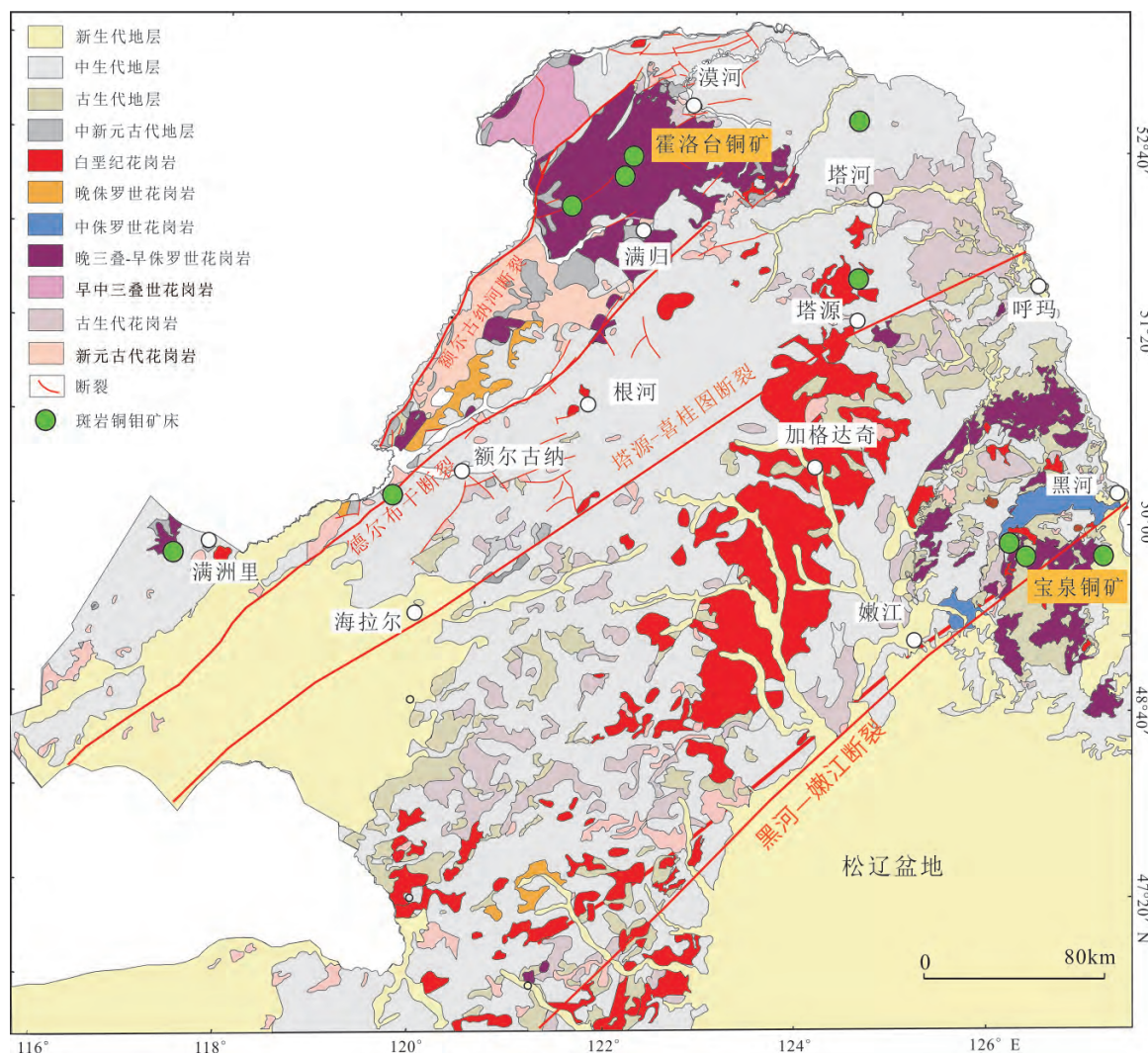
* 通信作者简介: 邓昌州(1985-) 男, 博士后, 研究方向: 岩浆热液矿床. E-mail: dengchangzhou@mail.gyig.ac.cn.

0 引言

斑岩型铜(钼-金)矿床因其重要的经济价值和特殊的成矿地质条件而备受关注(Sillitoe, 2010; 陈华勇和吴超 2020)。近年来,大兴安岭北段斑岩型铜钼矿勘查取得了重大突破,在漠河-黑河一带陆续发现了一批成矿规模较大的晚中生代斑岩型铜钼矿床,如小柯勒河、富克山、霍洛台和宝泉等(图1)(尚毅广等, 2017; Deng et al., 2019a; Feng et al., 2020; Xu et al., 2020; Sun et al., 2020a)。前人通过年代学(Deng et al., 2019b; 冯雨周等, 2020; Sun et al., 2020b)、岩石地球化学(Deng et al., 2019b; Feng et al., 2020)、同位素地球化学(Deng et al., 2019c)和热液蚀变矿物地球化学(Feng et al., 2019; 李如操等 2020)等手段对该矿

床形成的时代、成因和成矿动力学背景进行了限定。这些成果有助于了解区域成矿规律,并为区域矿产远景评价和勘查规划提供重要的依据。

然而,斑岩型铜钼矿床往往具有较大的热液蚀变规模,矿区成矿岩体的岩石地球化学特征易受成矿阶段的热液活动改造(胡清华等, 2010; 高轲等, 2016),因而很难利用其精确限定成岩成矿的物理化学条件,这给了解成岩成矿过程带来困难。黑云母作为成岩矿物,在斑岩型铜钼矿床成矿花岗闪长斑岩、石英二长岩或石英闪长岩体中广泛存在,且部分黑云母可以在热液蚀变过程中较为新鲜的保留下来。由于岩浆黑云母地球化学特征可用来计算成岩温度(Henry et al., 2015)、结晶压力(Uchida et al., 2007)、卤素逸度比值 [$\lg(f_{HF}/f_{HCl})$ 、 $\lg(f_{H_2O}/f_{HCl})$ 和 $\lg(f_{H_2O}/f_{HF})$](Zhu and Sverjensky,



据 Li (2018) 修改

图 1 大兴安岭北部区域地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of the northern Great Xing'an range

1991; Munoz, 1992)、岩浆和热液的氧逸度等(David and Hans, 1965), 因此, 因而成为热液矿床成矿理论研究重要的工具(熊小林等, 2001; 陈雷等, 2014; 高飞等, 2014; 唐攀等, 2017; 阮林森等, 2017; Jin et al., 2018; 陈国良等, 2021)。

本文选取晚侏罗世霍洛台和早白垩世宝泉铜钼矿区黑云母作为研究对象, 对其进行了地球化学研究, 以期揭示成矿岩浆的物理化学条件, 为分析大兴安岭地区晚中生代斑岩铜钼矿床成矿作用提供依据。

1 地质背景

大兴安岭北段位于中亚造山带东段, 主要由额尔古纳和兴安地块组成。区内地质演化大致经历了前寒武基底形成、古生代海相地层沉积、中生代陆相碎屑岩沉积和新生代板内火山岩喷发等阶段(黑龙江省地质矿产局, 1993)。显生宙期间研究区主要受古亚洲洋、蒙古-鄂霍次克洋和古太平洋三大构造域的控制, 区内经历多期次的板块俯冲和陆陆碰撞造山作用, 构造-岩浆事件频繁(Wu et al., 2011; Xu et al., 2013)。矿产勘查和成矿理论研究表明, 区内造山型(如造山带金矿床)和岩浆热液型(斑岩型铜钼矿床、矽卡岩型铅锌矿床、浅成低温热液型金银矿床等)等矿床较为发育(武广, 2006; Deng et al., 2021; Li et al., 2021), 是大兴安岭成矿带的重要组成部分。

该地区近年来新发现的斑岩型铜钼矿床多分布在大兴安岭东坡黑龙江省境内的新林-漠河和漠河一带(图1)。同位素年代学研究表明, 大兴安岭地区晚中生代斑岩型铜钼矿床主要有晚侏罗世(Deng et al., 2019a)和早白垩世晚期(Xu et al., 2020)两个成矿期。晚侏罗世斑岩型铜钼矿床主要分布在大兴安岭地区漠河富克山-新林一带, 主要包括霍洛台、小柯勒河和富克山等矿床, 其成矿岩体为埃达克质花岗闪长斑岩、似斑状花岗闪长岩、石英二长岩和石英闪长玢岩等。由于晚侏罗世矿床主要分布在蒙古-鄂霍次克洋缝合带附近, 且岩石成因与洋壳板片俯冲有关(Deng et al., 2019a, 2019b), 推测该期斑岩型铜钼矿成岩和成矿作用可能受蒙古-鄂霍次克洋俯冲板片的晚期演化所控制, 成矿岩浆可能源自俯冲洋中脊部分熔融形成的熔体(邓昌州, 2019)。矿区内普遍发育钾化内带(表现为磁铁矿化、黑云母化和钾化等高温蚀变矿物组合特征)和黄铁绢英岩化外带(常见硅化、黄铁矿化、绢云母化蚀变矿物组合)(李如操等, 2020;

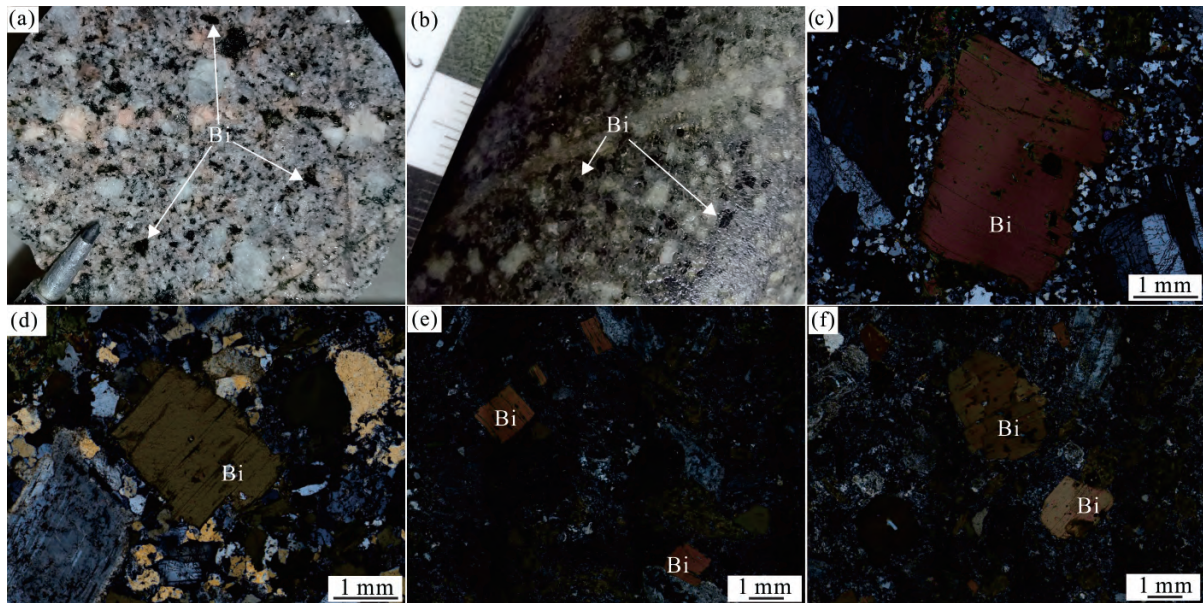
Feng et al., 2020)。铜钼矿化一般位于钾化带内, 但个别矿床铜钼具有分离现象。如小柯勒河矿床, 在外带绢英岩化带内可见含钼较高的石英辉钼矿脉, 局部可达工业矿体规模。

早白垩世晚期斑岩型铜钼矿床分布在漠河一带的大、小兴安岭结合部位, 以漠河地区的宝泉铜钼矿床为代表。较之于漠河富克山-新林地区的斑岩型铜钼矿, 早白垩世斑岩型铜钼矿床其地理位置更靠近古太平洋俯冲带, 成矿时代与吉黑东部早白垩世浅成低温热液金矿床一致, 二者在上述晚侏罗世铜钼矿分布区未有发现和报道, 因此推测该期成岩成矿作用可能受古太平洋板块的制约(Xu et al., 2020)。与晚侏罗世斑岩型铜钼矿区成矿岩体类似, 早白垩世斑岩型铜钼矿床的石英闪长玢岩同样具有埃达克岩的地球化学性质, 指示洋壳熔体对成岩的物质贡献(Xu et al., 2020)。在矿化蚀变方面, 早白垩世斑岩型铜钼矿床黄铜矿和辉钼矿主要产出在钾化带内, 而绢英岩化带铜钼矿化较弱。

2 样品和分析方法

本次研究分别在霍洛台和宝泉铜钼矿床的成矿花岗闪长斑岩体和石英闪长玢岩体采集岩石样品进行黑云母地球化学研究。霍洛台矿区的花岗闪长斑岩呈灰白色, 斑状结构, 块状构造; 斑晶占比60%~75%, 基质由细晶-微晶矿物组成。全岩主要组成矿物有: 斜长石(45%~50%)、石英(25%~30%)、钾长石(10%~15%)、黑云母(5%±)、角闪石(1%~3%)和少量副矿物(磁铁矿、磷灰石、锆石等)组成(图2a)。宝泉铜钼矿区的石英闪长玢岩呈灰色, 斑状结构(基质为微晶质), 块状构造; 斑晶约占全岩40%, 主要由斜长石、石英、黑云母和少量的角闪石组成(图2b)。花岗闪长斑岩和石英闪长玢岩中新鲜黑云母均显示棕褐色, 半自形-自形, 少量为他形, 解理发育(图2c~2f), 粒径0.5~3 mm。

样品电子探针片的喷碳和测试在中国冶金地质总局山东局测试中心完成。分析仪器为JEOL(日本电子)JXA-8230型电子探针显微分析仪。其工作电压为15 kV, 工作电流10、20 nA, 束斑直径为5 μm, 氧化物分析误差为1%。主量元素(含量大于1%)峰值积分时间10/20 s, 背景积分时间5/10 s; 微量元素(含量小于1%)峰值积分时间20~40 s不等, 背景积分时间10~20 s不等; 以美国SPI矿物/金属标准和中国国家标准样品GSB为标样。



(a) (c) (d) 霍洛台矿区花岗闪长斑岩手标本及其正交偏光显微照片; (b) (e) (f) 宝泉矿区石英闪长玢岩手标本及其正交偏光显微照片。

图2 霍洛台和宝泉铜钼矿区成矿岩体标本及显微照片

Fig.2 Photos and micro-photographs of hand specimens of mineralized intrusive rocks in the Huoluotai and the Baoquan Cu-Mo deposits

3 结果与讨论

3.1 黑云母成分特征及对成岩条件的限定

霍洛台和宝泉矿区黑云母分析结果分别见表1和表2。黑云母结构式以22个氧原子来计算阳离子数,计算方法参照Li等(2020)。

黑云母根据固溶体中Mg、Fe、Mn、Al和Ti元素相对含量可分为富镁黑云母、富铁黑云母、铁叶云母和金云母4个端元组分(Rieder et al., 1998)。在Foster(1960)定义的Mg-(Al^{VI}+Ti+Fe³⁺)-(Fe²⁺+Mn)图解中,霍洛台和宝泉矿区黑云母全部落入镁质黑云母的区域(图3a),反映黑云母具有富镁的特征。前人研究发现,世界上大多数斑岩型铜矿区内含矿岩体黑云母都显示富镁的特征(吕志成等, 2003; 李鸿莉等, 2007),如西藏拉抗俄和加玛(唐攀等, 2016, 2017)、加拿大Casino(Selby and Nesbitt, 2000)、伊朗Miduk(Boomeri et al., 2009)等矿床。

研究表明,不同构造环境下形成的岩浆黑云母具有不同的MgO、FeO和Al₂O₃化学成分(Abdel-Rahman, 1994)。在MgO-TFeO-Al₂O₃构造-岩浆判别图解中(图3b),霍洛台和宝泉矿区黑云母均落入造山带钙碱性岩石区域,反映明岩浆形成于俯冲造山的构造背景。这与矿区全岩地球化学所反映的晚中生代期间研究区处于活动陆缘的构造背景相一致(Deng et al., 2019a; Xu et al., 2020)。

黑云母化学成分特征还可用于示踪岩浆物源(周作侠, 1986)。在黑云母MgO-TFeO/(TFeO+MgO)图解中(图3c),霍洛台和宝泉矿区黑云母全部落入壳幔混源区域内,表明成矿岩浆为壳幔熔体混合的产物,也暗示地幔对成矿有一定的物资贡献。

前人研究表明,黑云母中Ti含量变化受温度控制(Henry et al., 2015; Henry and Guidotti 2015),且Ti、Mg/(Mg+Fe)和温度之间存在非线性关系,以此提出黑云母温度计算公式:

$$t = \{ [\ln(Ti) - a - c(X_{Mg})^3] / b \}^{0.333} \quad (1)$$

式中a、b和c为常数,分别为-2.359、4.6482×10⁻⁹和-1.7283; X_{Mg} = Mg/(Mg+Fe)。计算得到霍洛台和富克山矿区黑云母的形成温度分别为738~761℃和725~749℃(图3d),均值分别为744℃和735℃。

黑云母形成压力利用Uchida等(2007)推荐的经验公式计算:

$$p(100\text{MPa}) = 3.03 \times Al - 6.53(\pm 0.33) \quad (2)$$

计算得到霍洛台和宝泉矿区岩浆黑云母形成压力分别为67~95 MPa和102~141 MPa。利用公式p = ρgh计算黑云母形成深度,其中,加速度g为9.8 m/s²,岩石密度ρ取近似值2700 kg/m³。计算结果显示,霍洛台和宝泉矿区黑云母的形成深度分别为2.55~3.60 km和3.85~5.33 km,均值分别为3.10 km和4.46 km。根据鲍文反应序列,

表 1 霍洛台铜钼矿床成矿岩体黑云母电子探针分析结果

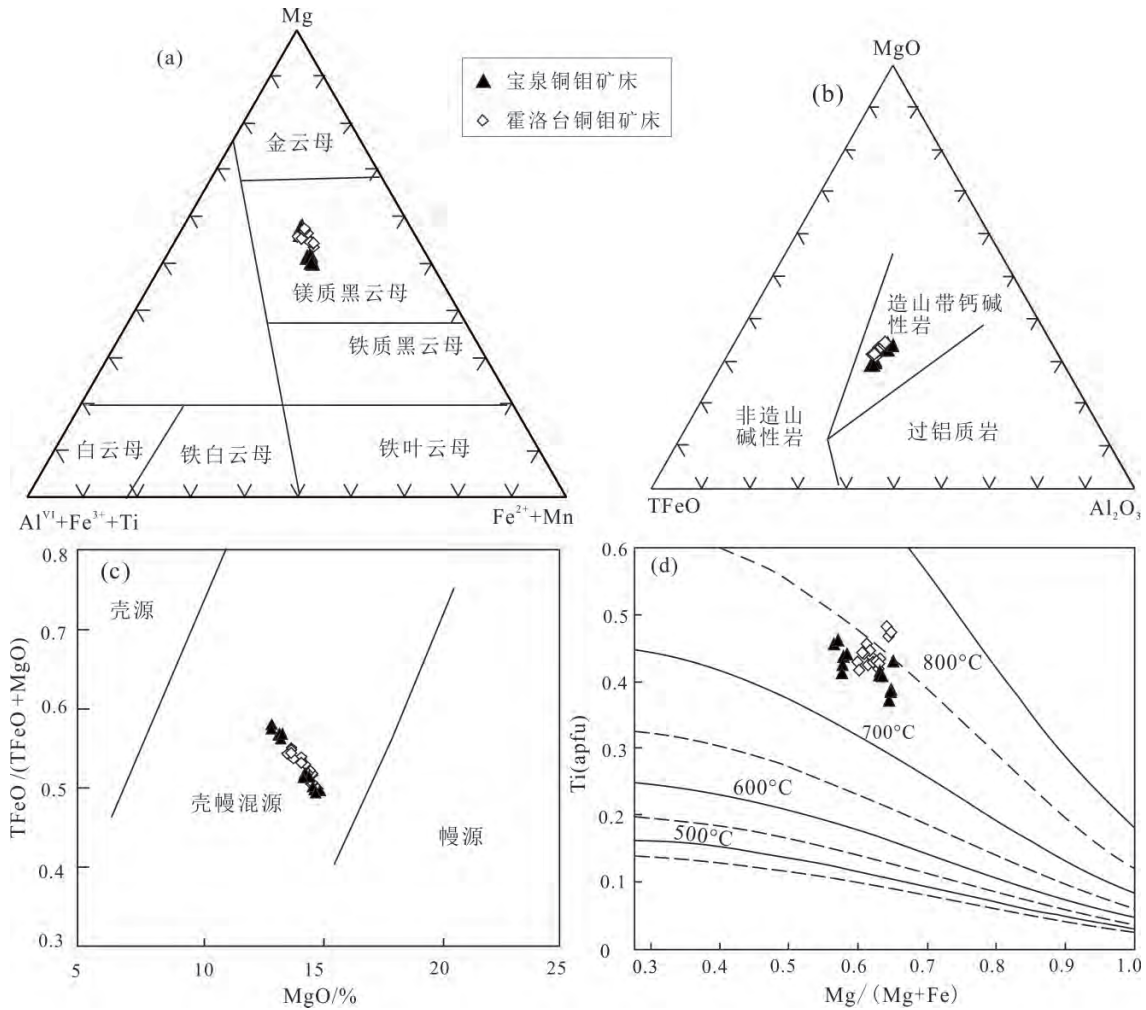
Table 1 Microprobe analytical compositions of biotites from the Huoluotai Cu-Mo deposit		(%)															
样品	HL-1	HL-2	HL-3	HL-4	HL-5	HL-6	HL-7	HL-8	HL-9	HL-10	HL-11	HL-12	HL-13	HL-14	HL-15	HL-16	
SiO ₂	38.09	38.04	38.85	37.81	37.63	37.57	37.48	37.06	37.51	37.65	37.24	37.65	37.38	37.80	37.52	37.91	
TiO ₂	3.87	3.91	3.80	3.78	4.10	3.83	3.78	3.90	3.82	3.66	3.82	3.89	4.12	3.77	4.28	4.22	
Al ₂ O ₃	13.52	13.61	13.88	13.48	13.46	13.76	13.49	13.30	13.50	13.18	13.06	13.23	13.59	13.53	13.62	13.59	
TFeO	15.76	16.26	15.85	16.47	16.70	16.99	16.21	16.17	15.99	16.81	16.25	16.55	14.97	15.66	15.11	14.91	
MnO	0.16	0.13	0.16	0.12	0.14	0.15	0.11	0.17	0.14	0.21	0.22	0.10	0.13	0.08	0.14	0.11	
MgO	14.76	14.47	14.76	14.27	14.30	13.89	14.29	13.98	14.68	13.89	13.70	13.88	14.71	14.58	14.75	14.98	
Na ₂ O	0.29	0.15	0.15	0.17	0.15	0.12	0.34	0.32	0.23	0.16	0.20	0.19	0.21	0.20	0.23	0.19	
K ₂ O	9.55	9.49	9.69	9.59	9.75	9.55	9.31	9.50	9.48	9.56	9.33	9.69	9.56	9.58	9.47	9.51	
F	0.95	0.97	1.00	0.92	0.91	0.81	0.92	0.83	0.98	0.77	0.77	0.92	0.86	0.93	0.88	1.02	
Cl	0.18	0.17	0.18	0.19	0.20	0.16	0.25	0.25	0.18	0.15	0.16	0.17	0.18	0.17	0.18	0.17	
总计	96.69	96.74	97.85	96.36	96.90	96.45	95.74	95.10	96.09	95.69	94.39	95.87	95.31	95.86	95.77	96.14	

以 22 个氧原子为基础计算的阳离子数																					
Si ⁴⁺	5.77	5.76	5.81	5.76	5.73	5.72	5.75	5.74	5.72	5.76	5.77	5.77	5.73	5.76	5.73	5.76					
Al ^{IV}	1.78	1.80	1.77	1.76	1.78	1.84	1.71	1.72	1.83	1.76	1.75	1.76	1.85	1.79	1.87	1.85					
Al ^{VI}	0.64	0.63	0.68	0.66	0.64	0.63	0.73	0.70	0.59	0.61	0.63	0.63	0.61	0.64	0.58	0.59					
Mg	3.44	3.36	3.38	3.35	3.37	3.24	3.42	3.38	3.43	3.26	3.28	3.27	3.48	3.41	3.46	3.50					
Fe ²⁺	1.38	1.48	1.42	1.49	1.52	1.59	1.36	1.41	1.44	1.54	1.49	1.56	1.39	1.44	1.39	1.38					
Fe ³⁺	0.61	0.58	0.56	0.61	0.61	0.58	0.72	0.69	0.60	0.61	0.61	0.56	0.53	0.55	0.54	0.51					
Ti ⁴⁺	0.43	0.44	0.42	0.42	0.46	0.43	0.43	0.45	0.43	0.42	0.44	0.44	0.47	0.43	0.48	0.47					
Mn ⁴⁺	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01					
K ⁺	1.73	1.74	1.74	1.75	1.77	1.76	1.67	1.73	1.75	1.78	1.76	1.79	1.76	1.76	1.74	1.74					
Na ⁺	0.09	0.04	0.04	0.05	0.04	0.03	0.10	0.10	0.07	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.05					
F ⁻	0.58	0.58	0.59	0.58	0.59	0.50	0.62	0.59	0.59	0.47	0.50	0.56	0.56	0.57	0.56	0.61					
Cl ⁻	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.06	0.07	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04					

表 2 宝泉铜钼矿床成矿岩体黑云母电子探针分析结果

Table 2 Microprobe analytical compositions of biotites from the Baoquan Cu-Mo deposit (%)													
样品	BQB-1	BQB-2	BQB-3	BQB-4	BQB-5	BQB-6	BQB-7	BQB-8	BQB-9	BQB-10	BQB-11	BQB-12	BQB-13
SiO ₂	37.00	37.05	37.16	37.53	37.70	37.67	37.28	37.34	37.34	37.42	37.10	37.49	37.41
TiO ₂	3.67	3.62	3.58	3.36	3.22	3.37	3.81	3.87	3.89	3.77	3.66	4.06	4.10
Al ₂ O ₃	14.26	14.45	14.33	13.82	13.90	14.06	14.62	14.20	14.00	14.17	14.31	13.95	14.15
TFeO	15.56	15.47	15.16	14.67	14.84	14.85	14.54	17.46	17.24	17.62	17.75	18.04	17.63
MnO	0.14	0.11	0.12	0.12	0.14	0.17	0.13	0.19	0.17	0.17	0.16	0.24	0.29
MgO	14.46	14.62	14.38	14.83	14.78	15.07	14.89	13.35	13.45	13.39	13.51	13.07	13.05
Na ₂ O	0.24	0.31	0.27	0.27	0.20	0.34	0.28	0.42	0.40	0.46	0.45	0.46	0.37
K ₂ O	9.30	9.16	9.34	9.20	9.15	9.13	9.21	8.98	9.23	9.05	9.09	9.34	9.15
F	0.54	0.47	0.47	0.65	0.58	0.60	0.58	0.37	0.33	0.31	0.24	0.27	0.31
Cl	0.20	0.11	0.17	0.14	0.14	0.11	0.14	0.08	0.08	0.09	0.07	0.08	0.08
总计	95.08	95.14	94.73	94.27	94.39	95.08	95.21	96.06	95.97	96.29	96.22	96.86	96.40

以 22 个氧原子为基础计算的阳离子数													
Si ⁴⁺	5.67	5.65	5.69	5.74	5.75	5.71	5.67	5.68	5.69	5.68	5.64	5.70	5.69
Al ^{IV}	1.89	2.02	1.90	1.86	1.83	1.94	2.01	1.97	1.94	1.94	2.00	1.94	1.97
Al ^{VI}	0.69	0.58	0.69	0.63	0.66	0.58	0.61	0.58	0.57	0.60	0.56	0.56	0.56
Mg	3.42	3.38	3.39	3.46	3.44	3.46	3.45	3.06	3.09	3.07	3.08	2.99	2.99
Fe ²⁺	1.37	1.41	1.37	1.31	1.30	1.30	1.33	1.58	1.58	1.56	1.59	1.65	1.62
Fe ³⁺	0.63	0.56	0.57	0.56	0.59	0.58	0.52	0.64	0.62	0.67	0.66	0.64	0.62
Ti ⁴⁺	0.42	0.41	0.41	0.39	0.37	0.38	0.43	0.44	0.44	0.43	0.41	0.46	0.46
Mn ⁴⁺	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04
K ⁺	1.71	1.72	1.73	1.72	1.71	1.71	1.71	1.70	1.74	1.70	1.72	1.76	1.73
Na ⁺	0.07	0.09	0.08	0.08	0.06	0.10	0.08	0.12	0.12	0.13	0.13	0.13	0.11
F ⁻	0.41	0.31	0.36	0.42	0.38	0.36	0.38	0.23	0.22	0.21	0.17	0.19	0.20
Cl ⁻	0.05	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02



(a) 底图据 Foster(1960); (b) 底图据 Abdel-Rahman(1994); (c) 底图据周作侠(1986); (d) 底图据 Henry 等(2015)

图3 霍洛台和宝泉矿床黑云母相关图解

Fig. 3 The diagrams for biotites from the Huoluotai and Baoquan deposits

黑云母为中酸性岩浆中晚期结晶矿物,因此黑云母的结晶温度和形成深度分别近似代表岩浆固结温度和岩体侵位深度。通过黑云母温度和压力的评估,霍洛台和宝泉矿区成矿花岗岩形成温度分别为 744 °C 和 735 °C,侵位深度分别为 3.10 km 和 4.46 km。

3.2 成矿意义

在黑云母的 Fe³⁺-Fe²⁺-Mg²⁺ 氧逸度缓冲剂图解中(图 4a),霍洛台和宝泉矿区成矿岩体内黑云母均落入 NNO 和 HM 缓冲线之间,且更靠近 HM 缓冲线,指示岩浆具有较高的氧逸度,与岩体内发育蚀变黑云母、磁铁矿和硬石膏等矿物组合所指示的高氧逸度环境一致。前人研究表明,岩浆氧逸度高时,Fe³⁺在岩浆中的含量升高,导致 Fe²⁺ 替代 Mg²⁺ 进入黑云母的能力降低,使 Mg/(Fe+Mg) 值升高(David and Hans, 1965)。因此,黑云母 Mg/(Fe+Mg) 值的升高,指示岩浆的氧逸度增高。而在高氧逸度下 S 多以硫酸盐或二氧化硫形式溶解在岩浆溶体

中。由于 Cu 为亲 S 元素,岩浆中 S 的高溶解度容易促进 Cu 的富集。在流体出溶时,Cu 随 S 元素进入流体相,使得流体中 Cu 的含量较高,为后期黄铜矿的形成提供了足够的物质基础(熊小林等,2001; Bi et al., 2009)。

IV(F)、IV(Cl)和 IV(F/Cl) 常用来表示 F 和 Cl 在黑云母中的富集程度(Munoz, 1984),其计算公式分别如下:

$$IV(F) = 1.52X_{phl} + 0.42X_{ann} + 0.20X_{sid} - \lg(X_F/X_{OH}) \tag{3}$$

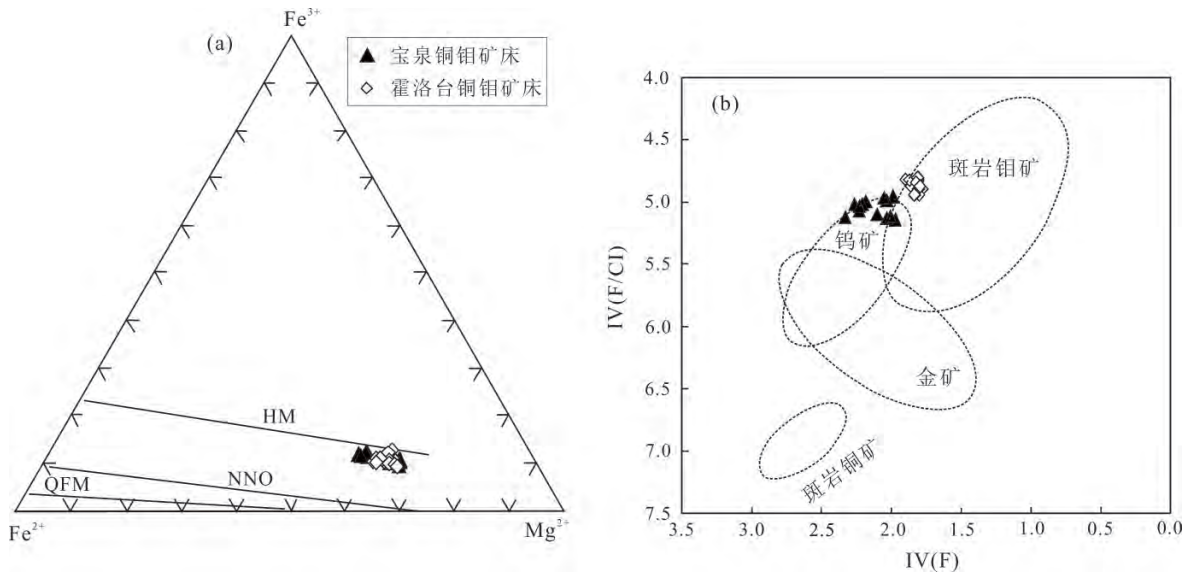
$$IV(Cl) = -5.01 - 1.93X_{phl} - \lg(X_{Cl}/X_{OH}) \tag{4}$$

$$IV(F/Cl) = IV(F) - IV(Cl) \tag{5}$$

$$X_{sid} = [(3 - Si/Al) / 1.75] (1 - X_{phl}) \tag{6}$$

$$X_{ann} = 1 - (X_{phl} + X_{sid}) \tag{7}$$

计算结果表明,IV(F) 值与 F 的富集程度呈反比,而 IV(Cl) 值负的程度与 Cl 富集程度呈正相关(Munoz, 1984; Yavuz, 2003)。研究表明,铜主要以



(a) 底图据 David 和 Hans(1965); (b) 底图据 Jin 等(2018)。

HM: 磁铁矿-赤铁矿; NNO: 镍-氧化镍; QFM: 石英-铁橄榄石-磁铁矿

图4 霍洛台和宝泉铜钼矿床黑云母相关图解

Fig. 4 The Fe^{3+} - Fe^{2+} - Mg^{2+} diagram of biotites from the Huoluotai and Baoquan deposits

氯的配合物形式在成矿流体中运移 (Xiao et al., 1998) 因此在斑岩铜矿床中岩浆一般富 Cl, 而斑岩钼矿中岩浆常富 F (Munoz, 1984)。霍洛台和宝泉铜钼矿床黑云母 IV(F) 分别为 1.78 ~ 1.90 和 1.97 ~ 2.33, 平均值分别为 1.82 和 2.13; IV(Cl) 值分别为 -3.12 ~ -2.92 和 -3.17 ~ -2.75, 平均值分别为 -3.04 和 -2.92。霍洛台和宝泉铜钼矿床黑云母均投于 IV(F/Cl) - IV(F) 图解的斑岩钼矿和钨矿床附件(图 4b)。由此可见, 霍洛台和宝泉铜钼矿床比其他斑岩型铜矿富 F, 这与矿区发现大量的辉钼矿脉和萤石脉的地质现象一致。而相比于宝泉铜钼矿床, 霍洛台铜钼矿床更富 F, 指示矿区辉钼矿更为发育, 这也被野外地质现象所证实。

如上所述, 黑云母 Cl 和 F 含量控制金属运移, 在斑岩型铜钼矿床形成过程中具有重要的作用, 因此被广泛用来计算岩浆或热液的卤素逸度来评估成矿条件(唐攀等, 2017; Jin et al., 2018)。本文利用 Munoz (1992) 定义的公式计算与黑云母成分平衡的硅酸盐熔体的卤素逸度比值。结果显示, 霍洛台和宝泉黑云母具有相似的 $lg(f_{HF}/f_{HCl})$ 值分别为, 指示两个矿区的成矿岩浆具有相似的 F/Cl 值。但宝泉黑云母比霍洛台黑云母具有更高的 $lg(f_{H_2O}/f_{HCl})$ 和 $lg(f_{H_2O}/f_{HF})$ 值(图 5), 指示宝泉成矿岩浆具有较高的 H_2O 含量。

与世界上典型的斑岩型铜矿或铜钼矿(如 Ma-her Abad & Batu Hijau 铜矿、萝卜岭铜钼矿)相比,

霍洛台和宝泉黑云母具有较高的 $lg(f_{HF}/f_{HCl})$ 值(图 5)。但与 Climax 等斑岩型钼矿相比, $lg(f_{HF}/f_{HCl})$ 值相对较低。霍洛台和宝泉黑云母卤素逸度值表明成矿岩浆具有介于斑岩型铜矿和钼矿之间的 F/Cl 值(图 5)。由于 Cl 是 Cu 在热液运移中的重要配体 (Candela and Holland, 1984), 而 F 在 Mo 的富集和搬运过程起重要作用 (Keppler and Wyllie, 1991), 因此, 霍洛台和宝泉成矿岩体内黑云母中度的卤素逸度值表明这些岩体更倾向于形成铜钼矿床而非单一的铜矿或者钼矿。这与矿区观察到的同时发育脉状或浸染状黄铜矿和辉钼矿现象一致。

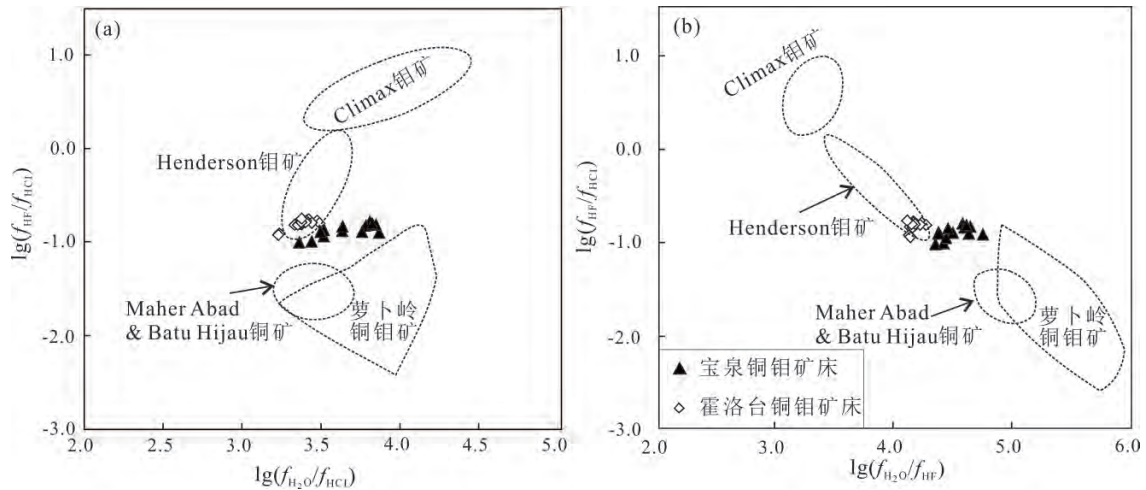
4 结论

(1) 大兴安岭北段晚侏罗世霍洛台和早白垩世宝泉铜钼矿床成矿岩体内黑云母均为镁质黑云母, 母岩浆为活动陆缘环境下壳幔熔体混合的产物。

(2) 黑云母压力计和温度计指示两个矿床成矿岩体侵位深度分别为 2.55 ~ 3.60 km 和 3.85 ~ 5.33 km, 结晶温度分别为 738 ~ 761 °C 和 725 ~ 749 °C。

(3) 霍洛台和宝泉矿床成矿岩浆氧逸度均在 HM 缓冲剂附近, 表明岩浆氧逸度较高, 有利于斑岩型矿床的形成。

(4) 与典型斑岩型铜钼矿相比, 大兴安岭北段晚中生代斑岩型铜钼矿床黑云母具有中度的 $lg(f_{HF}/f_{HCl})$, $lg(f_{H_2O}/f_{HCl})$ 和 $lg(f_{H_2O}/f_{HF})$ 卤素逸度比值, 指示这些岩体具有同时发生 Cu 和 Mo 矿化的潜力。



底图据 Jin 等 (2018)

图5 霍洛台和宝泉铜钼矿床黑云母 $\lg(f_{\text{HF}}/f_{\text{HCl}}) - \lg(f_{\text{H}_2\text{O}}/f_{\text{HCl}})$ (a) 和 $\lg(f_{\text{HF}}/f_{\text{HCl}}) - \lg(f_{\text{H}_2\text{O}}/f_{\text{HF}})$

(b) 与其他斑岩矿床对比图

Fig. 5 The $\lg(f_{\text{HF}}/f_{\text{HCl}}) - \lg(f_{\text{H}_2\text{O}}/f_{\text{HCl}})$ (a) and $\lg(f_{\text{HF}}/f_{\text{HCl}}) - \lg(f_{\text{H}_2\text{O}}/f_{\text{HF}})$ (b) diagrams for

biotites from the Huoluotai and Baoquan deposits

(5) 大兴安岭北段具有良好的晚中生代斑岩型铜钼矿床形成条件。

致谢: 中国冶金地质总局山东局测试中心林培军主任及技术人员在数据测试方面给予帮助, 黑龙江省第一地质调查院在野外采样中给予支持, 在此一并致谢。

参考文献 (References):

- Abdel-Rahman A F M. 1994. Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline, and peraluminous magmas. *Journal of Petrology*, 35(2): 525-541
- Bi X W, Hu R Z, Hanley J J, Mungall J E, Peng J T, Shang L B, Wu K X, Yan S A, Li H L, Hu X Y. 2009. Crystallisation conditions (T, P, f_{O_2}) from mineral chemistry of Cu- and Au- mineralised alkaline intrusions in the Red River-Jinshajiang alkaline igneous belt, western Yunnan Province, China. *Mineralogy and Petrology*, 96(1): 43-58
- Boomeri M, Nakashima K, Lentz D R. 2009. The Miduk porphyry Cu deposit, Kerman, Iran: a geochemical analysis of the potassic zone including halogen element systematics related to Cu mineralization processes. *Journal of Geochemical Exploration*, 103(1): 17-29
- Candela P A, Holland H D. 1984. The partitioning of Copper and molybdenum between silicate melts and aqueous fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(2): 373-380
- David R W, Hans P E. 1965. Stability of biotite: experiment, theory, and application. *American Mineralogist*, 50(9): 1228-1272
- Deng C Z, Sun D Y, Han J S, Li G H, Feng Y Z, Xiao B, Li R C, Shi H L, Xu G Z, Yang D G. 2019a. Ages and petrogenesis of the Late Mesozoic igneous rocks associated with the Xiaokele porphyry Cu-Mo deposit, NE China and their geodynamic implications. *Ore Geology Reviews*, 107: 417-433
- Deng C Z, Sun D Y, Han J S, Chen H Y, Li G H, Xiao B, Li R C, Feng Y Z, Li C L, Lu S. 2019b. 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. *Lithos*, 326-327: 341-357
- Deng C Z, Sun D Y, Li G H, Lu S, Tang Z Y, Gou J, Yang Y J. 2019c. Early Cretaceous volcanic rocks in the Great Xing' an Range: Late effect of a flat-slab subduction. *Journal of Geodynamics*, 124: 38-51
- Deng C Z, Sun G Y, Rong Y M, Sun R Y, Sun D Y, Lehmann B, Yin R S. 2021. Recycling of mercury from the atmosphere-ocean system into volcanic-arc-associated epithermal gold systems. *Geology*, 49(3): 309-313
- Feng Y Z, Xiao B, Li R C, Deng C Z, Han J S, Wu C, Li G H, Shi H L, Lai C. 2019. Alteration mapping with short wavelength infrared (SWIR) spectroscopy on Xiaokelehe porphyry Cu-Mo deposit in the Great Xing' an Range, NE China: Metallogenic and exploration implications. *Ore Geology Reviews*, 112: 103062
- Feng Y Z, Chen H Y, Xiao B, Li R C, Deng C Z, Han J S, Li G H, Shi H L, Lai C. 2020. Late Mesozoic magmatism at Xiaokelehe Cu-Mo deposit in Great Xing' an Range, NE China: Geodynamic and metallogenic implications. *Lithos*, 374-375: 105713
- Foster M D. 1960. Interpretation of the composition of trioctahedral micas. Washington, DC: United States Government Printing Office, 11-49
- Henry D J, Guidotti C V, Thomson J A. 2015. The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms. *American Mineralogist*, 90(2-3): 316-328
- Henry D J, Guidotti C V. 2015. Titanium in biotite from metapelitic

- rocks: Temperature effects, crystal-chemical controls, and petrologic applications. *American Mineralogist*, 87(4): 375–382
- Jin C, Gao X Y, Chen W T, Zhao T P. 2018. Magmatic-hydrothermal evolution of the Donggou porphyry Mo deposit at the southern margin of the North China Craton: Evidence from chemistry of biotite. *Ore Geology Reviews*, 92: 84–96
- Keppler H, Wyllie P J. 1991. Partitioning of Cu, Sn, Mo, W, U, and Th between melt and aqueous fluid in the systems haplogranite-H₂O-HCl and haplogranite-H₂O-HF. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 109(2): 139–150
- Li C L, Deng C Z, Li S R, Yuan M W, Alam M, Liu B S, Zhao Z H, Li W L, Yang Y J. 2021. Geochronology and genesis of the newly discovered Mengdehe orogenic-type Au deposit in the Xing'an-Mongolia Orogenic Belt, NE China. *Ore Geology Reviews*, 133: 104083
- Li X Y, Zhang C, Behrens H, Holtz F. 2020. Calculating biotite formula from electron microprobe analysis data using a machine learning method based on principal components regression. *Lithos*, 356–357: 105371
- Li Y, Xu W L, Tang J, Pei F P, Wang F, Sun C Y. 2018. Geochronology and geochemistry of Mesozoic intrusive rocks in the Xing'an Massif of NE China: Implications for the evolution and spatial extent of the Mongol-Okhotsk tectonic regime. *Lithos*, 304–307: 57–73
- Munoz J L. 1984. F-OH and Cl-OH exchange in micas with applications to hydrothermal ore deposits. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 13(1): 469–493
- Munoz J L. 1992. Calculation of HF and HCl fugacities from biotite compositions: revised equations. *Geological Society of American Abstract Programs*, 24: A221
- Rieder M, Cavazzini G, D'yakov Y S, Frank-Kamenetskii V A, Gottardi G, Guggenheim S, Koval' P W, Müller G, Neiva A M R, Radostovich E W, Robert J L, Sassi F P, Takeda H, Weiss Z, Wones D R. 1998. Nomenclature of the micas. *Clays and Clay Minerals*, 46(5): 586–595
- Selby D, Nesbitt B E. 2000. Chemical composition of biotite from the Casino porphyry Cu-Au-Mo mineralization, Yukon, Canada: evaluation of magmatic and hydrothermal fluid chemistry. *Chemical Geology*, 171(1–2): 77–93
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1): 3–41
- Sun Y G, Li B L, Ding Q F, Qu Y, Wang C K, Wang L L, Xu Q L. 2020a. Mineralization age and hydrothermal evolution of the Fukehan Cu (Mo) deposit in the northern great Xing'an range, north-east China: Evidence from fluid inclusions, H-O-S-Pb isotopes, and Re-Os geochronology. *Minerals*, 10(7): 591
- Sun Y G, Li B L, Sun F Y, Ding Q F, Wang B Y, Li Y J, Wang K. 2020b. Mineralization events in the Xiaokele porphyry Cu (-Mo) deposit, NE China: Evidence from zircon U-Pb and K-feldspar Ar-Ar geochronology and petrochemistry. *Resource Geology*, 70(3): 254–272
- Uchida E, Endo S, Makino M. 2007. Relationship between solidification depth of granitic rocks and formation of hydrothermal ore deposits. *Resource Geology*, 57(1): 47–56
- Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, Zhang Y B, Grant M L, Wilde S A, Jahn B M. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in north-eastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1–30
- Xiao Z F, Gammons C H, Williams-Jones A E. 1998. Experimental study of copper(I) chloride complexing in hydrothermal solutions at 40 to 300°C and saturated water vapor pressure. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(17): 2949–2964
- Xu G Z, Deng C Z, Li C L, Lv C L, Yin R S, Ding J S, Yuan M W, Gou J. 2020. Petrogenesis of Late Carboniferous A-type granites and Early Cretaceous adakites of the Songnen Block, NE China: Implications for the geodynamic evolution of the Paleo-Asian and Paleo-Pacific oceans. *Lithos*, 366–367: 105575
- Xu W L, Pei F P, Wang F, Meng E, Ji W Q, Yang D B, Wang W. 2013. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 167–193
- Yavuz F. 2003. Evaluating micas in petrologic and metallogenic aspect: Part II—Applications using the computer program Mica⁺. *Computers & Geosciences*, 29(10): 1215–1228
- Zhu C, Sverjensky D A. 1991. Partitioning of F-Cl-OH between minerals and hydrothermal fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(7): 1837–1858
- 陈国良, 张忠坤, 孙渺, 林彬, 赫健, 唐攀, 格桑顿珠, 苏贵喆, 任绍渊, 胡海涛. 2021. 西藏甲玛矿床南坑高分异 I 型花岗斑岩及黑云母矿物学特征. *矿物岩石地球化学通报*, 40(2): 411–424
- 陈华勇, 吴超. 2020. 俯冲带斑岩铜矿系统成矿机理与主要挑战. *中国科学: 地球科学*, 50(7): 865–886
- 陈雷, 闫臻, 王宗起, 吴发富, 王瑞廷, 任涛, 郭延辉, 王鹏. 2014. 陕西山阳-柞水矿集区燕山期岩体矿物学特征: 对岩浆性质及成矿作用的指示. *地质学报*, 88(1): 109–133
- 邓昌州. 2019. 大兴安岭北部中生代斑岩铜矿: 成岩与成矿. 博士学位论文. 长春: 吉林大学
- 冯雨周, 邓昌州, 陈华勇, 李光辉, 肖兵, 李如操, 时慧琳. 2020. 大兴安岭北段小柯勒河铜钼矿床硫化物 Re-Os 年龄及其地质意义. *大地构造与成矿学*, 44(3): 465–475
- 高飞, 庞雅庆, 林锦荣, 胡志华. 2014. 诸广棉花坑钼矿床花岗岩中黑云母成分特征及其成岩成矿意义. *矿物岩石地球化学通报*, 33(3): 384–388
- 高轲, 多吉, 唐菊兴, 张志, 宋俊龙, 丁帅, 宋扬, 林彬, 冯军. 2016. 西藏多龙矿集区拿若铜(金)矿床蚀变特征. *矿物岩石地球化学通报*, 35(6): 1226–1237
- 黑龙江省地质矿产局. 1993. 黑龙江省区域地质志. 北京: 地质出版社
- 胡清华, 张世权, 尹静, 黄定柱, 伍健兢, 孟青, 杨丽梅, 罗光明. 2010. 中甸普朗斑岩型铜矿床围岩蚀变初步研究. *矿物岩石地球化学通报*, 29(2): 192–201
- 李鸿莉, 毕献武, 涂光焯, 胡瑞忠, 彭建堂, 吴开兴. 2007. 岩背花岗岩黑云母矿物化学研究及其对成矿意义的指示. *矿物岩石*, 27(3): 49–54
- 李如操, 陈华勇, 李光辉, 冯雨周, 肖兵, 韩金生, 邓昌州, 时慧琳. 2020. 大兴安岭地区富克山斑岩铜钼矿床地质特征与 SWIR 勘查应用. *地球科学*, 45(5): 1517–1530

吕志成,段国正,董广华. 2003. 大兴安岭中南段燕山期三类不同成矿花岗岩中黑云母的化学成分特征及其成岩成矿意义. 矿物学报, 23(2): 177-184

阮林森,陆三明,赵丽丽,金敏,张怀东,王波华,江来利. 2017. 沙坪沟钼矿床岩浆岩中镁铁云母地球化学特征及其成岩成矿意义. 矿物岩石地球化学通报, 36(3): 502-509

尚毅广,孙丰月,姜和芳,王启,尹悦,孟庆鹏,张志颖. 2017. 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. 世界地质, 36(2): 474-485

唐攀,陈毓川,唐菊兴,郑文宝,冷秋锋,林彬,方向. 2016. 西藏甲玛斑岩矿床系统黑云母特征及其地质意义. 矿床地质, 35

(4): 846-866

唐攀,唐菊兴,郑文宝,冷秋锋,林彬,唐晓倩. 2017. 西藏拉抗俄斑岩铜钼矿床黑云母矿物化学特征. 地学前缘, 24(5): 265-282

武广. 2006. 大兴安岭北部区域成矿背景与有色、贵金属矿床成矿作用. 博士学位论文. 长春: 吉林大学

熊小林,石满全,陈繁荣. 2001. 浅成-次火山岩黑云母 Cu, Au 成矿示踪意义. 矿床地质, 20(2): 107-111

周作侠. 1986. 湖北丰山洞岩体成因探讨. 岩石学报, 2(1): 59-70

(本文责任编辑: 龚超颖; 英文审校: 张兴春)

•学会之声•

中国矿物岩石地球化学学会2021年第二季度会员发展公告 (2021年2号)

经秘书长审核,自2021年4月1日至6月30日,以下47名同志为本会2021年第二季度发展的新会员。自公布之日起承认其会籍,接受学会的服务。

中国矿物岩石地球化学学会
2021年7月10日

姓名	性别	工作单位	会员证号	姓名	性别	工作单位	会员证号
张玉涛	男	安顺学院	S130004422S	孟庆峰	男	中国石油大学(华东)	S130004443S
张海桃	男	自然资源部第一海洋研究所	S132304456S	刘立虎	男	华中农业大学	S130004421S
张恩楼	男	中国科学院南京地理与湖泊研究所	S130004449S	刘斌	女	遵义师范学院	S130004416S
尹远	男	中国科学院地球化学研究所	S131304436S	廖鹏	男	中国科学院地球化学研究所	S130004427S
尹润生	男	中国科学院地球化学研究所	S130004428S	李增华	男	东华理工大学	S130004439S
叶希青	女	吉林省地震局	S130004434S	李玉锋	男	中国科学院高能物理研究所	S130004420S
杨祝良	男	中国地质调查局南京地质调查中心	S130004446S	李文博	男	北京大学	S130004411S
许阳	男	青岛海洋科学与技术试点国家实验室	S130004459S	李季伟	男	中国科学院深海科学与工程研究所	S130004413S
徐智涛	男	吉林省地震局	S130004430S	蓝江湖	男	中国科学院地球环境研究所	S130004423S
徐维海	男	中国科学院南海海洋研究所	S130004451S	姜鹏	男	国家天文台	S130004454S
徐良伟	男	河北地质大学	S130004414S	江韬	男	西南大学	S131604431S
王训	男	中国科学院地球化学研究所	S130004426S	黄丰	男	中国地质大学(北京)	S130004412S
王文峰	男	新疆大学	S130004450S	何天容	女	贵州大学	S130004424S
王青峰	男	遵义师范学院	S130004418S	何师意	男	中国地质科学院岩溶地质研究所	S130004444S
王磊	男	中国地质调查局武汉地质调查中心	S130004445S	郝记华	男	中国科学技术大学	S130004417S
王俊坚	男	南方科技大学	S130004448S	谷洪彪	男	防灾科技学院	S130004457S
王春连	男	中国地质科学院矿产资源研究所	S130004435S	高晓峰	男	西安地质调查中心	S130004458S
童辉	男	广东省科学院生态环境与土壤研究所	S130004442S	丁林	男	中国科学院青藏高原研究所	S130004455S
孙涛	男	中国科学院大学	S130004447S	翟庆国	男	中国地质科学院地质研究所	S130004452S
盛恩国	男	遵义师范学院	S130004437S	邓昌州	男	中国科学院地球化学研究所	S131304425S
曲凯	男	中国地质调查局天津地质调查中心	S130004415S	程红光	男	中科院地球化学研究所	S130004453S
邱国红	男	华中农业大学	S130004419S	陈曼佳	女	广东省科学院生态环境与土壤研究所	S130004440S
盘晓东	男	吉林省地震局	S130004433S	曾广能	男	贵州民族大学	S130004441S
孟元库	男	山东科技大学	S130004429S				