

内蒙古上打井斑岩型钼矿床绿泥石特征及成矿意义

葛祥坤¹, 句海玉², 赵峰华², 范光¹, 孙思辰³, 艾钰洁¹

(1. 核工业北京地质研究院, 北京 100029; 2. 中国矿业大学(北京), 北京 100083; 3. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083)

[摘要] 内蒙古劳家沟上打井斑岩型钼矿床是近年来在西拉木伦钼矿带新发现的一个矿床, 其绿泥石化蚀变与钼矿化关系具有密切的时空关系。因此, 对绿泥石化学成分的分析, 有助于查明该矿床成矿过程的物化条件。本文采集矿区典型绿泥石样品, 通过岩矿鉴定, 结合绿泥石的电子探针化学成分分析, 研究其特征。分析结果显示, 该矿床绿泥石以富铁种属铁镁绿泥石为主, 个别为铁绿泥石, 揭示其形成于还原环境; 绿泥石结构的离子置换主要体现为 Fe、Mg 间的置换; 由绿泥石温度计估算得到绿泥石的形成温度为 270~344°C, 平均 312°C; 绿泥石形成机制: 一为先溶蚀, 后结晶; 二为先溶蚀, 后迁移, 最后结晶。绿泥石的成分特征在一定程度上可以反映热液流体特征, 绿泥石化可作为该区钼成矿的找矿标志。

[关键词] 绿泥石 化学成分 电子探针 成矿意义 上打井钼矿 西拉木伦钼矿带 内蒙古

[中图分类号] P614 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2020)04-0704-09

Ge Xiangkun, Ju Haiyu, Zhao Fenghua, Fan Guang, Sun Sichen, Ai Yujie. Characteristics of chlorites in the Shangdajing porphyry Mo deposit, Inner Mongolia and their metallogenetic implications[J]. Geology and Exploration, 2020, 56(4): 0704~0713.

绿泥石在自然界普遍存在, 分布于变质岩和许多矿床的蚀变围岩中, 通常是热液蚀变和低级变作用的产物。由于绿泥石的分子结构和成分可以反映热液流体特征和水-岩反应条件(郑伟等, 2013), 可以根据绿泥石的化学成分、结构、共生矿物组合以及形成绿泥石的原岩成分推测其形成时的物理化学条件, 进而揭示金属矿床的成矿作用(Cathelineau and Nieva, 1985; 肖志峰等, 1993; 艾永富和刘国平, 1998), 尤其是钼、铜、铀等金属矿床的成矿作用与绿泥石化关系密切, 近年来众多学者报导了相关研究内容(王小雨等, 2014; 孙军刚等, 2015; 杨超等, 2015; 方维萱等, 2017; 鲁佳等, 2017; 何光辉等, 2018; 刘萌等, 2018; 秦蕾胜等, 2018; 吴德海等, 2018; 章健等, 2018)。矿物温度计运用是当前绿泥石的研究热点之一, 其在地热、矿床和盆地古

地温梯度研究等方面运用广泛(赵明等, 2007; 戴朝成等, 2017; 许讯等, 2017)。

近年来, 内蒙古发现了众多金属矿床(张作伦等, 2018; 沈存利等, 2019)。劳家沟上打井斑岩型钼矿床位于内蒙古阿鲁科尔沁旗南 10 km 处的劳家沟多金属矿区, 地处内蒙古中部地槽褶皱系中部地带, 大兴安岭山脉南缘地区。该矿床是近年来内蒙古阿鲁科尔沁旗世纪恒盛矿业开发有限公司在该区新发现的一个矿床。由于发现时间较短, 前人对区内的铅、锌、银等有色金属矿床研究较多, 鲜有涉及钼矿床的研究, 仅有针对钼矿床的研究主要集中在成矿年代学和成矿流体方面。曾庆栋等(2009)通过对矿床地质和含矿围岩岩石学、矿物学、成岩和成矿年代学研究, 明确了上打井钼矿床的矿床类型和成岩成矿动力学背景。刘利等(2012)通过对矿

[收稿日期] 2018-03-13; [改回日期] 2020-03-25; [责任编辑] 郝倩倩。

[基金项目] 中核集团地矿事业部铀矿地质科研项目“基于扫描电镜的岩矿石相定量分析方法研究”(编号: 测 D1706) 和中核集团“龙腾”2020 科技创新计划项目(编号: 测 LTC1605-2) 联合资助。

[第一作者] 葛祥坤(1980 年-), 男, 2013 年毕业于核工业北京地质研究院, 矿产普查与勘探专业, 获博士学位, 正高级工程师, 现主要从事电子探针等微束分析工作。E-mail: gzk0621@163.com。

石样品中脉石矿物石英中流体包裹体的岩相学、热力学分析,查明了劳家沟上打井钼矿床的成矿流体特征、演化规律。姜大伟等(2019)对该矿床的蚀变矿化特征、成岩成矿时代以及成矿流体特征进行了研究。绿泥石作为该矿床热液蚀变的主要矿物,其形成和演化记录了成矿过程的物理化学环境。因此,本文通过光学显微镜和电子探针显微分析仪等显微分析手段,对该矿床中绿泥石的组分、类型和共生矿物组合进行了研究,从而推测了其形成温度、环境及其形成机制,并探讨了绿泥石与成矿的关系,为今后矿区的勘探开发提供有效的科学依据。

1 地质背景

劳家沟矿区地处内蒙古中部地槽褶皱系中部地带,大兴安岭山脉南缘地区。出露地层主要为上侏罗统满克头鄂博组(J_3w),岩性以沉积火山碎屑岩-火山岩为主。矿区构造是一系列北西-北东向的张扭性弧形断裂强应变带,经历了长期的地质演变,地质构造错综复杂。矿区主要发育有小型断裂构造,褶皱构造少有发育。受NW向和近EW向断裂以及斑杂岩体侵位的影响,区内节理裂隙比较发育,从而使网脉状石英脉普遍发育,为钼矿床形成提供了良好的控矿和容矿空间(曾庆栋等,2009;刘利等,2012)。

矿区分布广泛的岩浆岩,主要由斑状二长花岗岩、中粗粒二长花岗岩、中细粒斑状二长花岗岩、不等粒二长花岗岩、斑状钾长花岗岩等组成,形成大的花岗岩岩基,各种岩性无明显界限,形成斑杂岩体,是区域天山岩基的重要组成部分,岩体内出露有大量岩脉,岩性为花岗斑岩、流纹斑岩。岩体主体部分出露在上打井北部,周边均为斑杂岩体区。区内岩浆活动为中晚三叠世中酸性岩浆岩的侵入作用,其产出形态为岩体和脉岩两类。上打井斑岩钼矿体赋存于上打井斑状二长花岗岩体中,呈岩基产出,岩石具有似斑状结构、斑晶结构。已有研究表明,上打井花岗斑杂岩体主要由斑状二长花岗岩、二长花岗岩组成,斑状二长花岗岩锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄为 241.3 ± 1.3 Ma,二长花岗斑岩锆石LA-ICP MS U-Pb年龄为 238.6 ± 1.8 Ma,均形成于中三叠世(曾庆栋等,2009),表明区内存在印支期的岩浆活动。

上打井钼矿床受斑杂岩体的控制,岩浆热液活

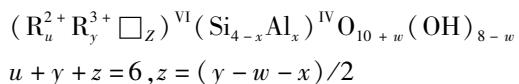
动使斑杂岩体发生了不同程度的蚀变(图1),与成矿有关的蚀变主要为硅化、钾长石化、绿泥石化、绿帘石化、高岭石化、黄铁矿化。硅化强蚀变“核”及钾长石化形成了铜钼矿体,分布范围广,强度大,延续时间长,是与铜钼成矿关系最密切的一种面型蚀变类型(曾庆栋等,2009)。从图1可知,平面上从中心到外围钾化带-云英岩化带-硅化、泥化带-青磐岩化带。剖面上矿体呈近密集“层”状产出,北东 70° 方向延伸,南北两侧产状变陡,整体东部向上翘起,西部向下倾伏。已有研究表明,辉钼矿Re-Os等时线年龄为 234.9 ± 3.1 Ma,形成时代也为中三叠世(曾庆栋等,2009)。成岩成矿测定结果显示,成矿年龄与二长花岗斑岩年龄相近,反映了区内成矿作用与二长花岗斑岩有关。

2 绿泥石显微特征

通过细致的镜下观察发现,上打井斑岩型钼矿床绿泥石主要呈片状、磷片状,在单偏光下为浅灰绿色至浅黄绿色,常发育在矿物间隙或石英脉边缘(图2b、2c),正交偏光下个别颗粒显靛蓝异常干涉色(图2d)。绿泥石与辉钼矿、黄铜矿、黄铁矿等硫化物矿物紧密共生,反应其与成矿关系密切;且广泛交代黑云母,沿石英等矿物裂隙分布、充填(图2e、2f)。该矿区绿泥石常与黄铁矿、黄铜矿等热液矿物紧密共生,属于热液成因绿泥石。

3 绿泥石化学成分特征

绿泥石族矿物由两个四面体层中间夹一个八面体层组成(相当于三层型TOT结构),其结构通式为:



式中 R^{2+} 代表二价阳离子(Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 或 Fe^{2+}), R^{3+} 代表三价阳离子(Fe^{3+} 、 Cr^{3+} 或 Al^{3+}), \square 表示结构空穴,上角标VI和IV分别表示六次配位和四次配位, w 值一般为0或很小。绿泥石化学成分受形成环境差异变化较大, FeO 和 MgO 含量高是绿泥石区别于其他粘土矿物的特征之一。

本文选取矿区钻孔5503、6302、6505、6703中4个典型绿泥石样品,在细致的显微镜下观察后,明确其与钼矿形成具有密切关系,能够用于揭示钼矿形

成环境。共选取其中 25 个绿泥石颗粒进行了电子探针测试,分析矿物化学成分。测试条件和测试结果见表 1。

据前人研究,绿泥石中三价铁含量与总铁含量的比例通常不超过 5%,可以用二价铁代表总 Fe

(Deer et al., 1962; Shirozu, 1978)。尽管电子探针不能直接测试 Fe 的价态,但根据电价守恒的计算方法,本文所测所有绿泥石中 Fe^{3+} 占 Fe^{T} 的含量为 2.09% ~ 4.22%, 均不大于 5%, 故本文近似地用表 1 中的 FeO 代表全铁含量。

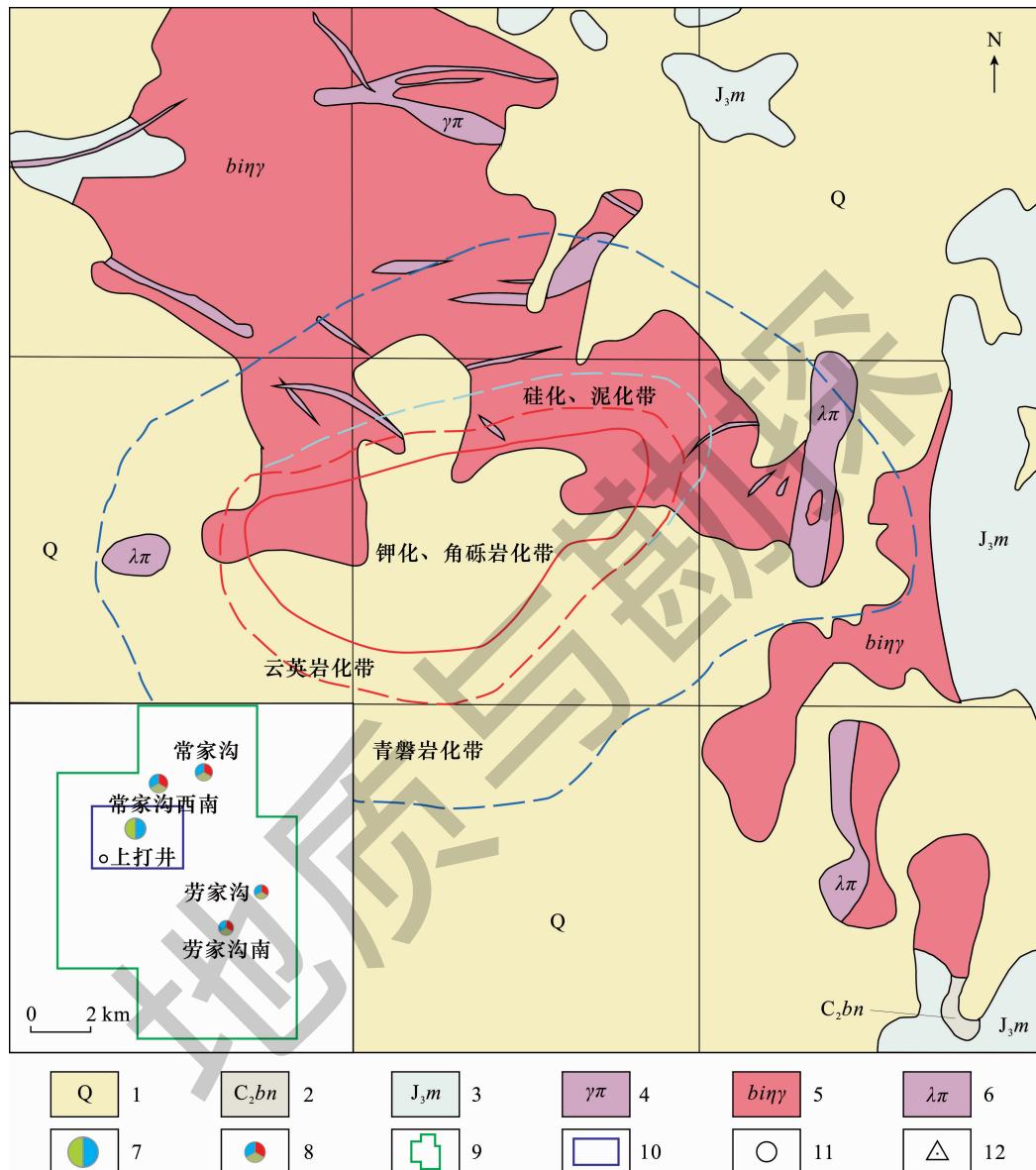


图 1 内蒙古上打井斑岩型钼矿床蚀变带分布图(据曾庆栋等,2009 改编)

Fig. 1 Distribution map of alteration zone in the Shangdajing Mo deposit of Inner Mongolia(modified from Zeng et al., 2009)

1 - 第四系;2 - 上石炭统木巴图组;3 - 上侏罗统满克头鄂博组;4 - 花岗斑岩;5 - 斑状二长花岗岩;6 - 流纹斑岩;7 - 斑岩型铜钼矿床;8 - 铅锌多金属矿点;9 - 探矿权范围;10 - 斑岩型铜钼矿床范围;11 - 村庄及其位置;12 - 山体
1 - Quaternary;2 - Upper Carboniferous Batu Formation;3 - Upper Jurassic Manketou Ebo Formation;4 - granite porphyry;5 - porphyritic adamellite;6 - rhyolite porphyry;7 - porphyry copper - molybdenum deposit;8 - lead - zinc polymetallic deposit;9 - prospecting area;10 - area of porphyry copper - molybdenum deposit;11 - village and its location;12 - mountain

由表 1 可以看出, SiO_2 含量为 25.06% ~ 28.05%, 均值为 26.54%; Al_2O_3 为 18.13% ~

21.50%, 均值 20.10%; FeO 为 24.14% ~ 29.89%, 均值为 26.91%; MgO 为 10.63% ~ 16.01%, 均值为

13.43%; MnO 为 0.20% ~ 0.81%, 均值为 0.62%。将绿泥石进行成分投图(以 14 个氧原子为标准计算, 表 2), 见图 3。结果显示, 研究区内的绿泥石主要为铁镁绿泥石, 少量为铁绿泥石。

根据 Walshe(1986), 绿泥石成分中可能发生的阳离子置换反应主要有 $(\text{Si}^{4+})^{\text{IV}} (\text{Mg}^{2+})^{\text{VI}} - (\text{Al}^{3+})^{\text{IV}}$

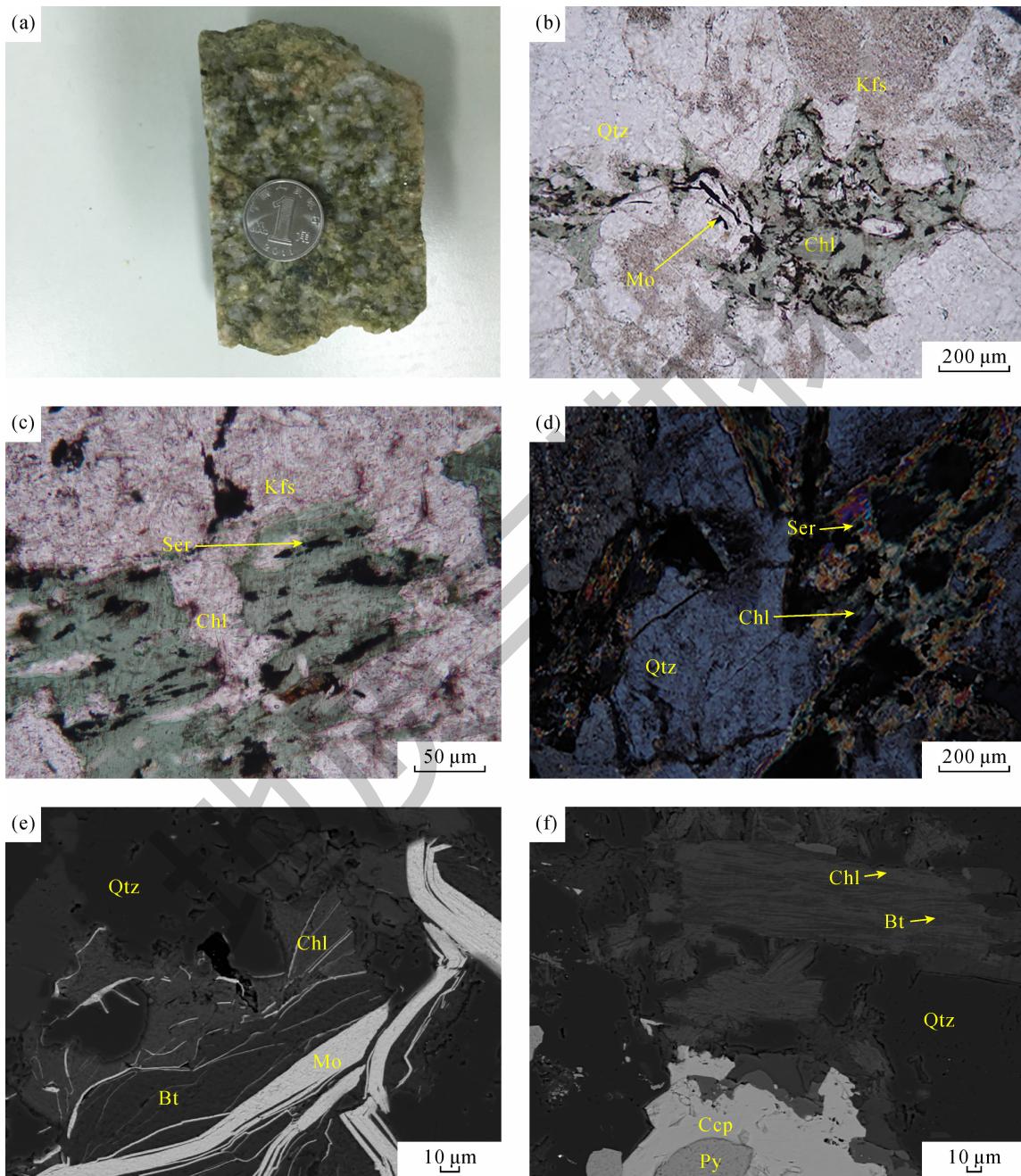
 $(\text{Al}^{3+})^{\text{VI}} (\text{Mg}^{2+})^{\text{IV}} - (\text{Fe}^{2+})^{\text{IV}} (\text{Al}^{3+})^{\text{IV}} - (\text{Fe}^{3+})^{\text{IV}} 3 (\text{Mg}^{2+})^{\text{VI}} - 2 (\text{Al}^{3+})^{\text{VI}} \square^{\text{VI}} (\text{Fe}^{2+})^{\text{VI}} 2 (\text{OH})^- - (\text{Fe}^{3+})^{\text{VI}} \text{O}^{2-} (\text{OH})^- (\text{Si}^{4+})^{\text{IV}} (\text{Al}^{3+})^{\text{VI}} \square^{\text{VI}} - (\text{Al}^{3+})^{\text{IV}} 2 (\text{Fe}^{2+})^{\text{VI}} \text{和 } 3 (\text{Fe}^{2+})^{\text{VI}} - 2 (\text{Al}^{3+})^{\text{VI}} \square^{\text{VI}}$ 。结合表 2 数据, 对绿泥石成分进行主要阳离子相关关系投图, 见图 4。


图 2 上打井矿床中绿泥石显微照片

Fig. 2 Microphotographs of chlorites from the Shangdajing deposit

a – 钼矿石手标本; b、c – 单偏光照片; d – 正交偏光照片; e、f – 背散射照片; Chl – 绿泥石; Qtz – 石英; Bt – 黑云母; Mo – 辉钼矿; Ser – 绢云母; Ccp – 黄铜矿; Py – 黄铁矿; Kfs – 钾长石

a – hand specimen of molybdenum ore; b, c – plane-polarized light image; d – orthogonal polarized light image; e, f – backscattered electron image; Chl – chlorite; Qtz – quartz; Bt – biotite; Mo – molybdenite; Ser – sericite; Ccp – chalcopyrite; Py – pyrite; Kfs – potassium feldspar

表 1 打井矿床绿泥石的化学成分(%)

Table 1 Chemical composition (%) of chlorites from the Shangdajing deposit

样品号	测点号	MgO	FeO	MnO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Total
5503	1	12.02	28.36	0.78	20.66	25.84	87.66
	2	14.48	26.15	0.54	20.59	26.77	88.53
	3	15.61	25.35	0.68	20.53	27.26	89.43
	4	12.88	26.63	0.7	20.61	25.82	86.64
	5	15.16	24.14	0.51	20.11	26.59	86.51
	6	13.22	26.73	0.66	20.38	26.02	87.01
6302	1	14.35	25.99	0.81	20.52	26.52	88.19
	2	12.77	27.02	0.68	20.59	26.33	87.39
	3	15.68	25.26	0.56	18.77	27.55	87.82
	4	15.5	25.05	0.51	18.87	27.92	87.85
	5	16.01	24.38	0.48	18.13	28.05	87.05
	6	11.41	29.62	0.69	20.03	25.85	87.6
	7	10.63	29.09	0.7	21.5	25.06	86.98
	8	12.34	28.13	0.71	20.78	26.22	88.18
6505	1	12.21	29.89	0.58	18.81	27.12	88.61
	2	13.32	27.34	0.6	20.56	26.95	88.77
	3	11.35	28.69	0.65	20.68	25.32	86.69
	4	12	28.76	0.66	20.01	26.72	88.15
6703	1	13.59	25.86	0.62	20.39	26.65	87.11
	2	12.99	27.62	0.56	20.29	26.08	87.54
	3	12.91	27.26	0.65	20.06	26.53	87.41
	4	13.3	26.74	0.63	18.84	26.34	85.85
	5	15.21	24.89	0.2	20.67	26.92	87.89

注:电子探针型号为 JXA - 8100, 加速电压 20 kV, 束流 10 nA, 束斑直径 2 μm; Na、Ca、V、Cr、Ti、P 等元素含量普遍低于检出限, 未列出。

表 2 上打井矿床绿泥石各元素的原子数及特征值(以 14 个 O 原子为基准)

Table 2 Atom number of elements and characteristic values of chlorites from the Shangdajing deposit (based on 14 oxygen atoms)

样品号	测点号	MgO	FeO	MnO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Fe/(Fe + Mg)	t (°C)
5503	1	1.93	2.56	0.07	2.63	2.79	1.21	1.41	0.57	328
	2	2.27	2.3	0.05	2.55	2.82	1.18	1.37	0.5	318
	3	2.41	2.19	0.06	2.5	2.82	1.18	1.33	0.48	318
	4	2.08	2.41	0.06	2.63	2.79	1.21	1.42	0.54	328
	5	2.41	2.15	0.05	2.53	2.84	1.16	1.36	0.47	312
	6	2.12	2.41	0.06	2.58	2.8	1.2	1.38	0.53	324
6302	1	2.26	2.29	0.07	2.55	2.8	1.2	1.35	0.5	324
	2	2.05	2.43	0.06	2.61	2.83	1.17	1.44	0.54	315
	3	2.46	2.22	0.05	2.33	2.9	1.1	1.23	0.47	292
	4	2.44	2.21	0.05	2.34	2.94	1.06	1.29	0.48	279
	5	2.53	2.16	0.04	2.26	2.97	1.03	1.24	0.46	270
	6	1.84	2.69	0.06	2.56	2.8	1.2	1.36	0.59	324
	7	1.73	2.66	0.06	2.77	2.74	1.26	1.51	0.61	344
	8	1.97	2.51	0.06	2.62	2.8	1.2	1.42	0.56	324

续表2
Continued Table 2

样品号	测点号	MgO	FeO	MnO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Fe/(Fe + Mg)	t(℃)
6505	1	1.95	2.68	0.05	2.38	2.91	1.09	1.29	0.58	289
	2	2.1	2.41	0.05	2.56	2.85	1.15	1.4	0.54	308
	3	1.85	2.62	0.06	2.67	2.77	1.23	1.44	0.59	334
	4	1.92	2.58	0.06	2.53	2.87	1.13	1.4	0.57	302
6703	1	2.17	2.32	0.06	2.57	2.86	1.14	1.43	0.52	305
	2	2.08	2.49	0.05	2.57	2.81	1.19	1.38	0.54	321
	3	2.07	2.45	0.06	2.55	2.86	1.14	1.4	0.54	305
	4	2.17	2.44	0.06	2.43	2.88	1.12	1.3	0.53	299
	5	2.38	2.19	0.02	2.56	2.83	1.17	1.39	0.48	315

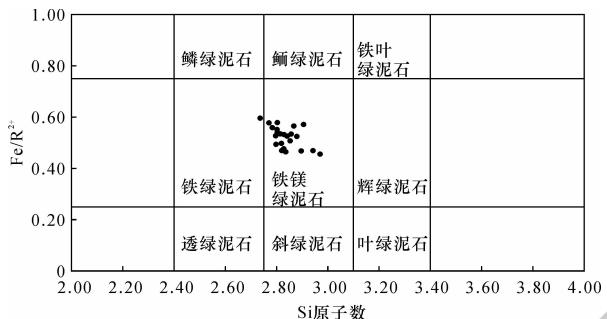


图3 绿泥石矿物分类图(底图 Foster, 1962)

Fig. 3 Classification of chlorites (base diagram after Foster, 1962)

3.1 绿泥石的 Al^{IV}、Al^{VI} 值及(Fe + Mg)值关系

Al^{IV}和Al^{VI}的相关关系图(图4a)显示,二者呈现较好的正相关关系,线性公式为 $Al^{VI} = 0.951 Al^{IV} + 0.2665 (R^2 = 0.6098)$,表明在Al^{IV}对Si原子的替换过程中,同时发生了Al^{VI}在八面体位置上对Mg或Fe的置换(廖震等,2010)。据Xie et al. (1997),当Al^{IV}和Al^{VI}的线性关系接近1:1时,绿泥石四面体上发生钙镁闪石型替代。上述Al^{IV}和Al^{VI}的线性关系式表明,本研究区绿泥石Al与Si的替代属于钙镁闪石型置换。

Al^{VI}和(Fe + Mg)的相关关系图(图4b)显示,(Fe + Mg)与Al^{VI}呈负相关关系,线性公式为 $(Fe + Mg) = -1.0617 Al^{VI} + 6.002 (R^2 = 0.9454)$ 这与Al^{VI}和Fe、Mg占据同样的八面体空间、二者此消彼长的实际情况是相符的。

3.2 Si 和 Al^{IV} 与 Fe/(Fe + Mg) 关系及 Fe 和 Mg 关

从Si和Fe/(Fe + Mg)的相关关系图(图4c)以及Al^{IV}和Fe/(Fe + Mg)的相关关系图(图4d)可以看出,铁质与Si原子数呈反比例关系,线性公式为

$Fe/(Fe + Mg) = -0.4228Si + 1.7301 (R^2 = 0.2836)$;与Al^{IV}呈正比例关系,线性公式为 $Fe/(Fe + Mg) = 0.4228Si + 0.0388 (R^2 = 0.2836)$ 。上述关系表明,在Fe与Mg的置换过程中,绿泥石结构发生了变化,使得更多的Al^{IV}替换Si(Kranidiotis and MacLean, 1987; Xie et al., 1997)。

从Fe和Mg的相关关系图(图4e)可以看出,Fe与Mg呈非常好的负相关关系,线性公式为 $Fe = -0.7483 Mg + 4.0078$,相关系数 R^2 高达0.9272,表明绿泥石八面体位置上主要发生的是Fe和Mg的置换反应。

3.3 Al/(Al + Mg + Fe) 和 Mg/(Fe + Mg) 关系

根据Laird(1988),Al/(Al + Mg + Fe) - Mg/(Fe + Mg)关系图用于判断绿泥石的母岩。通常情况下,母岩为镁铁质岩时,绿泥石中Al/(Al + Mg + Fe)比值一般较低(小于0.35),而当母岩为泥质岩时,该比值则较高(大于0.35);产于基性岩中的Mg/(Fe + Mg)比值相较于产于含铁建造中的偏高。由表1计算可知,Al/(Al + Mg + Fe)比值为0.33~0.39,平均值为0.36,表明研究区绿泥石的母岩既有铁镁质岩,亦有泥质岩,且二者比例相当;Mg/(Fe + Mg)比值为0.39~0.54,均值为0.47,相对偏高,表明绿泥石多形成于基性岩中。Al/(Al + Mg + Fe) - Mg/(Fe + Mg)关系图(图4f)显示,二者之间没有较好的相关关系,这可能与绿泥石的不同母岩来源有关(廖震等,2010;王小雨等,2014)。

4 绿泥石形成环境及机制

4.1 绿泥石形成环境

绿泥石通常形成于中温至低温环境中,其化学成分具有非计量性,晶体结构具有可变性,这与其形成

温度之间具有一定的函数关系(廖震等,2010;王小雨

等,2014),可作为地质温度计算其形成温度。

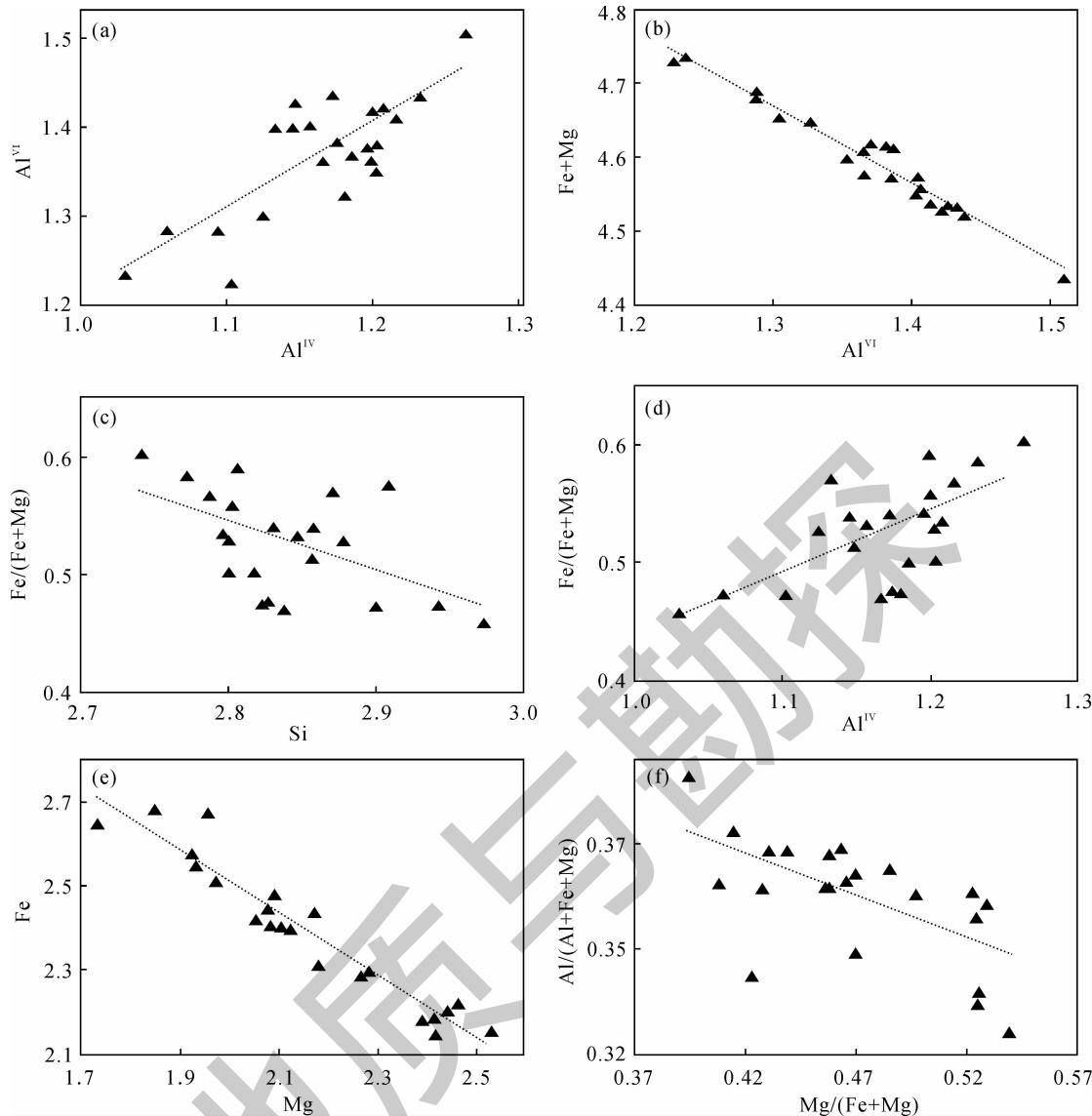


图4 绿泥石中主要阳离子的关系图

Fig.4 Correlation diagrams of main cations in chlorites

Cathelineau and Nieva(1985)率先提出了Al^{IV}与温度呈较好的正相关性,而与绿泥石的原岩及其他热力学参数之间并没有明显相关性,因此总结出温度与Al^{IV}之间的关系式:

$$t(\text{°C}) = 212 \text{ Al}^{\text{IV}} + 18 \quad (1)$$

Cathelineau(1998)又将其修订为:

$$t(\text{°C}) = 321.98 \text{ Al}^{\text{IV}} - 61.92 \quad (2)$$

根据公式(2)的计算结果,研究区绿泥石的形成温度为270~344°C(表1),平均312°C。此结果与流体包裹体测温估算劳家沟辉钼矿成矿温度280~420°C(刘利等,2012)偏差不大,结果可信。

绿泥石的形成是一系列水-岩反应的结果,受

多方面因素的影响(廖震等,2010)。富镁绿泥石多生成于低氧化、低pH值环境;而还原环境多生成富铁绿泥石(Inoue,1995)。上打井斑岩型钼矿床中绿泥石多为铁镁绿泥石,其形成环境相对还原。

4.2 绿泥石形成机制

强烈而广泛的岩浆活动为斑岩钼(铜、钼)矿床提供了物质基础,而复杂的构造环境又给矿液的运移、淀积提供了有利容矿空间。绿泥石的形成与热液流体作用息息相关,其机制主要有两种:一是溶蚀-结晶,二是溶蚀-迁移-沉淀(廖震等,2010;王小雨等,2014)。本研究区内,绿泥石的形成也存在这两种机制。溶蚀-结晶机制如图2c、2f所示:热

液流体交代长石、黑云母等易蚀变矿物,原地重结晶形成绿泥石,并保留母矿物的晶型;如果交代不完全,绿泥石与母矿物则成交代结构(图2f)。溶蚀-迁移-沉淀机制如图2b、2d、2e所示。热液流体溶蚀易蚀变矿物后继续运移,随着物理化学条件的变化,沿着矿物裂隙沉淀结晶,绿泥石呈浸染状,多与辉钼矿等金属矿物共生,有时可在石英脉两侧顺脉沉淀。

根据研究区地质背景资料,上打井斑岩钼矿的形成与热液活动密切相关,绿泥石同样是热液活动的产物,并与辉钼矿紧密共生。根据刘利等(2012)对该矿床成矿流体及其演化规律的研究结果,推断该矿床与绿泥石化关系密切。当富含钼元素的热液流体与围岩相互作用时,流体交代了围岩中易蚀变矿物,通过上述两种机制形成绿泥石。伴随着绿泥石生成的同时,流体成分与物化条件均发生了更有利与钼矿沉淀的改变,促使钼等金属元素在裂隙发育部位沉淀,富集成矿。因此,绿泥石的成分特征在一定程度上不仅可以反映热液流体特征,还可作为钼成矿的找矿标志。

5 结论

(1) 上打井钼矿床的绿泥石结构中离子置换主要为Fe和Mg的置换,多为铁镁绿泥石,偶见铁绿泥石,其富铁特征指示其形成于还原环境。

(2) 绿泥石的形成温度在270~344℃之间,平均温度312℃;其形成机制主要为溶蚀-结晶和溶蚀-迁移-结晶两种。

(3) 金属矿化与绿泥石化关系密切,根据绿泥石成分特征可推演成矿流体特征,同时绿泥石化还是一种重要的找矿标志。

致谢:感谢内蒙古阿鲁科尔沁旗世纪恒盛矿业开发有限公司提供的钻孔岩心样品。

[References]

- Ai Yongfu, Liu Guoping. 1998. The study of chlorite at Dajing deposit in Inner-Mongolia of China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 34(1): 97~105 (in Chinese with English abstract).
- Cathelineau M. 1988. Canon site occupancy in chlorites and illites as function of temperature[J]. Clay Minerals, 23(4): 471~485.
- Cathelineau M, Nieve D. 1985. A chlorite solid solution geothermometer: The Los Azufres (Mexico) geothermal system [J]. Contribution to Mineralogy and Petrology, 91: 235~244.
- Dai Chaocheng, Liu Xiaodong, Rao Qiang, Zhang Huasheng. 2017. Authigenic chlorite compositional evolution and temperature calculation of Xujiahe Formation sandstone in central Sichuan Basin [J]. Geological Review, 63(3): 831~842 (in Chinese with English abstract).
- Deer W A, Howie R A, Iussman J. 1962. Rock-forming minerals: Sheet silicates [M]. London: Longman, 270.
- Fang Weixuan, Wang Lei, Lu Jia, Yu Zhiyuan. 2017. Chloritization facies and restoration of heat flux for tectonic-magmatic-thermal event of Sareke copper mine in the Xinjiang Uygur Autonomous Region, China [J]. Acta Mineralogica Sinica, 37(5): 661~675 (in Chinese with English abstract).
- Foster M D. 1962. Interpretation of the composition and classification of the chlorite [J]. US Geology Survey Prof. Paper, 414A: 1~33.
- He Guanghui, Zhou Taofa, Fan Yu, Wang Shiwei, Xiao Qingling. 2018. Geochemical characteristics and exploration implications of chlorite in Shaxi porphyry copper gold deposit, Lijiang [J]. Mineral Deposits, 37(6): 1247~1259 (in Chinese with English abstract).
- Inoue A. 1995. Formation of clay minerals in hydrothermal environments [A]. // Veide. Origin and mineralogy of clays [M]. Berlin: Springer: 268~330.
- Jiang Dawei, Hu Gejiletu, Li Boyang, Fu Xu, Wang Lei, Gao Shaofeng, Wang Kexiang. 2019. Geological characteristics of Shangdajing porphyry Cu-Mo deposit in Alukeerqin, Inner Mongolia and regional prospecting significance [J]. Gansu Metallurgy, 41(5): 50~54 (in Chinese with English abstract).
- Kranidiotis P, MacLean W H. 1987. Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec [J]. Economic Geology, 82(7): 1898~1911.
- Laird J. 1988. Chlorites: Metamorphic petrology [J]. Reviews in Mineralogy, 19: 405~453.
- Liao Zhen, Liu Yuping, Li Chaoyang, Ye Lin, Liu Shirong, Zheng Wenqin. 2010. Characteristics of chlorites from Dulong Sn-Zn deposit and their metallogenetic implications [J]. Mineral Deposit, 29(1): 169~176 (in Chinese with English abstract).
- Liu Li, Zeng Qingdong, Liu Jianming, Duan Xiaoxia, Sun Shouke, Zhang Lianchang. 2012. Characteristics of fluid inclusions from the Laojiaogou porphyry Mo deposit in the Xilamulun metallogenic belt, Inner Mongolia and their geological significance [J]. Geology and Exploration, 48(4): 663~676 (in Chinese with English abstract).
- Liu Meng, Wang Zhilin, Xu Deru, Wu Yang, Dong Guojun, Ning Juntao, Deng Teng, Cui Yu. 2018. Mineralogy of chlorite, pyrite and chalcopyrite in the Jingchong Co-Cu polymetallic deposit in northeastern Hunan province, South China: Implications for ore genesis [J]. Geotectonica et Metallogenesis, 42(5): 862~879 (in Chinese with English abstract).
- Lu Jia, Fang Weixuan, Wang Tongrong, Sun Zijian, Guo Yuqian, Song Lihong. 2017. Mineralogy and geochemistry of biotite and chlorite in subvolcanic complex rock from Yinmin iron-copper mining area in Yunnan Province, China and their mineralization [J]. Acta Mineralogica Sinica, 37(5): 576~587 (in Chinese with English abstract).
- Qin Leisheng, Liu Xiaodong, Wang Kaixing, Zhang Zhiqiang. 2018. Characteristics of chlorites in the Xiangcaoping and Douzhashan granitoids in the Miaoershan area, and their implications for uranium mineralization [J]. East China Geology, 39(2): 134~141 (in Chinese with English abstract).
- Shen Cunli, Yang Fating, Wang Jinwa, Wu Xiaoguang, Zhang Tianping,

- Dong Hailong. 2019. New prospecting progress of Ag-Pb-Zn polymetallic deposits and exploration prospect in the Daxing'Anling region of Inner Mongolia [J]. *Geology and Exploration*, 55(4):899-912 (in Chinese with English abstract).
- Shirozu H. 1978. Developments in sedimentology (chlorite minerals) [M]. New York: Elsevier; 243-264.
- Sun Jungang, Li Hongying, Liu Xiaohuang, Xie Kunqi, Chen Wei, Xue Shengsheng, Sun Xingli. 2015. Characteristics of chlorite from the Tangkuangyu copper deposit in Shanxi Province and their geological implications [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(6):1142-1154 (in Chinese with English abstract).
- Walshe J L. 1986. A six-component chlorite solid solution model and the conditions of chlorite formation in hydrothermal and geothermal systems [J]. *Economic Geology*, 81(3):681-703.
- Wang Xiaoyu, Mao Jingwen, Cheng Yanbo, Zhang Xingkang, Liu Peng, Liu Shihua, Fang Si. 2014. Characteristics of chlorite from the Xinliaodong Cu polymetallic deposit in eastern Guangdong Province and their geological significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(5):885-905 (in Chinese with English abstract).
- Wu Dehai, Pan Jiayong, Xia Fei, Huang Guangwen, Zhong Fujun, Qi Jiaming, Hong Binyue, Zhou Tangbo. 2018. Characteristics and formation conditions of chlorite in the Shangjiao uranium deposit in the southern Jiangxi Province, China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 38(4):393-405 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Zifeng, Ouyang Ziyuan, Lu Huanzhang, Cheng Jingping. 1993. The characteristics of chlorites in the wall-rock alteration zone in the Baoban gold field, Hainan Island with hydothermal alteration [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 13(4):319-324 (in Chinese with English abstract).
- Xie X G, Byerly G R, Ferrell R E Jr. 1997. II b trioctahedral chlorite from the Barberton greenstone belt: Crystal structure and rock composition constraints with implications to geothermometry [J]. *Contributions to Mineralogy Petrology*, 126:275-291.
- Xu Xun, Zhang Shuming, Yang Chunsi, Qin Yu, Ruan Xiaoyu, Peng Ruiqiang. 2017. Characteristics of chlorite and its forming environment in the granitoid porphyry of southern of Xiangshan in Jiangxi Province, China [J]. *Jiangxi Science*, 35(2):183-225 (in Chinese with English abstract).
- Yang Chao, Tang Juxing, Song Junlong, Zhang Zhi, Li Yubin, Sun Xinguo, Wang Qin, Ding Shuai, Fang Xiang, Li Yanbo, Wei Lujie, Wang Yiyun, Yang Huanhuan, Gao Ke, Song Yang, Lin Bin. 2015. Chlorite characteristic of the Naruo porphyry Cu(Au) deposit in Tibet and its geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(5):856-872 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jian, Chen Peirong, Wang Kaixing, Liu Xinyang, Chen Qi, Huang Jian. 2018. The relationship between chlorite and uranium mineralization of granites in South China [J]. *Journal of East China University of Technology*, 41(2):134-142 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zuolun, Zhou Qizhong, Liu Jianming, Zeng Qingdong. 2018. Sulfur isotope composition of the Yangchang molybdenum-copper deposit in Inner Mongolia and its geological significance [J]. *Geology and Exploration*, 54(3):544-551 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Ming, Chen Xiaoming, Ji Junfeng, Zhang Zhe, Zhang Yun. 2007. Component evolution characteristics of the chlorite in the Paleogene prototype basin of Jiyang depression and the basin paleogeothermal gradient [J]. *Science in China (Series D)*, 37(9):1141-1149 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Qingdong, Liu Jianming, Zhang Zuolun, Zhang Weijun, Tan Feng, Zhang Ruibin, Yu Wenbin, Zhang Xiaohui, Zhai Mingguo. 2009. Mineralizing types, geological characteristics and geodynamic background of molybdenum deposits in Xilamulun molybdenum polymetallogenetic belt on northern margin of North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5):1225-1238 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Wei, Chen Maohong, Zhao Haijie, Xu Lingang, Zhang Dongyang, Ling Shabin, Yao Lei. 2013. Skarn mineral characteristics of the Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit in Guangdong Province and their geological significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(1):23-40 (in Chinese with English abstract).

[附中文参考文献]

- 艾永富, 刘国平. 1998. 内蒙大井矿床的绿泥石研究 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 34(1):97-105.
- 戴朝成, 刘晓东, 饶强, 张怀胜. 2017. 川中地区须家河组自生绿泥石成分演化及其形成温度计算 [J]. 地质论评, 63(3):83-842.
- 方维萱, 王磊, 鲁佳, 于志远. 2017. 新疆萨热克铜矿床绿泥石化蚀变相与构造—岩浆—古地热事件的热通量恢复 [J]. 矿物学报, 37(5):661-675.
- 何光辉, 周涛发, 范裕, 王世伟, 肖庆玲. 2018. 庐江沙溪斑岩型铜金矿床绿泥石的地球化学特征及找矿指示 [J]. 矿床地质, 37(6):1247-1259.
- 姜大伟, 胡格吉乐吐, 李泊洋, 付旭, 王磊, 高少峰, 王可祥. 2019. 内蒙古阿鲁科尔沁旗上打井斑岩型铜钼多金属矿床地质特征及区域找矿意义 [J]. 甘肃冶金, 41(5):50-54.
- 廖震, 刘玉平, 李朝阳, 叶霖, 刘世荣, 郑文勤. 2010. 都龙锡锌矿床绿泥石特征及其成矿意义 [J]. 矿床地质, 29(1):169-176.
- 刘利, 曾庆栋, 刘建明, 段晓侠, 孙守恪, 张连昌. 2012. 内蒙古西拉木伦成矿带劳家沟斑岩型钼矿流体包裹体特征及地质意义 [J]. 地质与勘探, 48(4):663-676.
- 刘萌, 王智琳, 许德如, 伍杨, 董国军, 宁钧陶, 邓腾, 崔宇. 2018. 湖南井冲钴铜多金属矿床绿泥石、黄铁矿和黄铜矿的矿物学特征及其成矿指示意义 [J]. 大地构造与成矿学, 42(5):862-879.
- 鲁佳, 方维萱, 王同荣, 孙紫坚, 郭玉乾, 宋丽红. 2017. 云南因民铁铜矿床区次火山杂岩中黑云母和绿泥石矿物化学特征与成矿指示 [J]. 矿物学报, 37(5):576-587.
- 秦蕾胜, 刘晓东, 王凯兴, 张志强. 2018. 桂北苗儿山地区香草坪和豆乍山花岗岩体绿泥石特征及其对铀成矿的指示 [J]. 华东地质, 39(2):134-141.
- 沈存利, 杨发亭, 王金娃, 吴晓光, 张天平, 董海龙. 2019. 内蒙古大兴安岭地区银铅锌多金属矿找矿新进展及勘查前景分析 [J]. 地质与勘探, 55(4):899-912.
- 孙军刚, 李洪英, 刘晓煌, 谢坤琪, 陈伟, 薛生升, 孙兴丽. 2015. 山西铜矿峪铜矿床绿泥石特征及其地质意义 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 34(6):1142-1154.

- 王小雨,毛景文,程彦博,张兴康,刘鹏,刘石华,方思. 2014. 粤东新寮崇铜多金属矿床绿泥石特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志,33(5):885-905.
- 吴德海,潘家永,夏菲,黄广文,钟福军,祁家明,洪斌跃,周堂波. 2018. 赣南上窖铀矿床绿泥石特征与形成环境[J]. 矿物学报,38(4):393-405.
- 肖志峰,欧阳自远,卢焕章,程景平. 1993. 海南抱板金矿田围岩蚀变带中绿泥石的特征及其意义[J]. 矿物学报,13(4):319-324.
- 许讯,张树明,杨春四,秦雨,阮小语,彭瑞强. 2017. 江西湘山南部花岗斑岩中绿泥石特征及其形成环境研究[J]. 江西科学,35(2):183-225.
- 杨超,唐菊兴,宋俊龙,张志,李玉彬,孙兴国,王勤,丁帅,方向,李彦波,卫鲁杰,王艺云,杨欢欢,高轲,宋扬,林彬. 2015. 西藏拿若斑岩型铜(金)矿床绿泥石特征及其地质意义[J]. 地质学报,89(5):856-872.
- 章健,陈培荣,王凯兴,刘鑫扬,陈琪,黄剑. 2018. 华南产铀花岗岩蚀变矿物绿泥石与铀成矿的联系[J]. 东华理工大学学报(自然科学版),41(2):134-142.
- 张作伦,周起忠,刘建明,曾庆栋. 2018. 内蒙古羊场钼铜矿床硫同位素组成及其地质意义[J]. 地质与勘探,54(3):544-551.
- 赵明,陈小明,季峻峰,张哲,张耘. 2007. 济阳坳陷古近系原型盆地中绿泥石的成分演化特征及其盆地古地温梯度[J]. 中国科学(D辑),37(9):1141-1149.
- 曾庆栋,刘建明,张作伦,陈伟军,覃锋,张瑞斌,于文斌,张晓晖,翟明国. 2009. 华北克拉通北缘西拉沐沦钼多金属成矿带钼矿化类型、特征及地球动力学背景[J]. 岩石学报,25(5):1225-1238.
- 郑伟,陈懋弘,赵海杰,徐林刚,张东阳,凌世彬,姚磊. 2013. 广东省天堂铜铅锌多金属矿床矽卡岩矿物学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志,32(1):23-40.

Characteristics of Chlorites in the Shangdajing Porphyry Mo Deposit, Inner Mongolia and Their Metallogenetic Implications

GE Xiangkun¹, JU Haiyu², ZHAO Fenghua², FAN Guang¹, SUN Sichen³, AI Yujie¹

(1. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029; 2. China University of Mining & Technology, Beijing 100083;
3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083)

Abstract: The Shangdajing porphyry Mo deposit is a newly discovered deposit in the Xilamulun metallogenic belt. Chlorite is the main hydrothermal alteration mineral genetically related to Mo mineralization in this district. Therefore, the analysis of the chemical composition of chlorite is helpful to determine the physical and chemical conditions of the mineralization process of the deposit. This work collected typical chlorite samples from the deposit, and utilized rock and ore identification to study the chlorite in combination with electron probe microanalysis. The results show that chlorites in this deposit are mainly iron-rich daphnite and a bit of brunsvigite, indicating they were formed in reducing environments. The main isomorphism substitutions in chlorites are the replacements between Fe and Mg. The Mg/(Fe + Mg) ratios indicate that chlorites formed in mafic environments. According to the chlorite geothermometer, the chlorites formed at the temperatures of 270~344°C (312°C on average). The formation mechanisms of chlorite are mainly in two ways, namely corrosion-crystallization and corrosion-migration-crystallization. The compositional characteristics of chlorite can reflect the characteristics of hydrothermal fluid to a certain extent, and chloritization can be used as a prospecting indicator for molybdenum mineralization in this area.

Key words: chlorites, chemical composition, electron microprobe, metallogenetic implication, Shangdajing molybdenum deposit, Xilamulun metallogenic belt, Inner Mongolia

