

江西省桃山铀矿田大府上矿床绿泥石特征 及其地质意义

李仁泽^{1,2}, 刘成东¹, 梁良¹, 孔明¹, 王冰¹, 万建军¹

(1. 东华理工大学 省部共建核资源与环境国家重点实验室培育基地, 江西 南昌 330013; 2. 江西省地质矿产
勘查开发局赣西北大队, 江西 九江 332000)

摘要: 绿泥石化是大府上铀矿床重要的成矿期蚀变类型。绿泥石的形貌特征显示该矿床绿泥石主要有2种产出形态,即沿长石、石英等矿物裂隙生长呈蠕虫状集合体产出的绿泥石和由黑云母蚀变而成的绿泥石。本文主要利用电子探针微区分析方法研究了绿泥石化学成分特征。研究表明,该矿床绿泥石为富铁的蠕绿泥石,形成于还原环境;绿泥石形成温度为201.48~224.20℃,平均213.65℃,属中低温热液蚀变范围;形成机制主要有“溶蚀-结晶”和“溶蚀-迁移-结晶”两种方式。绿泥石成分特征对探讨铀成矿环境与矿床评价具有重要的指示意义。

关键词: 大府上矿床; 绿泥石; 形成温度; 形成机制; 铀成矿

中图分类号: P578.962; P619.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)02-0297-09

Characteristics and geological significance of chlorite from the Dafushang uranium deposit in Taoshan area, Jiangxi Province

LI Ren-ze^{1,2}, LIU Cheng-dong¹, LIANG Liang¹, KONG Ming¹, WANG Bing¹ and Wan Jian-jun¹

(1. State Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Resources and Environment, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China; 2. Northwest Jiangxi Geology Team, Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Resources, Jiujiang 332000, China)

Abstract: Chloritization is an important alteration type of the metallogenic stage in the Dafushang uranium deposit. Two kinds of generation form of chlorite were revealed by microscopic characteristics, i. e., the amoeboid aggregate growing along the crack of feldspar or quartz and the alteration of biotite. The results of electron microprobe analyses show that the chlorites from the Dafushang uranium deposit are iron-rich prochlorite, the temperature range of formation of chlorite is 201.48~224.20℃ (averagely 213.65℃), belonging to the mesothermal-epithermal alteration, and the formation mechanism is composed of dissolution-crystallization and dissolution-migration-crystallization. The composition characteristics of chlorite have important significance for investigating the environment of uranium metallogenesis and evaluation of deposits.

Key words: Dafushang uranium deposit; chlorite; formation temperature; formation mechanism; uranium mineralization

绿泥石主要是中低温热液作用、浅变质作用和—岩反应环境和成矿时的物理化学条件,对研究中低温热液蚀变机制、热液成矿环境变化等有重要意义,因此常用于热液矿床研究(Cathelineau and Nieva, 1985; 沉积作用的产物,是热液型多金属矿床中广泛分布的近矿蚀变矿物,其成分特征能够反映流体性质、水

收稿日期: 2015-06-17; 接受日期: 2015-12-03

作者简介: 李仁泽(1988-),男,硕士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: lrenze1988@163.com; 通讯作者: 刘成东(1964-),男,博士,教授,主要从事铀矿地质及岩石学教学和科研工作, E-mail: lcdong2000@163.com。

Cathelineau, 1988; Kranidiotis and MacLean *et al.*, 1987; Inoue, 1995; Stefano, 1999; 郑作平等, 1997; 艾永福等, 1998; 华仁民等, 2003; 张展适等, 2007; 何建国等, 2008; 廖震等, 2010; 郭国林等, 2012; 张树明等, 2013; 王小雨等, 2014)。绿泥石化是江西桃山大府上铀矿床重要的蚀变类型之一, 深入研究并探讨绿泥石的特征及其地质意义, 将有助于更好地了解矿床成因和找矿。本文采用显微镜鉴定和电子探针微区分析等方法, 对大府上矿床的绿泥石特征进行了系统研究, 进而探讨绿泥石的形成环境及其与铀成矿的关系。

1 地质背景

大府上矿床位于大王山-于山花岗岩铀成矿带中段, 桃山铀矿田的中偏南部。铀矿化主要产于中粒斑状黑云母花岗岩和中细粒二云母花岗岩中, 严格受构造破碎带控制。矿体呈群脉状产出, 单个矿体呈透镜状、不规则状。矿石结构以胶状、球粒状为主, 少量为环带状结构, 矿石构造主要为显微脉状、网脉状和浸染状。矿床围岩蚀变主要有赤铁矿化、绿泥石化、萤石化、碳酸盐化、钠长石化、硅化等。

绿泥石化是铀成矿作用前和成矿作用过程中的一种重要的蚀变类型(张展适等, 2007)。通过野外和镜下观察, 依据与铀成矿的关系, 可将大府上矿床围岩蚀变分为 3 期, 即矿前期蚀变、成矿期蚀变和矿后期蚀变。矿前期蚀变以红化(赤铁矿化)为主, 其他蚀变叠加在赤铁矿化之上; 铀成矿期主要与绿泥石化、萤石化、碳酸盐化、硅化等密切相关; 矿后期蚀变主要为硅化和碳酸盐化, 形成无色和灰白色微晶石英、方解石呈细脉状充填于构造裂隙中。空间分布上, 围岩蚀变具有较明显的分带现象: 平面上, 以矿体为中心由内向外红化、水云母化逐渐减弱, 而绿泥石化在矿体及矿体外围均较明显; 垂向上, 从上到下依次大致可划分为红化(赤铁矿化)、水云母(伊利石)化、硅化、萤石化和绿泥石化, 碳酸盐化在近矿围岩较发育, 垂直分带性不明显(曾文乐等, 2010)。

2 样品采集和分析方法

为了系统性地研究大府上矿床中绿泥石化蚀变在成矿过程中的作用, 本文采集了具有不同产状和

成因的代表性岩矿石样品, 进行详细的岩相学观察和电子探针微区分析。

电子探针微区分析是目前最为可靠的微区化学成分分析手段, 可以使矿物中元素的定性和定量分析的空间分辨率达到微米级水平(周乐光, 2007)。本次绿泥石化微区化学成分分析在东华理工大学省部共建核资源与环境国家重点实验室培育基地电子探针室进行, 仪器型号为 JXA-8100 型电子探针仪和 Inca Energy 型能谱仪, 测试条件为: 加速电压 15 kV, 探针束流 20 nA, 电子束斑 2 μm 。测试过程按照国家标准(GB/T15617-2002)进行, 其中 Na 选用硬玉, K 选用钾长石, Ca 选用磷灰石, Ti 选用金红石, Cr 选用氧化铬, Mn 选用蔷薇辉石等, 而 Mg、Fe、Al、Si 等 4 个元素则均选用绿泥石化作为标样。

3 绿泥石的形貌特征

首先, 将所采集样品磨制成光薄片, 然后在电子显微镜观察鉴定的基础上, 选出绿泥石化较明显的 7 个样品进行电子探针微区分析。根据镜下特征, 本文将绿泥石化划分为 2 种类型: 第 1 类绿泥石常呈蠕虫状集合体沿长石、石英等矿物裂隙生长, 有时甚至形成绿泥石细脉(图 1a、1b), 该型绿泥石与沥青铀矿、长石、石英以及黄铁矿等共(伴)生关系密切(图 1c、1d), 本文简称 I 型绿泥石; 第 2 类绿泥石由黑云母蚀变而成, 呈鳞片状并保持黑云母晶形假像(图 1e、1f), 本文简称 II 型绿泥石。

4 绿泥石的化学成分特征

绿泥石电子探针化学成分分析结果见表 1, 以 14 个氧原子为标准计算的结构式和特征值见表 2。本文采用 Foster(1962)提出的以 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO})$ (质量分数) $< 0.5\%$ 作为绿泥石成分是否存在混染的判别标准, 如果所测数值大于 0.5%, 则说明绿泥石成分存在混染, 需要剔除。据此, 表 1 中 D1-4-43、D1-4-45、D2-1-61 和 D2-8-45 等共 4 个测点不符合要求, 需予以剔除。尽管 Fe^{2+} 含量不能直接通过电子探针分析获得, 但根据绿泥石矿物中 Fe^{3+} 含量一般小于铁总量的 5%(Deer *et al.*, 1962; Shirozu *et al.*, 1978), 本文近似地用表 2 中的全铁来代表 Fe^{2+} 含量。

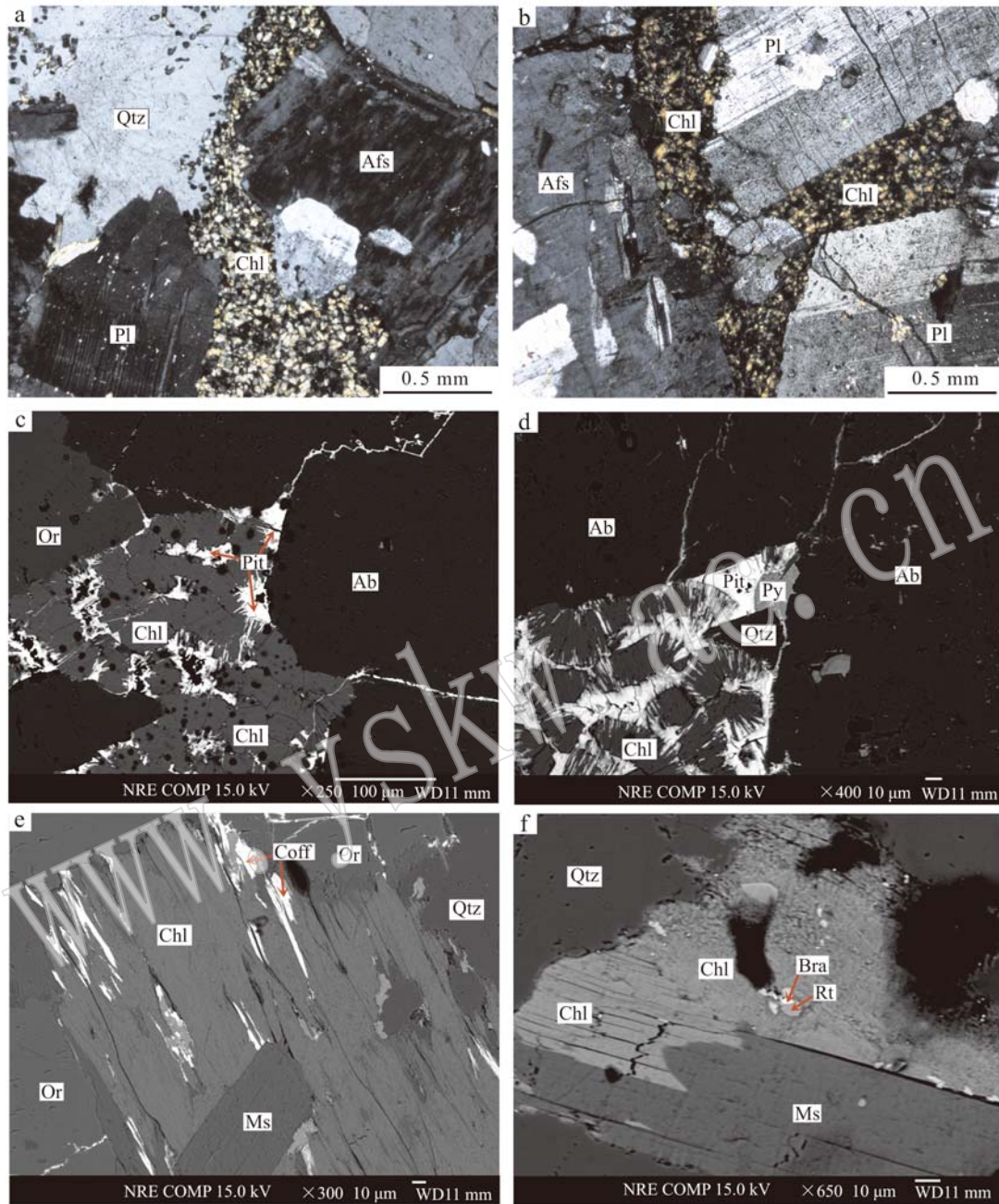


图 1 大府上矿床绿泥石镜下特征

Fig. 1 Microscopic features of chlorites from the Dafushang uranium deposit

a、b—绿泥石呈蠕虫状集合体充填于长石、石英等矿物裂隙中，形成绿泥石细脉；c、d—细脉状绿泥石与沥青铀矿、长石、石英以及黄铁矿等共(伴)生关系密切；e、f—由黑云母蚀变而成的绿泥石，常交代黑云母并保持黑云母假像；Chl—绿泥石；Qtz—石英；Afs—碱性长石；Pl—斜长石；Or—钾长石；Ab—钠长石；Rt—金红石；Ms—白云母；Pit—沥青铀矿；Coff—钍石；Bra—铀钍矿
a, b—aggregations of wormlike chlorites filling fissures of feldspar, quartz and other minerals (fine veins of chlorite); c, d—fine veins of chlorite in close association with pitchblende, feldspar, quartz and pyrite; e, f—chlorites altered from biotites often subjected to biotite metasomatism and exhibiting biotite pseudomorph; Chl—chlorite; Qtz—quartz; Afs—alkali-feldspar; Pl—plagioclase; Or—orthoclase; Ab—albite; Rt—rutile; Ms—muscovite; Pit—pitchblende; Coff—coffinite; Bra—brannerite

剔除成分存在混染的测点数据后，大府上矿床绿泥石的化学成分具有如下特点：SiO₂ 含量为 23.70% ~ 26.31%，均值 24.69%；Al₂O₃ 含量为

19.87% ~ 22.57%，均值 21.05%；FeO 含量为 31.02% ~ 37.82%，均值 33.52%；MgO 含量为 3.13% ~ 11.48%，均值 8.95%。总体看 Fe、Mg 含

表 1 绿泥石化学成分电子探针分析结果

 $w_B/\%$

Table 1 Electron microprobe analyses of chlorites

样品编号	Na ₂ O	TiO ₂	MgO	K ₂ O	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	NiO	FeO	MnO	Cr ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Total
I 型绿泥石													
D1-4-41	0.06	0.26	6.87	0.02	21.14	0.09	23.70	0.05	35.13	1.55	0.13	0.00	89.00
D1-4-42	0.01	0.00	9.11	0.07	21.26	0.02	24.14	0.04	32.80	0.83	0.10	0.00	88.38
D2-1-60	0.00	0.02	8.58	0.01	22.24	0.19	24.54	0.00	33.98	0.80	0.02	0.02	90.40
D2-1-62	0.05	0.03	9.87	0.03	20.90	0.10	25.53	0.00	32.92	0.82	0.12	0.00	90.39
D2-4-45	0.02	0.00	9.33	0.00	20.80	0.04	24.08	0.00	33.35	0.83	0.07	0.00	88.52
D2-4-51	0.04	0.03	9.27	0.00	21.54	0.09	24.80	0.00	33.43	0.85	0.16	0.03	90.24
D2-4-52	0.01	0.01	9.66	0.00	21.13	0.03	24.30	0.00	32.95	0.80	0.21	0.01	89.11
D2-4-53	0.01	0.00	11.48	0.01	20.29	0.00	24.79	0.00	31.02	0.69	0.05	0.04	88.38
D2-4-54	0.00	0.03	9.59	0.00	20.87	0.11	24.77	0.01	33.82	0.80	0.31	0.01	90.31
D2-4-55	0.00	0.00	9.98	0.01	20.82	0.02	24.39	0.03	31.80	0.80	0.08	0.00	87.93
D2-4-56	0.04	0.00	9.96	0.00	20.89	0.05	24.32	0.02	32.91	0.79	0.05	0.01	89.03
D2-4-58	0.03	0.01	9.42	0.00	21.05	0.02	23.73	0.00	32.87	0.83	0.09	0.00	88.06
D2-4-60	0.02	0.00	10.17	0.00	21.24	0.12	25.24	0.01	32.02	0.69	0.05	0.01	89.57
D2-5-41	0.00	0.03	9.47	0.00	20.52	0.01	23.98	0.05	32.91	0.84	0.05	0.00	87.86
D2-5-42	0.03	0.05	9.18	0.02	21.69	0.01	24.12	0.00	33.04	0.85	0.04	0.02	89.05
D2-5-47	0.07	0.01	9.08	0.03	20.82	0.00	23.84	0.04	33.37	0.86	0.04	0.00	88.16
D2-5-48	0.03	0.00	9.26	0.01	20.90	0.05	24.27	0.02	32.81	0.74	0.07	0.00	88.16
D2-5-50	0.07	0.01	9.33	0.04	21.38	0.00	24.22	0.01	32.74	0.78	0.07	0.00	88.65
D2-6-51	0.16	0.08	9.26	0.00	20.36	0.08	25.32	0.00	33.14	0.88	0.17	0.02	89.46
D2-6-52	0.08	0.02	6.87	0.08	20.48	0.05	24.55	0.01	35.47	0.69	0.07	0.00	88.36
D2-8-41	0.03	0.02	9.45	0.00	21.73	0.33	24.76	0.00	32.94	0.77	0.18	0.24	90.45
D2-8-43	0.01	0.08	9.39	0.02	20.79	0.04	24.71	0.03	32.37	0.84	0.14	0.00	88.42
D2-8-44	0.03	0.05	8.54	0.02	20.55	0.10	25.00	0.00	34.29	0.84	0.25	0.01	89.68
D2-8-50	0.04	0.01	9.24	0.04	20.25	0.11	25.36	0.00	33.24	0.86	0.11	0.00	89.26
D2-8-55	0.00	0.03	9.41	0.02	20.89	0.03	24.87	0.01	33.34	0.88	0.16	0.00	89.64
D2-8-56	0.00	0.00	9.21	0.00	19.87	0.09	25.09	0.00	33.30	0.91	0.17	0.00	88.63
D2-8-57	0.02	0.11	9.26	0.00	20.74	0.08	25.64	0.00	33.61	0.86	0.14	0.03	90.49
D2-10-43	0.00	0.05	9.42	0.00	20.87	0.08	24.23	0.00	33.49	0.77	0.12	0.00	89.03
D2-10-44	0.01	0.03	9.88	0.00	21.59	0.01	24.36	0.00	33.07	0.95	0.10	0.00	90.00
D2-10-54	0.00	0.02	8.99	0.01	20.69	0.10	24.18	0.00	33.06	0.90	0.02	0.02	87.99
D2-10-55	0.05	0.03	9.24	0.00	20.72	0.06	24.11	0.00	33.00	0.77	0.10	0.00	88.08
D2-10-57	0.03	0.00	9.71	0.00	21.36	0.02	24.41	0.00	32.60	0.80	0.02	0.02	88.97
D2-10-60	0.04	0.04	9.75	0.01	21.23	0.14	24.51	0.00	33.06	0.79	0.11	0.00	89.67
D2-10-63	0.07	0.03	9.69	0.00	21.48	0.01	24.53	0.00	33.36	0.77	0.07	0.00	90.01
D2-10-64	0.04	0.00	9.65	0.02	21.03	0.08	24.49	0.03	31.79	0.70	0.06	0.00	87.89
II 型绿泥石													
D1-4-43*	0.06	0.55	6.97	1.16	18.80	0.04	26.05	0.01	33.37	0.60	0.09	0.17	87.87
D1-4-45*	0.02	0.59	7.96	0.73	19.54	0.04	25.94	0.01	32.51	0.74	0.17	0.00	88.25
D2-1-58	0.07	0.06	3.31	0.17	22.57	0.20	24.05	0.00	37.52	1.22	0.34	0.00	89.51
D2-1-59	0.05	0.06	3.13	0.15	22.30	0.13	24.17	0.00	37.82	1.15	0.47	0.02	89.45
D2-1-61*	0.07	0.19	2.41	0.67	22.76	0.06	25.12	0.00	37.12	1.17	0.11	0.01	89.69
D2-1-69	0.00	0.05	8.81	0.01	21.31	0.05	26.16	0.00	33.62	0.78	0.13	0.01	90.92
D2-8-45*	0.07	0.12	6.27	1.01	23.62	0.16	29.66	0.00	27.98	1.09	0.17	0.17	90.32
D2-8-51	0.02	0.04	9.33	0.00	20.87	0.01	25.51	0.01	34.23	0.83	0.07	0.00	90.92
D2-8-52	0.07	0.01	9.01	0.02	21.31	0.05	25.37	0.00	33.57	0.81	0.14	0.00	90.36
D2-8-53	0.06	0.10	6.93	0.03	20.25	0.10	24.52	0.00	35.67	1.24	0.21	0.01	89.13
D2-8-54	0.05	0.09	8.16	0.05	20.51	0.07	25.20	0.00	34.85	0.91	0.17	0.00	90.06
D2-8-58	0.01	0.07	9.14	0.05	21.57	0.07	25.39	0.03	33.87	0.71	0.04	0.05	90.99
D2-8-59	0.03	0.07	9.51	0.05	21.13	0.08	26.31	0.00	33.35	0.76	0.23	0.00	91.52
D2-8-61	0.00	0.07	8.78	0.04	21.15	0.08	25.49	0.00	34.70	0.82	0.15	0.05	91.33

表格中带 * 号为大于 0.5% 的测点, 需予以剔除。

表 2 绿泥石结构式和特征值计算(以 14 个氧原子为基准)

Table 2 Estimation of structural formulae and characteristic values of chlorites (based on 14 oxygen atoms)

样号编号	Na	Ti	Mg	K	Al	Ca	Si	Fe	Mn	Cr	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Al/(Fe+ Mg+Al)	Mg/(Fe +Mg)	Fe/(Fe +Mg)	$d_{001}/$ 0.1 nm	$t/^\circ\text{C}$
I 型绿泥石																	
D1-4-41	0.01	0.02	1.13	0.00	2.76	0.01	2.63	3.25	0.15	0.01	1.37	1.39	0.39	0.26	0.74	14.11	224.20
D1-4-42	0.00	0.00	1.49	0.01	2.75	0.00	2.65	3.01	0.08	0.01	1.35	1.39	0.38	0.33	0.67	14.12	216.87
D2-1-60	0.00	0.00	1.37	0.00	2.81	0.02	2.63	3.05	0.07	0.00	1.37	1.44	0.39	0.31	0.69	14.12	219.28
D2-1-62	0.01	0.00	1.57	0.00	2.63	0.01	2.72	2.94	0.07	0.01	1.28	1.35	0.37	0.35	0.65	14.13	206.49
D2-4-45	0.00	0.00	1.53	0.00	2.69	0.00	2.64	3.06	0.08	0.01	1.36	1.33	0.37	0.33	0.67	14.12	218.32
D2-4-51	0.01	0.00	1.48	0.00	2.72	0.01	2.66	3.00	0.08	0.01	1.34	1.38	0.38	0.33	0.67	14.12	215.01
D2-4-52	0.00	0.00	1.56	0.00	2.71	0.00	2.64	2.99	0.07	0.02	1.36	1.34	0.37	0.34	0.66	14.12	217.31
D2-4-53	0.00	0.00	1.85	0.00	2.59	0.00	2.69	2.81	0.06	0.00	1.31	1.28	0.36	0.40	0.60	14.13	208.14
D2-4-54	0.00	0.00	1.54	0.00	2.64	0.01	2.66	3.04	0.07	0.03	1.34	1.31	0.37	0.34	0.66	14.12	215.60
D2-4-55	0.00	0.00	1.63	0.00	2.69	0.00	2.67	2.91	0.07	0.01	1.33	1.36	0.37	0.36	0.64	14.13	212.07
D2-4-56	0.01	0.00	1.62	0.00	2.68	0.01	2.64	2.99	0.07	0.00	1.36	1.32	0.37	0.35	0.65	14.12	216.74
D2-4-58	0.01	0.00	1.55	0.00	2.73	0.00	2.61	3.03	0.08	0.01	1.39	1.35	0.37	0.34	0.66	14.12	220.90
D2-4-60	0.00	0.00	1.62	0.00	2.68	0.01	2.70	2.87	0.06	0.00	1.30	1.38	0.37	0.36	0.64	14.13	207.48
D2-5-41	0.00	0.00	1.56	0.00	2.67	0.00	2.65	3.04	0.08	0.00	1.35	1.32	0.37	0.34	0.66	14.12	217.18
D2-5-42	0.01	0.00	1.49	0.00	2.78	0.00	2.62	3.00	0.08	0.00	1.38	1.40	0.38	0.33	0.67	14.12	219.46
D2-5-47	0.01	0.00	1.50	0.00	2.71	0.00	2.63	3.08	0.08	0.00	1.37	1.34	0.37	0.33	0.67	14.12	219.85
D2-5-48	0.01	0.00	1.52	0.00	2.70	0.01	2.67	3.01	0.07	0.01	1.33	1.37	0.37	0.33	0.67	14.12	214.73
D2-5-50	0.02	0.00	1.52	0.00	2.75	0.00	2.64	2.99	0.07	0.01	1.36	1.39	0.38	0.34	0.66	14.12	216.82
D2-6-51	0.03	0.01	1.49	0.00	2.60	0.01	2.74	3.00	0.08	0.01	1.26	1.34	0.37	0.33	0.67	14.13	205.68
D2-6-52	0.02	0.00	1.14	0.01	2.68	0.01	2.73	3.30	0.06	0.01	1.27	1.41	0.38	0.26	0.74	14.13	213.15
D2-8-41	0.01	0.00	1.51	0.00	2.74	0.04	2.65	2.95	0.07	0.02	1.35	1.39	0.38	0.34	0.66	14.12	215.24
D2-8-43	0.00	0.01	1.53	0.00	2.67	0.00	2.70	2.95	0.08	0.01	1.30	1.37	0.37	0.34	0.66	14.13	210.00
D2-8-44	0.01	0.00	1.38	0.00	2.63	0.01	2.71	3.11	0.08	0.02	1.29	1.34	0.37	0.31	0.69	14.13	211.05
D2-8-50	0.01	0.00	1.49	0.01	2.59	0.01	2.75	3.02	0.08	0.01	1.25	1.34	0.36	0.33	0.67	14.13	204.91
D2-8-55	0.00	0.00	1.52	0.00	2.66	0.00	2.69	3.01	0.08	0.01	1.31	1.35	0.37	0.33	0.67	14.13	212.28
D2-8-56	0.00	0.00	1.50	0.00	2.56	0.01	2.75	3.05	0.08	0.01	1.25	1.31	0.36	0.33	0.67	14.13	206.17
D2-8-57	0.00	0.01	1.48	0.00	2.61	0.01	2.74	3.00	0.08	0.01	1.26	1.35	0.37	0.33	0.67	14.13	205.87
D2-10-43	0.00	0.00	1.53	0.00	2.68	0.01	2.64	3.05	0.07	0.01	1.36	1.33	0.37	0.33	0.67	14.12	218.14
D2-10-44	0.00	0.00	1.58	0.00	2.74	0.00	2.62	2.97	0.09	0.01	1.38	1.35	0.38	0.35	0.65	14.12	219.34
D2-10-54	0.00	0.00	1.48	0.00	2.69	0.01	2.67	3.05	0.08	0.00	1.33	1.36	0.37	0.33	0.67	14.12	215.20
D2-10-55	0.01	0.00	1.52	0.00	2.69	0.01	2.66	3.04	0.07	0.01	1.34	1.34	0.37	0.33	0.67	14.12	216.41
D2-10-57	0.01	0.00	1.57	0.00	2.73	0.00	2.65	2.96	0.07	0.00	1.35	1.38	0.38	0.35	0.65	14.12	215.56
D2-10-60	0.01	0.00	1.57	0.00	2.70	0.02	2.64	2.98	0.07	0.01	1.36	1.34	0.37	0.34	0.66	14.12	216.53
D2-10-63	0.01	0.00	1.55	0.00	2.72	0.00	2.64	3.00	0.07	0.01	1.36	1.36	0.37	0.34	0.66	14.12	217.63
D2-10-64	0.01	0.00	1.58	0.00	2.71	0.01	2.68	2.91	0.07	0.01	1.32	1.39	0.38	0.35	0.65	14.13	210.88
II 型绿泥石																	
D2-1-58	0.02	0.01	0.55	0.02	2.95	0.02	2.67	3.49	0.11	0.03	1.33	1.63	0.42	0.14	0.86	14.12	223.49
D2-1-59	0.01	0.01	0.52	0.02	2.92	0.02	2.69	3.52	0.11	0.04	1.31	1.61	0.42	0.13	0.87	14.12	222.08
D2-1-69	0.00	0.00	1.39	0.00	2.66	0.01	2.77	2.98	0.07	0.01	1.23	1.43	0.38	0.32	0.68	14.14	201.88
D2-8-51	0.00	0.00	1.48	0.00	2.62	0.00	2.72	3.05	0.07	0.01	1.28	1.34	0.37	0.33	0.67	14.13	209.18
D2-8-52	0.01	0.00	1.44	0.00	2.69	0.01	2.71	3.00	0.07	0.01	1.29	1.40	0.38	0.32	0.68	14.13	208.85
D2-8-53	0.01	0.01	1.14	0.00	2.64	0.01	2.71	3.30	0.12	0.02	1.29	1.35	0.37	0.26	0.74	14.12	215.06
D2-8-54	0.01	0.01	1.32	0.01	2.62	0.01	2.73	3.16	0.08	0.01	1.27	1.35	0.37	0.29	0.71	14.13	210.03
D2-8-58	0.00	0.01	1.45	0.01	2.70	0.01	2.70	3.01	0.06	0.00	1.30	1.40	0.38	0.32	0.68	14.13	210.82
D2-8-59	0.01	0.01	1.49	0.01	2.62	0.01	2.77	2.93	0.07	0.02	1.23	1.38	0.37	0.34	0.66	14.14	201.48
D2-8-61	0.00	0.01	1.39	0.01	2.65	0.01	2.71	3.09	0.07	0.01	1.29	1.37	0.37	0.31	0.69	14.13	210.78

量变化相对较大,且此消彼长,反映了它们在绿泥石中的相互置换比较普遍。由绿泥石的 Fe-Si 图解(图 2, Fe、Si 原子数以 28 个氧原子为标准计算)可知,投影点均分布于蠕绿泥石区间,为富铁绿泥石。

5 绿泥石的结构特征

绿泥石结构式为 $[(\text{Mg}^{2+}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+})_x (\text{Al}^{3+},$

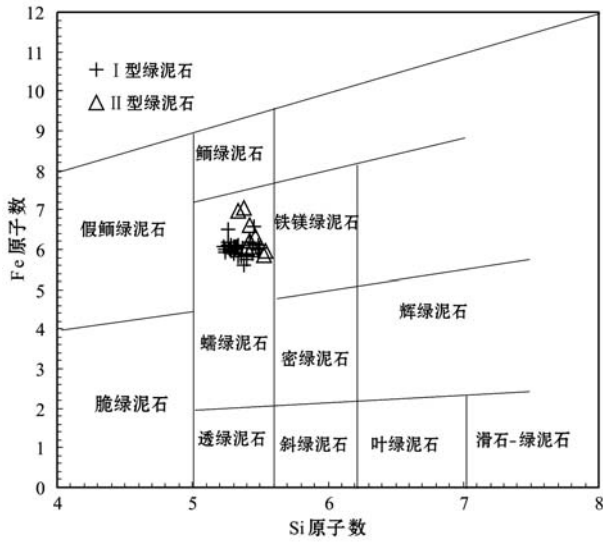


图 2 绿泥石分类图解

Fig. 2 Classification of chlorites from the Dafushang uranium deposit

$\text{Fe}^{3+}, \text{Cr}^{3+})_y \square_z \text{Al}^{\text{VI}}(\text{Si}_{4-u} \text{Al}_u)^{\text{IV}} \text{O}_{10+w}$, 其中 VI 和 IV 分别代表 6 次配位和 4 次配位, \square 代表结构空穴, $x + y + z = 6$, w 很小。不同温度下形成的绿泥石离子间相互替换关系以及离子占据空间能力不同, 这也是绿泥石可作为地质温度计的依据。因此, 常利用绿泥石主要阳离子间的相关关系来阐释其结构特征。

5.1 绿泥石的 $\text{Al}/(\text{Fe} + \text{Mg} + \text{Al})$ 与 $\text{Mg}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 值

由 Laird (1988) 提出的 $\text{Al}/(\text{Fe} + \text{Mg} + \text{Al}) - \text{Mg}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 关系图解被广泛地用于判别绿泥石与其母岩的关系。一般认为, 由泥质岩石蚀变形成的绿泥石比由镁铁质岩石转化而成的绿泥石具有较高的 $\text{Al}/(\text{Fe} + \text{Mg} + \text{Al})$ 值 (> 0.35)。由表 2 可知, 大府上矿床绿泥石的 $\text{Al}/(\text{Fe} + \text{Mg} + \text{Al})$ 值为 0.36 ~ 0.42, 均值为 0.38, 说明该矿床的绿泥石化学成分主要来源于泥质岩, 与本区岩石成因类型为 S 型花岗岩的源岩特征相符 (Zheng *et al.*, 1992)。

前人研究认为, 高 $\text{Mg}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 值的绿泥石一般产于基性岩中, 而低 $\text{Mg}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 值的绿泥石产于含铁建造中 (Laird, 1988; Hiller and Velde, 1991; Zang and Fyfe, 1995)。大府上矿床绿泥石的 $\text{Mg}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 值为 0.13 ~ 0.40, 均值为 0.32, 指示绿泥石的形成环境应为含铁建造。

在 $\text{Al}/(\text{Fe} + \text{Mg} + \text{Al}) - \text{Mg}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 关系图解

(图 3a) 中, I 型绿泥石样品的投影点相对集中, 而 II 型绿泥石则比较分散, 总体上表现具有一定的负相关关系, 这与绿泥石成分主要来源于泥质岩但仍有部分与来自于富铁、镁质的流体有关, 并说明其经过了多期次地质作用。

5.2 绿泥石的 Al^{IV} 、 Al^{VI} 及 $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 值

Xie 等 (1997) 的研究表明, 当绿泥石四面体位置的离子替代关系是完全的钙镁闪石型替代时, 则 Al^{IV} 与 Al^{VI} 值之间呈现近于 1:1 的线性关系 (相关系数 = 0.95)。由表 2 可知, 大府上铀矿床绿泥石的 Al^{IV} 值为 1.23 ~ 1.39, Al^{VI} 值为 1.28 ~ 1.63, Al^{VI} 值大多数大于 Al^{IV} 值, 这可能与四面体位置上少量 Fe 对 Al 的置换有关。从 $\text{Al}^{\text{VI}} - \text{Al}^{\text{IV}}$ 关系图解 (图 3b) 中可以看出, I 型绿泥石的投影点水平集中分布, 显示 Al^{IV} 与 Al^{VI} 无相关性, 说明在 Al^{IV} 对 Si 的置换过程中, 不伴随 Al^{VI} 在八面体位置上对 Fe 或 Mg 的替换; II 型绿泥石的 Al^{IV} 与 Al^{VI} 存在一定的正相关性, 说明在 Al^{IV} 对 Si 的置换过程中, 伴随有 Al^{VI} 对 Fe 或 Mg 的替换。大府上矿床绿泥石的 Al^{IV} 与 Al^{VI} 的相关关系, 说明该矿床绿泥石四面体位置不属于单纯的钙镁闪石型替代型。

$\text{Al}^{\text{IV}} - \text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 关系图解 (图 3c) 显示, I 型绿泥石的投影点近水平分布, Al^{IV} 与 $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 表现为无相关性, 结合 $\text{Al}^{\text{VI}} - \text{Al}^{\text{IV}}$ 关系图, 表明在 Fe 置换 Mg 的过程中, 不伴随 Al^{IV} 在四面体位置上对 Si 的置换; II 型绿泥石的 Al^{IV} 与 $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 表现为正相关性, 随着 $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 值的增加, Al^{IV} 也有相应增加, 这表明在 Fe 置换 Mg 的过程中, 由于绿泥石结构的调整, 允许更多的 Al^{IV} 置换 Si (Kranidiotis and MacLean, 1987; Xie *et al.*, 1997)。

5.3 绿泥石的 $\text{Fe} + \text{Al}^{\text{VI}} - \text{Mg}$ 、 $\text{Fe} - \text{Mg}$ 和 $\text{Al}^{\text{VI}} - \text{Mg}$ 关系

$\text{Fe} + \text{Al}^{\text{VI}} - \text{Mg}$ 关系图解 (图 3d) 显示, 2 种形态绿泥石的 $\text{Fe} + \text{Al}^{\text{VI}}$ 与 Mg 具强的负相关关系, 表明绿泥石八面体位置主要为 Fe、Mg、Al 等 3 种元素占据, 主要发生 $\text{Fe} + \text{Al}^{\text{VI}}$ 对 Mg 的置换。 $\text{Fe} - \text{Mg}$ 关系图解 (图 3e) 和 $\text{Al}^{\text{VI}} - \text{Mg}$ 关系图解 (图 3f) 显示, 2 种形态绿泥石的 Fe 与 Mg 呈现的负相关关系强于 Al^{VI} 与 Mg 具有的负相关性, 表明绿泥石八面体位置上以 Fe 对 Mg 的置换为主, Al^{VI} 对 Mg 的置换为辅, 同时也反映了绿泥石可能产于含铁高的背景中, 与前文提及的富铁绿泥石相符。

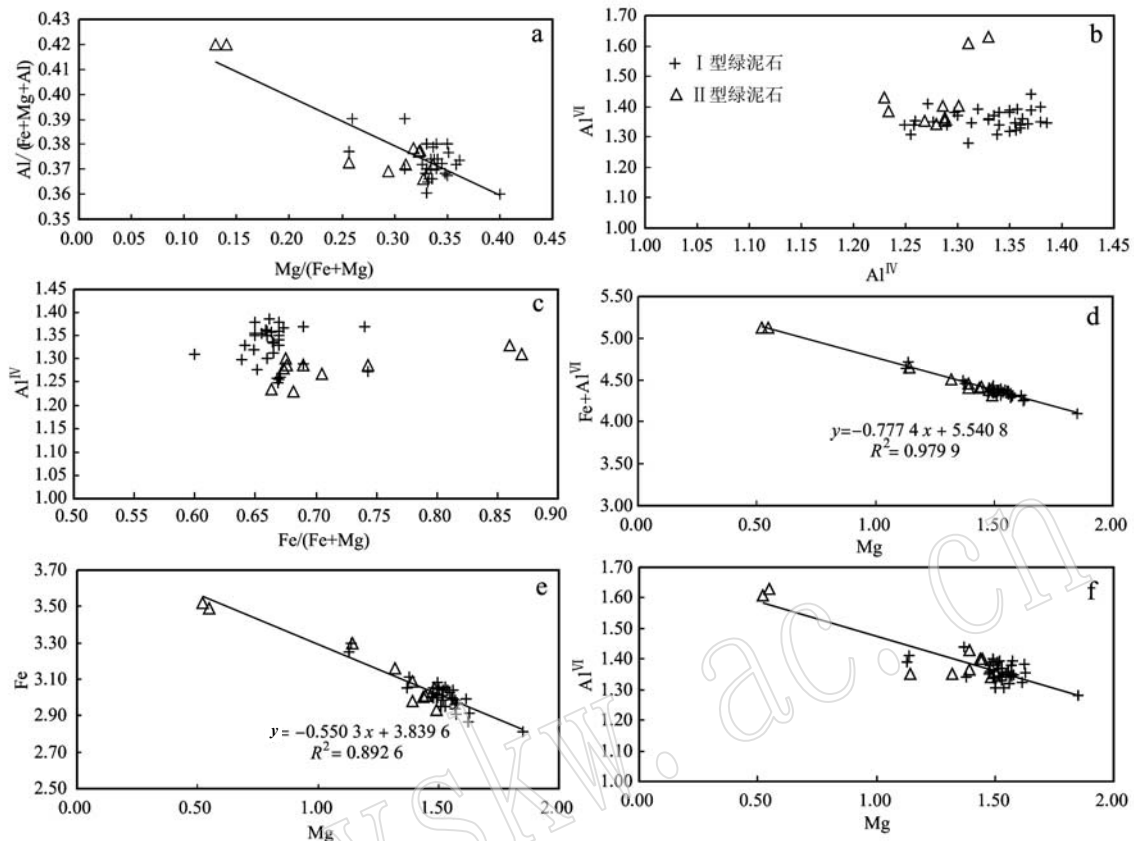


图3 绿泥石中主要阳离子间的相关关系图

Fig. 3 Correlation of main cations in chlorites from the Dafushang uranium deposit

6 讨论

6.1 绿泥石的形成温度及环境

目前大多数研究者广泛采纳 Rausell-Colom 和 Stefano 的方法计算绿泥石的形成温度,并取得了良好的效果。本文运用 Rausell-Colom 等(1991)提出后经 Nieto(1997)修正的关系式计算绿泥石面网间距 d_{001} , $d_{001}(0.1 \text{ nm}) = 14.339 - 0.1155 \text{ Al}^{\text{IV}} - 0.0201 \text{ Fe}^{2+}$, 然后根据 Stefano(1999)提出的 d_{001} 与温度之间的关系式: $d_{001}(0.1 \text{ nm}) = 14.339 - 0.001 t(^{\circ}\text{C})$, 计算了大府上矿床绿泥石的形成温度,结果列于表2。大府上矿床绿泥石的形成温度为 $201.48 \sim 224.20^{\circ}\text{C}$, 平均为 213.65°C , 其中与铀成矿关系密切的 I 型绿泥石形成温度为 $204.91 \sim 224.20^{\circ}\text{C}$, 平均为 214.30°C , 属中低温热液蚀变范围。

Bryndzia 和 Steven(1987)、Bryndzia 和 Scott(1987)研究表明,绿泥石 $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 值的变化与系统的氧逸度有关,系统越还原,其形成的绿泥石

$\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 值越大。由表2可知,大府上矿床绿泥石的 $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 值为 $0.60 \sim 0.87$, 均值为 0.68 , 指示其形成时热液流体具有还原性质。Inoue(1995)认为,在脉状矿床的热液蚀变中,在低氧化、低 pH 值条件下有利于形成富镁绿泥石,而还原环境有利于形成富铁绿泥石,由绿泥石的 Fe-Si 图解(图2)可知,该矿床绿泥石类型为富铁的蠕绿泥石,表明其形成于还原环境。

绿泥石成分中 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 主要为六次配位,二者形成广泛的类质同像替代。根据 Korzhinskii(1968)提出的酸碱交代原理,一般认为 Fe 取代 Mg, 表征其形成于相对酸性环境,反之, Mg 取代 Fe, 表征其形成于相对碱性环境(刘英俊等, 1987; 艾永富等, 1998)。大府上矿床绿泥石多表现为 Fe 取代 Mg, 表明其形成于由碱性向酸性变化的介质环境。

6.2 绿泥石的形成机制及其地质意义

绿泥石化是大府上矿床重要的围岩蚀变类型,与铀成矿关系极为密切,其形成过程与热液流体作用紧密相关。通常认为,绿泥石的形成机制主要有2

种:一种是“溶蚀-结晶”,即流体溶蚀矿物并原地重结晶形成绿泥石,这种机制往往表现在矿前期阶段,其特征为绿泥石交代其他矿物如黑云母、长石等,表现出明显的交代蚀变特征,甚至出现交代假像结构(图 1e、1f),因此这种机制形成的绿泥石主要由铁、镁硅酸盐矿物转化而成,一般没有 Fe、Mg 组分的带入;另一种是“溶蚀-迁移-结晶”,即流体溶蚀矿物后经过了一定距离的搬运,再沉淀、结晶形成绿泥石,这种机制多发生于成矿期阶段,其形成的绿泥石多沿各矿物裂隙生长,并显示细脉状分布特征(图 1a、1b),其中的 Fe、Mg 组分主要由热液带入。

综合前文分析,并依据前人(章邦桐,1994;曾文乐等,2006,2010;张万良等,2008;蔡煜琦等,2013)对桃山矿田铀矿化成因及其围岩蚀变的研究成果,可大致推测大府上矿床绿泥石化与铀成矿的关系,即富铀热液沿着围岩构造裂隙、破碎带等运移,在相对酸性的还原环境下,交代黑云母等造岩矿物形成绿泥石,并且使黑云母中的惰性铀成了活性铀,因此,绿泥石化为铀成矿提供了铀源;随着富铀热液原有的物理化学平衡不断被破坏,流体中的铀酰离子被进一步还原、沉淀,形成沥青铀矿,有的构成沥青铀矿-绿泥石-黄铁矿脉。因此,绿泥石成分特征不仅可以反映成矿热液的特征,从而指示铀成矿环境和物理化学条件,而且可作为一种重要的找矿标志,对加强矿床成因认识以及指导下一步找矿方向都具有重要的理论和现实意义。

7 结论

大府上矿床绿泥石主要有 2 种产出形态:一种呈蠕虫状集合体沿长石、石英等矿物裂隙生长,有时甚至形成绿泥石细脉,该型绿泥石与铀成矿关系密切;另一种为黑云母蚀变而成,表现出明显的蚀变交代特征,并保有黑云母晶形假像。

绿泥石化学成分特征表明,大府上矿床绿泥石为富铁的蠕绿泥石,形成温度范围为 201.48~224.20℃,指示其形成于具有还原性特征的中低温热液蚀变过程,形成机制主要为“溶蚀-结晶”和“溶蚀-迁移-结晶”两种方式。

绿泥石化为铀成矿提供了铀源,并促使成矿热液中的铀酰离子被进一步还原、沉淀,形成沥青铀矿等细脉。

References

- Ai Yongfu and 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).
- Bryndzia L T and Scott S D. 1987. Application of chlorite-sulphide-oxide equilibria to metamorphosed sulphide ores, Snow Lake area, Manitoba[J]. *Econ. Geol.*, 82: 963~970.
- Bryndzia L T and Steven D S. 1987. The composition of chlorite as a function of sulfur and oxygen fugacity: an experimental study[J]. *American Journal of Science*, 287: 50~76.
- Cai Yuqi, Xu Hao, Guo Qingyin, *et al.* 2013. Metallogenic prognosis and prospecting orientation of granite type uranium deposit in Taoshan area, Jiangxi Province, China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(4): 1 283~1 291(in Chinese).
- Cathelineau M and Nieva D. 1985. A chlorite solid solution geothermometer: The Azufres (Mexico) geothermal system[J]. *Contribution Mineralogy Petrology*, 91: 235~244.
- Cathelineau M. 1988. Catio site occupancy in chlorites and illite as a function of temperature[J]. *Clay Minerals*, 23: 471~485.
- Deer W A, Howie R A and Zussman J. 1962. *Rock-forming Minerals: Sheet Silicates*[M]. London: Longman, 528.
- Foster M D. 1962. Interpretation of the composition and classification for the chlorite[J]. *US Geology Survey Prof. Paper*, 414A: 33.
- Guo Guolin, Liu Xiaodong, Pan Jiayong, *et al.* 2012. Character of chlorite and its relationship to uranium mineralization in uranium deposit No.302[J]. *Uranium Geology*, 28(1): 35~41(in Chinese).
- He Jianguo, Rong Jiashu, Mao Yuxian, *et al.* 2008. Chlorite in alteration zone of uranium deposits No. 201, No. 325 and No. 706[J]. *World Nuclear Geoscience*, 25(3): 125~133(in Chinese).
- Hiller S and Velde B. 1991. Octahedral occupancy and the chemical composition of diagenetic(low-temperature)chlorite[J]. *Clay Minerals*, 26: 149~168.
- Hua Renmin, Li Xiaofeng, Zhang Kaiping, *et al.* 2003. Characteristics of clay minerals derived from hydrothermal alteration in Jinshan gold deposit: Implication for the environment of water-rock interaction [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 23(1): 23~30(in Chinese).
- Inoue A. 1995. Formation of clay minerals in hydrothermal environments[A]. Veide B. *Origion and Mineralogy of Clays*[C]. Berlin: Springer, 268~330.
- Korzhinskii D S. 1968. The theory of metasomatic zoning[J]. *Mineralium Deposita*, 3(3): 222~231.
- Kranidiotis P and MacLean W H. 1987. Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Que-

- bec[J]. *Econ. Geol.*, 82: 1898~1991.
- Laird J. 1988. Chlorites: metamorphic petrology[J]. *Reviews in Mineralogy*, 19: 405~453.
- Liao Zhen, Liu Yuping, Li Chaoyang, *et al.* 2010. Characteristics of chlorites from Dulong Sn-Zn deposit and their metallogenic implications[J]. *Mineral Deposits*, 29(1): 169~176(in Chinese).
- Liu Yingjun and Cao Liming. 1987. *Element Geochemistry Principle*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 124~128(in Chinese).
- Nieto F. 1997. Chemical composition of metapelitic chlorites: X-ray diffraction and optical property approach[J]. *Eur. J. Mineral.*, 829~841.
- Rausell-Colom J A, Wiewiora A and Matesanz E. 1991. Relationship between composition and d001 for chlorite[J]. *American Mineralogist*, 76(7/8): 1373~1379.
- Shirozu H. 1978. *Developments in Sedimentology (Chlorite Minerals)* [M]. New York: Elsevier, 243~246.
- Stefano B. 1999. Applying X-ray diffraction geothermometer to chlorite [J]. *Clays and Clay Minerals*, 47(1): 54~63.
- Wang Xiaoyu, Mao Jingwen, Cheng Yanbo, *et al.* 2014. Characteristics of chlorite from the Xinliadong 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).
- Xie X G, Byerly G R and Ferrel R E. 1997. Ilb trioctahedral chlorite from the Barberton greenstone belt crystal structure and rock composition constraints with implication to geothermometry[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 126: 275~291.
- Zang W and Fyfe W S. 1995. Chloritization of the hydrothermally altered bedrock at the Igarape Bahia gold deposit, Carajas, Brazil[J]. *Mineralium Deposita*, 30: 30~38.
- Zeng Wenle, He Yuhua, Zhang Liugui, *et al.* 2010. A study on wall-rock alteration of uranium mineralization in Taoshan ore-field[J]. *Geology and Exploration*, 46(1): 1~9(in Chinese).
- Zeng Wenle, Shao Weijiang, Xu Yiya, *et al.* 2006. Discussion on origin of uranium mineralization and prospecting potential for Taoshan uranium ore-field, central Jiangxi[J]. *Geological Science and Technology BBS*, 103~106(in Chinese).
- Zhang Bangtong. 1994. Geochemical evidence for uranium mobilization and migration in granites from south China[J]. *Geochimica*, 2: 161~167(in Chinese).
- Zhang Shuming, Wei Zhengyu, Zhang Liang, *et al.* 2013. Characteristics and existent question of the alkali-metasomatism uranium deposit in Longshoushan[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 284~285(in Chinese).
- Zhang Wanliang, Xu Xiaoqi, Shao Fei, *et al.* 2008. Geological condition of uranium metallization and exploration orientation of Taoshan ore field in Jiangxi province[J]. *Uranium Geology*, 24(2): 101~107(in Chinese).
- Zhang Zhanshi, Hua Renmin, Ji Junfeng, *et al.* 2007. Characteristics and formation conditions of chlorite in No.201 and No.361 uranium deposits [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 27(2): 161~172(in Chinese).
- Zheng Y F, Shen W Z, Xu G Q, *et al.* 1992. Rb-Sr and U-Pb dating of the Daguzhai and Luobuli granitic massifs in South China[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 11(2): 97~110.
- Zheng Zuoping, Chen Fanrong and Yu Xueyuan. 1997. Characteristics of chlorite in Baguamiao gold deposit and their geological significance [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 17(1): 100~106(in Chinese).
- Zhou Leguang. 2007. *Process Mineralogy*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 137~140(in Chinese).

附中文参考文献

- 艾永富, 刘国平. 1998. 内蒙古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.
- 蔡煜琦, 徐浩, 郭庆银, 等. 2013. 江西省桃山地区花岗岩型铀矿预测及找矿方向[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 43(4): 1283~1291.
- 郭国林, 刘晓东, 潘家永, 等. 2012. 302 铀矿床绿泥石特征及其与铀成矿的关系[J]. *铀矿地质*, 28(1): 35~41.
- 何建国, 戎嘉树, 毛玉仙, 等. 2008. 201、325 和 706 铀矿床蚀变带绿泥石研究[J]. *世界核地质科学*, 25(3): 125~133.
- 华仁民, 李晓峰, 张开平, 等. 2003. 金山金矿热液蚀变粘土矿物特征及水-岩反应环境研究[J]. *矿物学报*, 23(1): 23~30.
- 廖震, 刘玉平, 李朝阳, 等. 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.
- 刘英俊, 曹励明. 1987. *元素地球化学导论*[M]. 北京: 地质出版社, 124~128.
- 王小雨, 毛景文, 程彦博, 等. 2014. 粤东新寮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.
- 曾文乐, 何育华, 张柳贵, 等. 2010. 桃山矿田铀矿化围岩蚀变研究[J]. *地质与勘探*, 46(1): 1~9.
- 曾文乐, 邵维江, 徐宜芽, 等. 2006. 赣中桃山矿田铀矿成因及找矿前景探讨[J]. *地学科技论坛*, 103~106.
- 章邦桐. 1994. 华南花岗岩中铀活化转移的地球化学证据[J]. *地球化学*, 2: 161~167.
- 张树明, 魏正宇, 张良, 等. 2013. 龙首山碱交代型铀矿床特征和存在的问题[J]. *矿物学报*, 284~285.
- 张万良, 徐小奇, 邵飞, 等. 2008. 桃山矿田铀成矿地质条件及找矿方向[J]. *铀矿地质*, 24(2): 101~107.
- 张展适, 华仁民, 季峻峰, 等. 2007. 201 和 361 铀矿床中绿泥石的特征及其形成环境研究[J]. *矿物学报*, 27(2): 161~172.
- 郑作平, 陈繁荣, 于学元. 1997. 八卦庙金矿床的绿泥石特征及成矿意义[J]. *矿物学报*, 17(1): 100~106.
- 周乐光. 2007. *工艺矿物学*[M]. 北京: 冶金工业出版社, 137~140.