

江西乐安居隆庵铀矿床绿泥石特征及地质意义

李海东^{1,2}, 潘家永², 刘文泉^{1,2}, 江卫兵¹, 李俊¹, 梁园园¹, 谢强¹, 鲁彦¹

(1. 核工业二九〇研究所, 广东 韶关 512029; 2. 东华理工大学, 江西 南昌 330013)

摘要: 位于相山铀矿田西部的居隆庵铀矿床绿泥石化十分强烈, 本文在对钻孔岩心样详细的野外和室内岩相学观测基础上, 利用电子探针技术研究了绿泥石的产出状态及共生组合关系, 并测定了其化学成分, 探讨了该矿床绿泥石地球化学特征及其与铀矿成矿的关系。研究表明: ① 该矿床存在黑云母蚀变形成的绿泥石、长石蚀变形成的绿泥石、脉状绿泥石和与铀矿密切共生的绿泥石共4种类型绿泥石; ② 该矿床以蠕绿泥石和铁镁绿泥石为主, 个别为鲕绿泥石, 其形成温度介于190.5~269.9℃之间, 平均为224.5℃, 属于中低温条件; ③ 该矿床绿泥石形成于还原环境, 形成机制分为溶解-沉淀机制和溶解-迁移-沉淀机制两种; ④ 绿泥石化过程改变了围岩的物理化学性质, 改变了铀在岩石中的赋存状态并促使铀的预富集。

关键词: 居隆庵铀矿床; 绿泥石; 成矿物理化学条件; 铀成矿

中图分类号: P578.962; P619.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)04-0535-14

Mineral characteristics and geological significance of chlorite from the Julong'an uranium deposit in Le'an, Jiangxi Province

LI Hai-dong^{1,2}, PAN Jia-yong², LIU Wen-quan^{1,2}, JIANG Wei-bing¹, LI Jun¹, LIANG Yuan-yuan¹,
XIE Qiang¹ and LU Yan¹

(1. NO. 290 Research Institute, CNNC, Shaoguan 512029, China; 2. East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: Located in the west of Xiangshan area, the Julong'an uranium deposit has undergone strong chloritization. Based on detailed field investigation and indoor petrographic observation, the authors studied the production state, association relation and chemical composition by applying the electron microprobe technology to the drill hole samples and investigated geochemical features of the chlorite deposit and its relationship with uranium mineralization. Some conclusions have been reached: ① There are four types of chlorites: chlorite from biotite alteration, chlorite from feldspar alteration, colloidal chlorite and uranium-associated chlorite; ② The major chlorites in the deposit are chlorophaeite and brunsvigite, with a small amount of chamosite. The temperature of chlorite varies from 190.5 to 269.9℃, with an average of 224.5℃, suggesting a medium and low temperature condition; ③ The chlorite deposit was formed in a relative reduction environment, with the two formation mechanisms being dissolution-precipitation and dissolution-migration-precipitation; ④ The process of chloritization changed the physical and chemical properties of surrounding rocks and accelerated uranium activation and pre-enrichment.

Key words: Julong'an uranium deposit; chlorite; metallogenic physicochemical condition; uranium mineralization

Fund support: National Defense Research Project (A0120100001)

收稿日期: 2016-10-26; 接受日期: 2017-04-07

基金项目: 国防基础研究项目(A0120100001)

作者简介: 李海东(1990-), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 地质学专业, E-mail: hdlidhlg@163.com; 通讯作者: 潘家永(1967-), 男, 教授, 地球化学专业, 主要从事铀矿床、矿床地球化学研究, E-mail: jypan@ecit.cn

绿泥石化是一种重要和常见的中低温热液交代蚀变,主要产于弱酸性、中性、基性火成岩、变质岩以及众多矿床的围岩蚀变中,而热液铀矿床的蚀变带中绿泥石化特别发育。近年来的研究表明,绿泥石的化学成分与其形成的温度、氧逸度、硫逸度等物理化学条件有关(MacDowell and Elders, 1980; Cathelineau and Nieva, 1985; Kranidiotis and MacLean, 1987; Bryndzia and Steven, 1987; Cathelineau, 1988; Jahren and Aagaard, 1989; Bevins *et al.*, 1991; Battaglia, 1999),能够反映出流体性质、水-岩反应的地质地球化学环境以及热液成矿过程的物理化学条件变化,因此众多学者通过对绿泥石矿物的研究来探讨矿床的成因(肖志峰等, 1993; 张展适等, 2007; 廖震等, 2010; 郭国林等, 2012; 张伟等, 2014; 王小雨等, 2014; 魏正宇等, 2014; 于秋莲等, 2014; 杨超等, 2015; 李仁泽等, 2016)。

居隆庵铀矿床是位于相山西部的一个大型铀矿床,位于铀矿田西部北东向邹-石断裂、羌头-小陂断裂与北西向石城-书堂断裂、河元背-石洞断裂所夹持的居隆庵菱形区块内(图1)。从上世纪五六十年代至今,很多研究者对相山铀矿田构造背景、赋矿围岩地球化学特征、火山机构、围岩蚀变特征、成矿流体来源与演化、成矿物质来源及其沉淀机制等进行了详细的研究,并取得丰富的成果(Chen, 1981; 徐海江等, 1988; 范洪海等, 2003; 吴仁贵, 2003; 张万良等, 2005; 黄锡强, 2008; 邵飞等, 2011; 陈正乐, 2011; 刘国奇等, 2011; 姚宏鑫等, 2013),也有众多学者对相山铀矿田围岩热液蚀变进行了大量研究(黄锡强等, 2008; 胡宝群等, 2011; 曹小兵等, 2012; 王运等, 2012),但多数是针对主成矿期(酸性热液成矿阶段)的蚀变研究,对于早期碱性热液蚀变阶段研究较少,对于早期碱性热液蚀变阶段成矿过程物理

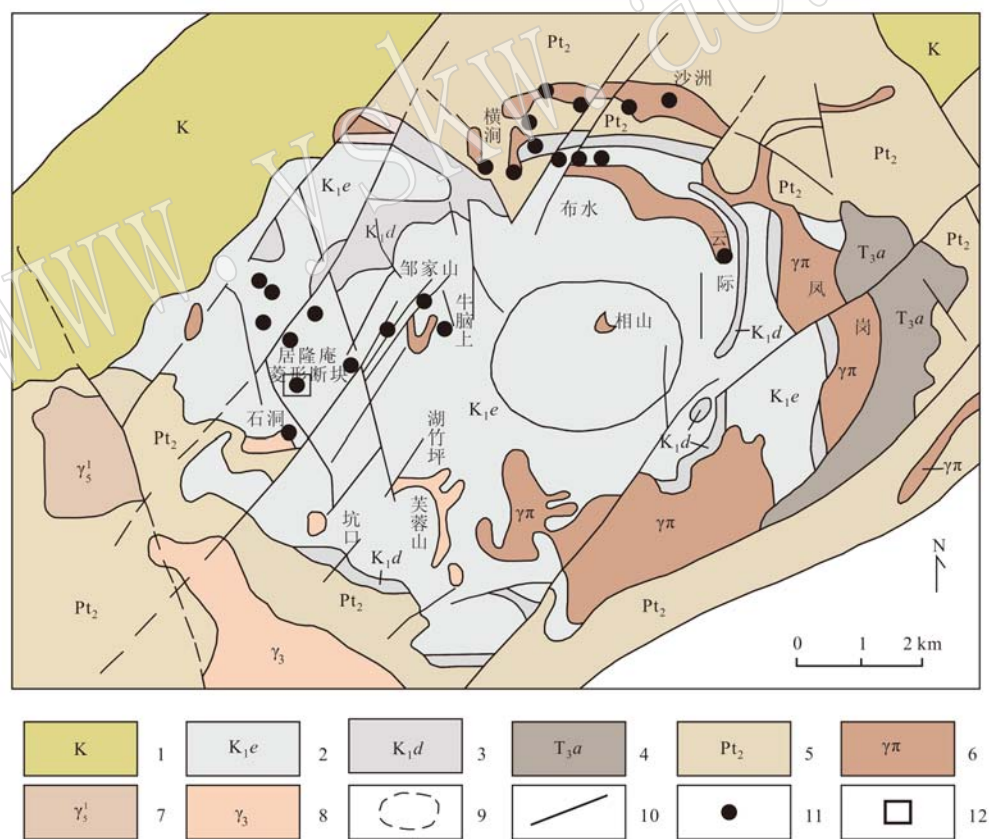


图1 居隆庵铀矿床区域地质图略图(据吴志坚等, 2014)

Fig. 1 Schematic geological map of the Julong'an uranium deposit (after Wu Zhijian *et al.*, 2014)

1—砂砾岩; 2—碎斑熔岩、晶屑玻屑凝灰岩; 3—流纹英安岩、熔结凝灰岩; 4—砂砾岩、砂岩; 5—变质岩; 6—花岗斑岩; 7、8—花岗岩; 9—火山颈(推测); 10—断裂; 11—矿床; 12—居隆庵矿床

1—glutinite; 2—porphyroclastic lava and crystal vitric tuff; 3—rhyodacite and flood tuff; 4—glutinite and sandstone; 5—metamorphic rock; 6—granite porphyry; 7—8—granite; 9—volcanic plug(guestimate); 10—fault; 11—deposit; 12—Julong'an deposit

化学条件以及该阶段蚀变与铀成矿的关系研究相对较少。本文在对钻孔岩心样详细的野外和室内岩相学观测基础上,利用电子探针技术分析了绿泥石的产出状态及共生组合关系,并测定了其化学成分,探讨绿泥石的地球化学特征及与铀成矿的关系。

相山铀矿田位于赣杭构造带西南段,北东向赣杭火山岩型铀成矿带与北北东向大王山-于山花岗岩型铀成矿带的复合叠加部位。区域上受北东向遂川深断裂与北北东向宜黄-安远深断裂交汇控制,在中生代出现大规模的中酸性火山喷发和岩浆浅层侵入活动,形成一个大型火山塌陷盆地-相山盆地。盆地整体分为3层结构:基底主要为中元古代的浅变质岩,部分为下石炭统、上三叠统;基底之上为下白垩统火山岩;盆地北西侧火山岩之上有上白垩统红层覆盖。在中生代,该区处于NEE向赣杭构造火山岩带西南端与近NS向赣中南花岗岩带的交接地带,发生了强烈的构造-岩浆-成矿活动,并形成了以铀为主的多种金属、非金属矿产。

1 样品采集及分析方法

为了样品的代表性,本文采集了居隆庵矿床ZK78-81、ZK58-18、ZK50A-13、ZK60A-11这4个钻孔深部样品,并通过野外和室内分析,选取其中代表该矿床早期碱性热液蚀变的样品,进行了详细的岩矿鉴定和电子探针微区分析。

绿泥石成分分析在核工业北京地质研究院测试中心完成,电子探针仪器型号为JXA-8100,加速电压20 kV,探针束流 1×10^{-8} ,出射角 40° ,电子束斑 $2 \mu\text{m}$,执行标准为GB/T15074-2008《电子探针定量分析方法通则》,其中Si、Na、Al选用钠长石,K选用钾长石,Ca选用钙蔷薇辉石,Mn选用蔷薇辉石,Ti选用金红石,Fe选用赤铁矿,Mg选用辉石为标样。

所有绿泥石的电子探针分析结果皆采用28个氧原子标准来计算各绿泥石的特征值。电子探针本身无法测定 Fe^{3+} 的含量,郑巧荣(1983)提出利用电价差值法可以计算出 Fe^{3+} 值。电子探针数据中的FeO值是把 Fe^{3+} 当成 Fe^{2+} ,分子式中的阳离子总电价低于理论电价值,所以根据矿物阳离子正电价总和与阴离子负电价总和平衡的原理,就可以计算出 Fe^{3+} 的含量。矿物的包裹体、衬里、混层结构以及复杂的矿物共生关系都可能导致绿泥石的电子探针数据产生误差。据此(Foster, 1962; Hiller and Velde,

1991; Zang and Fyfe, 1995)提出利用 $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO}) < 0.5\%$ 的标准作为判断绿泥石是否被混染,根据此标准,本文去除了几个不符合的数据。

2 绿泥石产出特征及成分

2.1 绿泥石产出特征

根据野外、手标本以及显微镜下特征,将居隆庵铀矿床分为黑云母蚀变型绿泥石、长石蚀变型绿泥石、脉状绿泥石和与铀矿物密切共生的绿泥石共4种类型。其中黑云母蚀变形成的绿泥石分布最广,常完全交代黑云母并呈交代黑云母假像,蚀变强烈处可见黑云母转变为浅色云母(图2a~2c);长石蚀变型绿泥石多呈细粒状分布于长石表面或呈细脉状或鳞片状分布于长石四周或裂隙中(图2d~2f);脉状绿泥石可细分为裂隙脉型和沿矿物间隙细脉型两种(2g~2j);与铀矿密切共生的绿泥石多呈细脉状,常与碳酸盐、石英、钠长石、磷灰石等矿物共生(图3)。

2.2 化学成分和分类

绿泥石是一族层状结构硅酸盐矿物,其基本构成为2个四面体层夹1个八面体层,构成通式为 $(\text{R}_u^{2+}\text{R}_y^{3+}\square_z)^{\text{VI}}(\text{Si}_{4-z}\text{Al}_z)^{\text{IV}}\text{O}_{10+w}(\text{OH})_{3-w}$,其中 R^{2+} 代表 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} , R^{3+} 代表 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Cr^{3+} 占据八面体空隙,Ti、Cr、 Fe^{3+} 也会充填于四面体空隙中, $\square$ 代表结构空穴, $u + y + z = 6$, $z = (y - w - x)/2$ 。所有绿泥石结构式都以28个氧原子为标准计算得出(表1)。

从表1中可以看出各种绿泥石成分含量。黑云母蚀变形成的绿泥石, SiO_2 含量介于24.01%~26.41%之间,平均25.69%;FeO含量介于31.62%~37.69%之间,平均33.54%; Al_2O_3 含量介于19.20%~22.26%之间,平均20.62%;MgO含量介于4.74%~7.56%之间,平均6.57%。长石蚀变形成的绿泥石, SiO_2 含量介于22.21%~27.44%之间,平均24.83%;FeO含量介于34.48%~40.05%之间,平均37.27%; Al_2O_3 含量介于14.96%~17.94%之间,平均16.45%;MgO含量介于4.76%~8.03%之间,平均6.40%。脉状绿泥石, SiO_2 含量介于24.97%~28.72%之间,平均27.34%;FeO含量介于28.98%~39.05%之间,平均32.13%; Al_2O_3 含量介于15.34%~21.80%之间,平均17.39%;MgO含量介于4.52%~12.32%之间,平均10.10%。与铀矿密切共生的绿泥石, SiO_2 含量

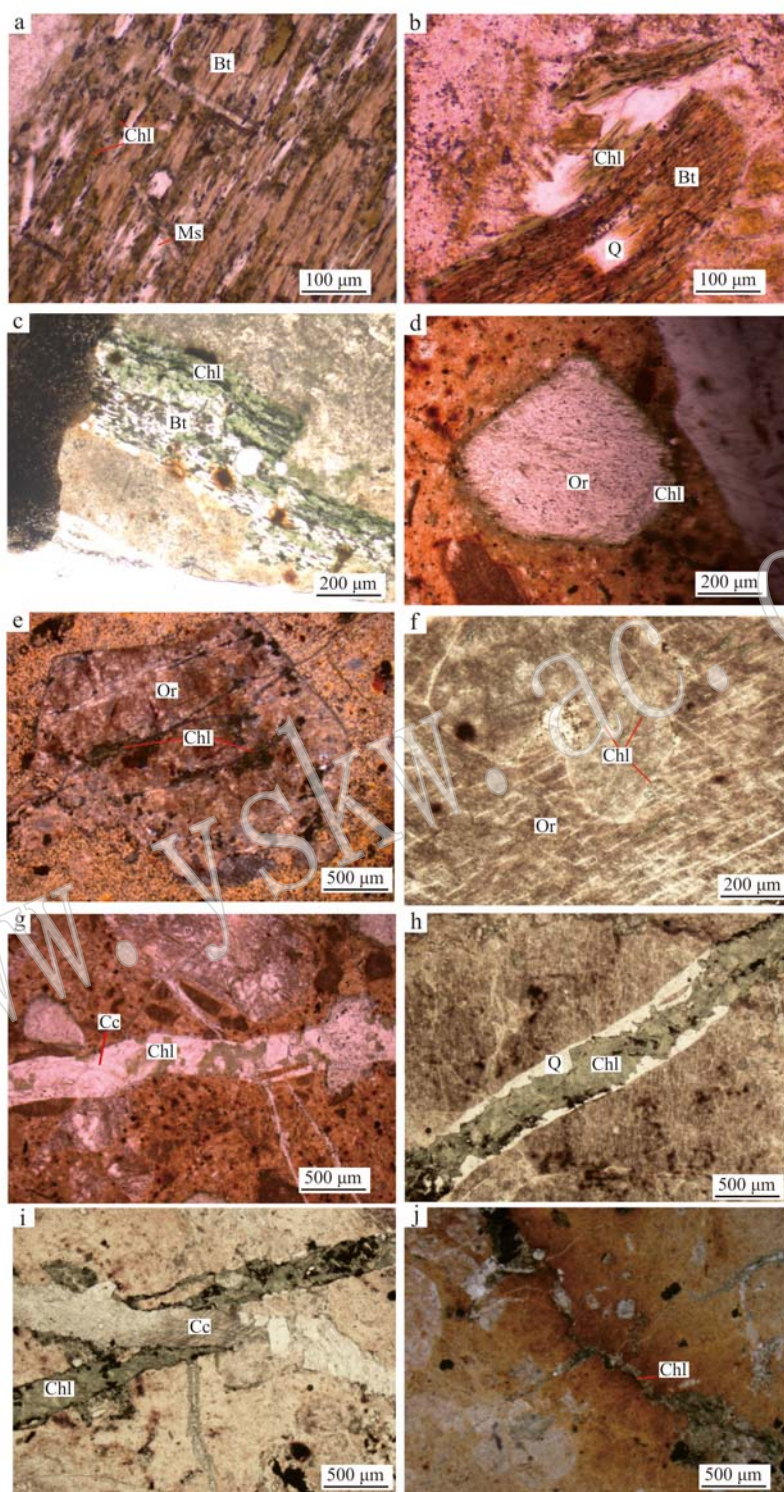


图 2 居隆庵铀矿床绿泥石产出特征

Fig. 2 Microscopic features of chlorites in the Julong'an deposit

a—黑云母(Bt)绿泥石(Chl)化、浅色云母(Ms)化; b—沿黑云母边缘、解理缝交代的绿泥石; c—黑云母绿泥石化,并呈黑云母假像; d—绿泥石化沿正长石(Or)四周分布; e—沿长石裂隙分布的绿泥石; f—正长石表面的绿泥石化; g—叠加于碳酸盐(Cc)脉之上的绿泥石; h—脉状绿泥石叠加于早期石英脉(Q)之上; i—碳酸盐脉切穿绿泥石脉; j—沿微裂隙脉分布的绿泥石

a—chloritization and light seritization of biotite; b—chlorite distributed along edge and cleavage of biotite; c—chloritization of biotite exhibiting pseudomorph of biotite; d—chloritization around orthoclase; e—chloritization distributed along feldspar fissures; f—chloritization distributed on orthoclase surface; g—chlorite superimposed on carbonatite vein; h—colloidal chlorite superimposed on quartz vein; i—carbonatite vein penetrating colloidal chlorite; j—chlorite distributed along microfissures

表 1 居隆庵矿床中绿泥石的电子探针分析结果及特征值
Table 1 Electron microprobe analyses and characteristic values of chlorite in the Julong' an deposit

样品编号 产状类型	JLA14-4				JLA14-7				JLA14-8-1				JLA14-8-2														
	II	III	III	I	I	I	I	I	I	III	III	III	I	I	I	IV	IV	IV	III	III	III	III	III	III	III		
SiO ₂	27.44	22.21	25.92	25.38	26.37	25.27	26.41	26.34	26.25	27.95	28.47	26.46	24.97	28.72	27.59	25.69	25.42	24.01	25.16	29.42	29.69	27.85	28.28	27.94	27.48	28.35	27.38
TiO ₂	0.07	0.20	0	0.10	1.28	0	0.73	1.72	0	0	0.07	0	0	0	0	0.06	0	0	0	0.17	0.14	0	0	0.06	0.15	0.17	0.23
Al ₂ O ₃	17.94	14.96	17.24	17.89	20.00	20.40	20.52	20.08	19.20	15.34	16.14	18.38	21.80	15.78	16.62	20.57	20.36	22.26	21.91	15.51	16.34	16.63	16.45	16.27	17.75	18.10	19.03
FeO	34.48	40.05	39.50	38.85	32.78	34.38	32.54	31.62	37.69	28.98	31.06	30.70	31.01	31.88	31.38	33.44	34.44	33.29	32.61	29.99	30.68	29.86	29.96	30.28	29.89	31.40	35.12
MnO	0.05	0.03	0.04	0.15	0.53	0.44	0.43	0.50	0.52	0.11	0.12	0.11	0.21	0.13	0.17	0.40	0.26	0.75	0.71	0.13	0.12	0.14	0.12	0.12	0.16	0.13	0.42
MgO	8.03	4.76	4.52	4.79	7.00	5.85	6.61	7.28	4.74	12.32	11.85	10.69	8.40	11.74	10.92	7.56	7.66	6.47	7.05	12.09	13.02	11.52	12.08	11.94	11.91	11.46	7.28
CaO	0.06	0.13	0.03	0.10	0.04	0.06	0.08	0.07	0.07	0.08	0.13	0.07	0.14	0.19	0.15	0.04	0.02	0.31	0.16	0.1	0.05	0.19	0.16	0.29	0.12	0.12	0.07
Na ₂ O	0.08	0.05	0.06	0.05	0.02	0.26	0.02	0.09	0	0.04	0	0.07	0.09	0.06	0.13	0.05	0	0.04	0	0.02	0.03	0.02	0.06	0.04	0.03	0.08	0
K ₂ O	0.01	0.03	0.04	0.03	0.22	0.27	0.38	0.38	0.05	0	0	0	0.02	0.02	0.04	0	0	0.03	0.01	0	0.01	0.02	0.01	0	0	0.01	0.01
F	0.26	0.17	0.33	0.18	0.21	0.18	0.35	0.59	0.18	0.40	0.51	0.40	0	0.38	0.37	0.14	0	0	0	0.29	0.22	0.39	0.51	0.42	0.23	0.31	0
Cl	0	0	0.01	0	0.02	0.02	0.02	0.04	0.01	0	0	0	0	0.02	0.03	0.01	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0.01	0
总量	88.46	82.59	87.69	87.52	88.53	87.13	88.09	88.74	88.73	85.25	88.35	86.88	86.64	88.92	87.4	87.96	88.16	87.27	87.68	87.73	90.30	86.62	87.63	87.38	87.72	90.14	89.54
Si	5.93	5.49	5.85	5.75	5.65	5.59	5.66	5.56	5.78	6.12	6.04	5.73	5.46	6.10	5.96	5.59	5.57	5.30	5.45	6.25	6.15	6.01	6.02	6.00	5.87	5.90	5.87
Al ^{IV}	2.07	2.51	2.15	2.25	2.35	2.41	2.34	2.44	2.22	1.88	1.96	2.27	2.54	1.90	2.04	2.42	2.43	2.70	2.55	1.75	1.85	1.99	1.98	2.00	2.13	2.10	2.13
Al ^{VI}	2.55	1.89	2.48	2.56	2.77	2.96	2.93	2.66	2.82	2.12	2.13	2.48	3.11	2.09	2.24	2.90	2.85	3.12	3.10	2.18	2.17	2.29	2.20	2.17	2.38	2.39	2.71
Ti	0.01	0.04	0	0.02	0.21	0	0.12	0.27	0	0	0.01	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0.03	0.02	0	0	0.01	0.02	0.03	0.04
TiFe	6.24	8.45	7.45	7.36	5.88	6.36	5.83	5.58	6.94	5.31	5.52	5.56	5.67	5.66	5.67	6.08	6.31	6.14	5.91	5.33	5.32	5.39	5.33	5.44	5.34	5.47	6.29
Fe ²⁺	5.85	8.45	7.13	7.10	5.34	6.05	5.27	4.95	6.53	4.99	5.17	5.28	5.38	5.39	5.41	5.75	6.08	5.89	5.52	4.93	5.02	5.05	4.99	5.15	5.08	5.15	5.89
Fe ³⁺	0.39	0	0.33	0.26	0.53	0.31	0.56	0.63	0.41	0.32	0.34	0.29	0.29	0.27	0.27	0.34	0.23	0.26	0.39	0.40	0.30	0.35	0.34	0.29	0.27	0.32	0.40
Mn	0.01	0.01	0.01	0.03	0.1	0.08	0.08	0.09	0.10	0.02	0.02	0.02	0.04	0.02	0.03	0.07	0.05	0.14	0.13	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.08
Mg	2.59	1.75	1.52	1.62	2.24	1.93	2.11	2.29	1.56	4.02	3.75	3.45	2.74	3.72	3.52	2.45	2.5	2.13	2.28	3.83	4.02	3.71	3.83	3.82	3.8	3.56	2.33
Ca	0.01	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.04	0.04	0.01	0.01	0.07	0.04	0.02	0.01	0.04	0.04	0.07	0.03	0.03	0.02

续表 1
Continued Table 1

样品编号 产状类型	JLA14-2				JLA14-4				JLA14-7				JLA14-8-1				JLA14-8-2								
	II	III	III	III	I	I	I	I	I	I	I	I	III	III	III	III	IV	IV	III	III	III	III			
Na	0.07	0.05	0.05	0.04	0.02	0.22	0.02	0.07	0	0.03	0	0.06	0.08	0.05	0.11	0.04	0	0.03	0	0.02	0.02	0.05	0.03	0.07	0
K	0.01	0.02	0.02	0.02	0.12	0.15	0.21	0.21	0.03	0	0	0	0.01	0.01	0.02	0	0	0.02	0.01	0	0.01	0.01	0	0	0.01
R ²⁺	8.45	10.21	8.65	8.74	7.68	8.06	7.46	7.33	8.19	9.03	8.94	8.75	3.07	4.01	3.82	2.86	2.78	2.53	2.80	4.26	4.34	4.08	4.20	4.14	3.90
Fe ^o /(Fe ⁺ Mg)	0.71	0.83	0.83	0.82	0.72	0.77	0.73	0.71	0.82	0.57	0.60	0.62	0.67	0.60	0.62	0.71	0.72	0.74	0.72	0.58	0.57	0.59	0.58	0.59	0.61
Mg ^o /(Fe ⁺ Mg)	0.29	0.17	0.17	0.18	0.28	0.23	0.27	0.29	0.18	0.43	0.40	0.38	0.33	0.40	0.38	0.29	0.28	0.26	0.28	0.42	0.43	0.41	0.42	0.41	0.39
Al/(Al ⁺ Fe ⁺ +Mg)	0.34	0.30	0.34	0.35	0.39	0.39	0.40	0.39	0.37	0.30	0.31	0.34	0.40	0.30	0.32	0.38	0.37	0.41	0.41	0.30	0.30	0.32	0.31	0.33	0.36
d _{001/0.1} nm	14.16	14.11	14.14	14.14	14.15	14.14	14.15	14.15	14.15	14.18	14.17	14.16	14.14	14.18	14.17	14.14	14.14	14.12	14.14	14.19	14.18	14.17	14.18	14.17	14.14
t/℃	218.1	269.9	235.9	241.5	229.2	240.2	228.1	230.6	233.7	198.7	204.9	224.0	240.9	203.9	211.9	237.1	241.5	255.2	242.6	190.5	197.3	205.4	204.5	207.2	213.8
a ₃	0.12	0.49	0.32	0.33	0.12	0.20	0.12	0.10	0.25	0.04	0.05	0.07	0.11	0.06	0.07	0.14	0.17	0.19	0.14	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.14
a ₆	0.29	0	0.49	0.37	0.35	0.29	0.38	0.36	0.50	0.10	0.13	0.12	0.16	0.12	0.12	0.23	0.18	0.20	0.25	0.14	0.10	0.13	0.12	0.11	0.13
lgK ₁	11.31	9.69	10.73	10.55	10.94	10.59	10.98	10.90	10.80	11.99	11.77	11.12	10.57	11.81	11.53	10.69	10.55	10.12	10.51	12.29	12.04	11.75	11.79	11.69	11.46
lgK ₂	-147.9	-191.4	-161.6	-166.2	-156.3	-165.1	-155.5	-157.4	-159.9	-134.4	-138.5	-152.3	-165.7	-137.8	-143.4	-162.6	-166.2	-177.9	-167.1	-129.1	-133.4	-138.9	-138.2	-140.1	-144.1
lgf _{O₂}	-43.80	0	-42.18	-41.98	-41.90	-41.74	-41.92	-41.38	-41.99	-46.37	-45.49	-43.58	-41.67	-46.05	-45.13	-41.88	-42.10	-40.41	-40.99	-46.96	-46.66	-45.40	-45.52	-45.51	-44.85
lgf _{H₂}	-3.76	0	-0.94	-0.17	-1.47	-0.16	-1.60	-1.01	-1.06	-7.10	-6.02	-2.98	0	-6.44	-5.13	-0.57	-0.20	2.44	0.58	-8.19	-7.40	-5.92	-6.07	-5.81	-4.76

注：I—黑云母蚀变绿泥石；II—长石蚀变绿泥石；III—脉状绿泥石；IV—与钠矿物密切共生型绿泥石。

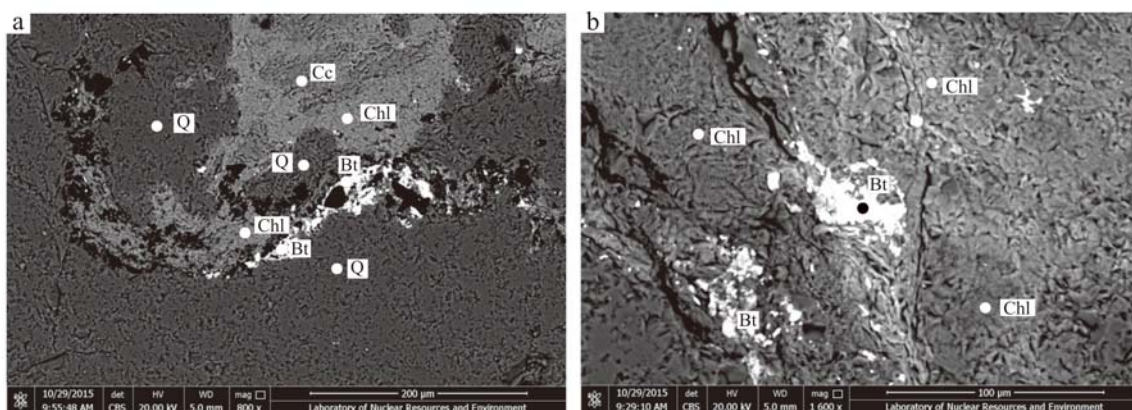


图3 铀矿物背色散和显微图像

Fig. 3 Electron probe scattering diagram of uranium minerals

Bt—钛铀矿; Chl—绿泥石; Cc—方解石; Q—石英

Bt—brannerite; Chl—chlorite; Cc—calcite; Q—quartz

介于 25.42%~29.69% 之间, 平均 28.18%; FeO 含量介于 29.99%~34.44% 之间, 平均 31.70%; Al_2O_3 介于 15.51%~20.36% 之间, 平均 17.40%; MgO 含量介于 7.66%~13.02% 之间, 平均 10.92%。整体而言, MgO 和 FeO 含量浮动范围比较大, 并且两者之间具有此增彼涨的变化趋势。

通常利用绿泥石的 Fe—Si 图解来对绿泥石进行分类和命名(Deer *et al.*, 1962)。从绿泥石分类命名图(图4)中可以看出大多数点落在蠕绿泥石和铁镁绿泥石范围内, 个别落在鲕绿泥石范围。其中由

黑云母蚀变的绿泥石主要为蠕绿泥石, 个别为铁镁绿泥石, 由长石蚀变的绿泥石主要为铁镁绿泥石, 呈脉状产出的绿泥石主要为铁镁绿泥石以及个别为鲕绿泥石, 与铀矿密切共生的主要为铁镁绿泥石。

2.3 绿泥石的 Al^{IV} 、 Al^{VI} 、 $Fe/(Fe + Mg)$ 、 $Mg/(Fe + Mg)$ 值

通常利用绿泥石的 Al^{IV} 、 Al^{VI} 值以及 $(Fe + Al^{VI})$ 与 Mg 的关系图解来分析说明绿泥石四面体和八面体位置上的替代关系。Xie(1997)研究表明当四面体位置的离子替代关系是完全的钙镁闪石型替代时, Al^{IV} 和 Al^{VI} 值之间具有接近 1:1 的线性关系(相关系数为 0.95)。居隆庵矿床中绿泥石的 Al^{IV} 值介于 1.75~2.70 之间, Al^{VI} 值介于 1.89~3.12 之间, 除 1 个样品外, 绝大多数样品的 $Al^{IV} < Al^{VI}$, Al^{IV}/Al^{VI} 值介于 0.82~0.93 之间, 变化浮动范围较窄。 $Al^{IV} = 0.5211 Al^{VI} + 0.8807$, 因此居隆庵矿床绿泥石的四面体位置并不是单纯的钙镁闪石型替代。在绿泥石四面体晶体结构中铝主要取代硅, 因此, Al^{IV}/Al^{VI} 值也说明居隆庵矿床绿泥石中存在较多的 Al^{IV} 取代 Si^{4+} , 为了电荷达到平衡, 在八面体位置上 Al^{VI} 替代 Fe 或 Mg, 所以 Al^{IV}/Al^{VI} 值的变化也可以说明样品中 Fe^{3+} 含量较低, 这与根据郑巧荣(1983)的电价差值法计算出 Fe^{3+} 值偏低相一致。绿泥石中 Al^{VI} 值普遍高于 Al^{IV} 的值, 反映出 Al^{IV} 对八面体位置上的 Fe 和 Mg 的置换要高于四面体位置上 Al^{VI} 对 Si^{4+} 的置换。

$Al^{VI} + Fe - Mg$ 关系图可以反映出绿泥石的八面体位置上的替代关系(Xie, 1997)。从图 5 中可以

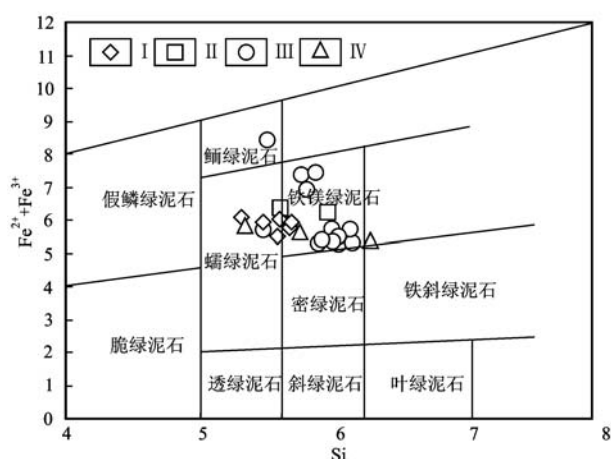


图4 居隆庵矿床绿泥石分类图

Fig. 4 Classification of chlorite in the Julong'an deposit

I—黑云母蚀变型绿泥石; II—长石蚀变型绿泥石;

III—脉状绿泥石; IV—与铀矿密切共生绿泥石

I—chlorite of biotite alteration type; II—chlorite of feldspar alteration type;

III—colloidal chlorite; IV—uranium-associated chlorite

看出绿泥石的投点显示出很好的线性负相关关系, $Al^{VI} + Fe = -0.9578 Mg + 11.254$ 。这说明了绿泥石八面体位置主要被这3种元素占据, 并且在该位置上 Al^{VI} 和 Fe 都可以替换 Mg。

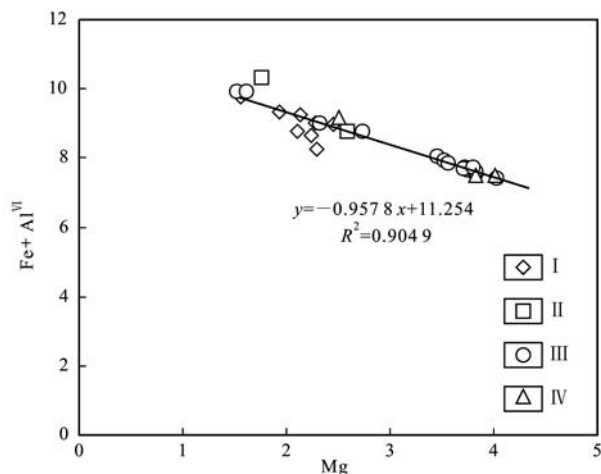


图5 居隆庵绿泥石的 $Al^{VI} + Fe - Mg$ 关系图
Fig. 5 $Al^{VI} + Fe - Mg$ diagram of chlorite in the Julong'an deposit

前人研究表明主要阳离子与镁的关系图解可以反映出原岩经历的蚀变过程, 由一次热液蚀变形成的绿泥石, 其主要阳离子与镁离子呈明显的线性相关性。图6为绿泥石中主要阳离子与Mg相关性图解, 从图中可以看出除了Fe-Mg相关性图解具有一定的线性关系外, 其余主要阳离子与镁关系图解中都无明显线性关系。这表明居隆庵矿床绿泥石化是多次热液作用的产物, 这与在显微镜下观察到的绿泥石脉被碳酸盐切穿、而后又有绿泥石叠加在碳酸盐脉之上相一致(图2g、2h、2i)。

从 $Al^{IV} - Mg/(Fe + Mg)$ 和 $Al^{IV} - Fe/(Fe + Mg)$ 图解中可以看出(图7), Al^{IV} 与 $Mg/(Fe + Mg)$ 呈良好的负相关关系, 而 Al^{IV} 与 $Fe/(Fe + Mg)$ 呈良好的正相关关系, 这反映了随着四面体上 Al^{IV} 对 Si 替换同时, 八面体位置上 Fe 对 Mg 也进行着替换, 使得 Fe 的含量在增加 Mg 的含量在降低。由于 Fe 在对 Mg 置换的过程中, 导致绿泥石内部结构发生变动, 反过来又促进了 Al^{IV} 对 Si 的置换(Xie, 1997)。

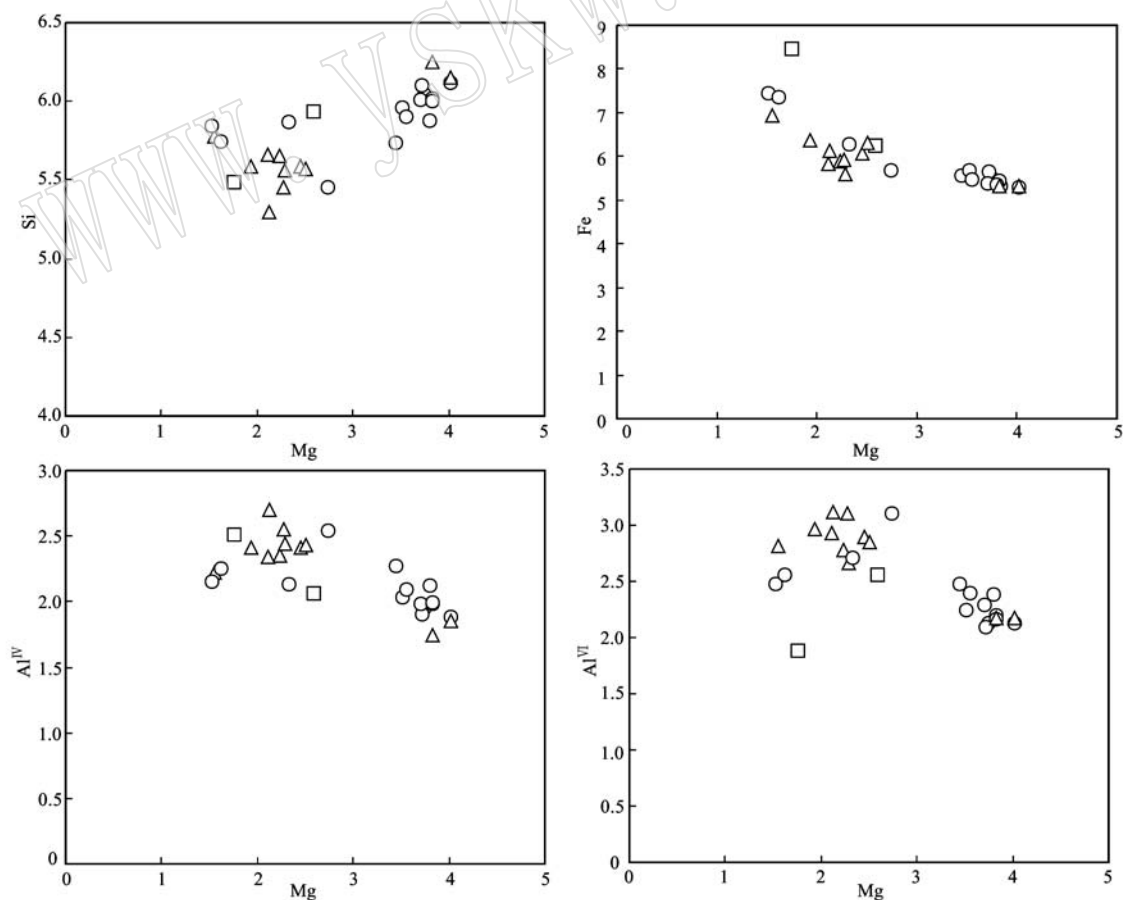
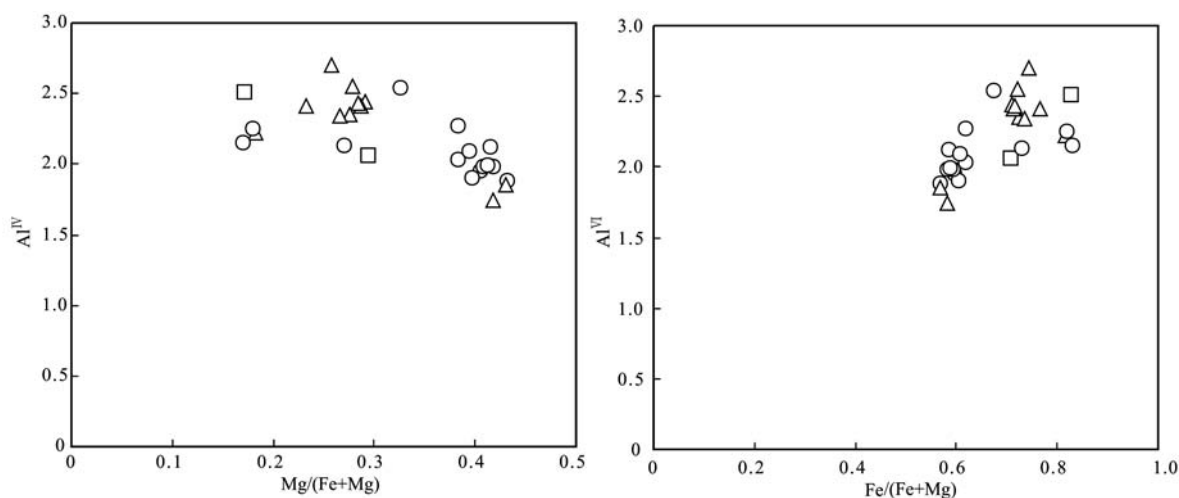


图6 居隆庵矿床绿泥石中主要阳离子与镁的关系图
Fig. 6 The relationship between major cations and magnesium of chlorite in the Julong'an deposit

图7 居隆庵矿床绿泥石 Al^{IV} 与 $Mg/(Fe+Mg)$ 、 $Fe/(Fe+Mg)$ 的关系图解Fig. 7 Al^{IV} - $Mg/Fe+Mg$ and Al^{IV} - $Fe/Mg+Fe$ diagram of chlorite in the Julong'an deposit

3 绿泥石形成的物理化学条件

3.1 绿泥石形成温度

绿泥石作为稳定存在于中低温、低压环境的矿物,因在结构上具有可变性,成分上具有非计量性,导致其成分和结构变化与其形成温度之间存在一定关系 (Caritat *et al.*, 1993; Zang and Fyfe, 1995; Martinez-Serrano and Dubois, 1998; Battaglia, 1999)。

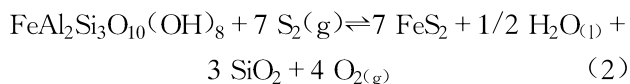
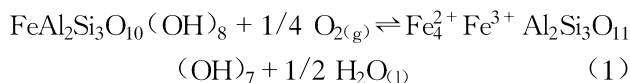
本文利用 Raused-Colom 等 (1991) 年提出、后经 Nieto (1997) 修改的计算公式 $d_{001}(0.1\text{ nm}) = 14.339 - 0.115n(Al^{IV}) - 0.0201n(Fe^{2+})$ (此计算公式中绿泥石的结构式是按 14 个氧原子计算, n 表示阳离子数) 来计算面网间距 d_{001} 值,再根据 Battaglia 提出的 d_{001} 与温度之间的关系方程 $t/^{\circ}\text{C} = (14.379 - d_{001})/0.001$ 计算出绿泥石的形成温度,各绿泥石的形成温度见表 1。所有绿泥石测温介于 $190.5 \sim 269.9^{\circ}\text{C}$ 之间,这与郭建 (2014) 所测得石英包裹体温度 ($200 \sim 260^{\circ}\text{C}$) 基本一致。从表中可以看出交代黑云母的绿泥石温度最高,介于 $228.1 \sim 255.0^{\circ}\text{C}$ 之间,平均值为 237.1°C ;脉状绿泥石温度变化较大,介于 $198.7 \sim 242.6^{\circ}\text{C}$ 之间,平均为 217.7°C ;与铀矿物密切共生的绿泥石形成温度介于 $197.3 \sim 241.5^{\circ}\text{C}$ 之间,温度更低。长石蚀变型数据较少,难以确定其温度的主要区间。从图 8 可以看出绿泥石形成温度没有明显的峰值,具连续变化的特征。

3.2 绿泥石形成的氧逸度和硫逸度

绿泥石的氧逸度和硫逸度可以很好地反映绿泥

石生成时的物理化学条件。Walshe (1986)、Bryndzia 和 Scott (1987) 分别根据绿泥石成分来计算其形成时的氧逸度、硫逸度、温度和压力等。国内也有很多学者利用上述计算方法来计算金矿、锡矿成矿过程绿泥石形成的氧逸度和硫逸度 (肖志峰等, 1993; 郑作平等, 1997; 张伟等, 2014), 具有很好的指示意义。本文选用 Walshe (1986) 提出的计算方法,采用张伟等 (2014) 经过拟合后的反应平衡常数与温度的函数关系式来计算居隆庵矿床形成绿泥石的氧逸度和硫逸度。

Walshe (1986) 根据绿泥石各成分特征将其分为 6 个端员,称其为绿泥石六端员模型。在绿泥石的六端员模型中,依据绿泥石各端员成分之间相互转换的关系,并结合热力学知识,提出了根据绿泥石化学成分计算各端员组分的含量、活度以及相关的 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 、 Al^{IV} 、 Al^{VI} 等含量的计算公式。根据下列反应方程式计算绿泥石形成时的氧逸度和硫逸度:



其中 $FeAl_2Si_3O_{10}(OH)_8$ 表示绿泥石的第 3 端员组分 (C3), $Fe_4^{2+}Fe^{3+}Al_2Si_3O_{11}(OH)_7$ 表示绿泥石第 6 端员组分 (C6, 鲕绿泥石)。由上述反应式 (1) 可以得出绿泥石形成时氧逸度 lgf_{O_2} :

$$lgf_{O_2} = 4(lga_6 - lga_3 - lgK_1) \quad (3)$$

其中 a_3 表示端员组分 C3 的活度, a_6 表示端员组分

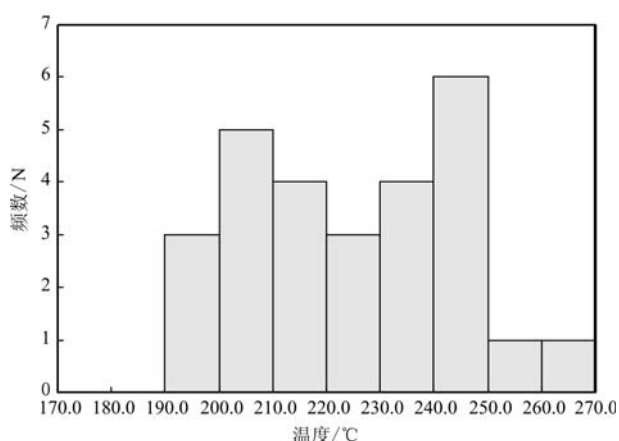


图 8 绿泥石温度柱状图

Fig. 8 Columnar section of chlorite

C6 的活度, K_1 表示反应方程式(1)的平衡常数。由反应方程式(2)可以得出绿泥石形成时的硫逸度 $\lg f_{S_2}$:

$$\lg f_{S_2} = 1/7(4 \lg f_{O_2} - \lg a_3 - \lg K_2) \quad (4)$$

K_2 表示反应方程式(2)的平衡常数, a_3 、 a_6 计算公式如下(所有绿泥石结构式都以 28 个氧原子为标准计算得出):

$$a_3 = 59.72(x_{Fe^{2+}, VI})^5 x_{Al, VI} x_{Si, IV} x_{Al, IV}$$

$$a_6 = 729(x_{Fe^{2+}, VI})^4 x_{Al, VI} x_{Si, IV} x_{Al, IV} x_{Fe^{3+}, VI}$$

其中, $x_{i,j}$ 表示 i 离子在 j 次配位上离子数占 j 次配位上离子总数的摩尔分数。

张伟等(2014)利用 Walshe(1986)给出的不同温度所对应的 $\lg K_1$ 、 $\lg K_2$ 值, 运用新的数学方法重新拟合平衡常数与温度之间的函数关系, 公式如下:

$$\lg K_1 = 21.77 e - 0.003 t \quad (5)$$

$$\lg K_2 = 0.1368 t - 0.002 t^2 - 82.615 \quad (6)$$

式中 e 为自然底数, t 为温度。将各绿泥石温度值代入公式(5)和(6), 求出各平衡常数, 将求得的平衡常数值代入公式(3)和(4), 即可求出绿泥石形成时的氧逸度和硫逸度。计算结果(表 1)显示, $\lg f_{O_2}$ 介于 $-46.96 \sim -40.41$ 之间, $\lg f_{S_2}$ 介于 $-8.19 \sim 2.44$ 之间, 属于低氧逸度、高硫逸度环境。其中由黑云母蚀变而成的绿泥石和长石蚀变的绿泥石具有较高的 $\lg f_{O_2}$, 而脉状绿泥石和与铀矿物密切相关的绿泥石具有较低的氧逸度, 说明居隆庵矿床碱性热液交代蚀变过程是向低氧逸度方向逐渐演化的, 即热液流体越来越具还原性。

此外, 居隆庵矿床碱性热液蚀变是以钠长石化开始, 以方解石化结束, 所以整体而言蚀变矿物先出

现钠长石, 其次绿泥石, 最后方解石。郭建(2014)测得碱性热液蚀变早期流体氧逸度为 2.16×10^{-33} , 吴柏林等(2006)测得碱性热液阶段方解石中流体包裹体氧逸度 $\lg f_{O_2} = -51.1$, 而本文利用绿泥石所测得氧逸度为 $-46.96 \sim -40.41$ 之间, 介于二者之间。这也说明在碱性热液蚀变过程是往氧逸度降低的方向进行, 即热液越来越具还原性。

3.3 绿泥石的形成机制

形成绿泥石的过程是一个反应动力学控制的水-岩反应的过程, 主要受温度、压力以及水/岩、岩石化学成分和流体性质等因素的制约(张展适等, 2007)。居隆庵矿床围岩蚀变发育, 在早期碱性热液蚀变过程中绿泥石尤其发育。绿泥石呈交代黑云母并呈黑云母假像、呈浸染状交代长石和呈脉状充填, 在显微镜下还可见到成团块状的绿泥石, 并伴随不透明矿物, 这种产状的绿泥石也是由黑云母蚀变而成(张展适等, 2007)。还可见黄铁矿、黄铜矿等硫化物与绿泥石共(伴)生。从绿泥石化学成分可以得知居隆庵矿床主要为含铁较高的蠕绿泥石和铁镁绿泥石, 反映出流体富 Fe 或者流体运移过程中萃取了围岩中 Fe 元素, 主要为后者。Inoue(1995)研究认为在脉状矿床的热液交代蚀变中, 在低氧化、低 pH 值条件下, 易于形成富铁的绿泥石, 而在还原环境更易于形成富铁绿泥石。刘英俊等(1987)研究认为, Fe 的运移介质具有还原性质。综上可知居隆庵矿床早期碱性热液蚀变过程中蚀变矿物绿泥石形成于相对还原环境。张展适等(2007)、王小雨等(2014)、邓林燕(2012)、魏正宇等(2014)对热液形成的绿泥石进行详细研究, 整体上都将绿泥石形成机制划分为两种: 溶解-沉淀机制和溶解-迁移-沉淀机制。本次也将居隆庵矿床绿泥石形成机制划分为这两种。在溶解-沉淀机制中, 主要为黑云母蚀变形成绿泥石并保持黑云母假像, 还有长石表面呈浸染状绿泥石化。溶解-迁移-沉淀机制主要表现为各种沿裂隙分布的绿泥石, 是热液流体在萃取围岩中 Fe、Mg 等元素后经过迁移, 在各种裂隙中沉淀形成脉状绿泥石。

4 绿泥石化与铀成矿关系

研究表明, 绿泥石化与铀成矿关系十分密切。一般而言, 成矿前期绿泥石化主要分布在矿体外围, 由黑云母、角闪石等铁镁硅酸盐矿物蚀变而成, 形成黑云母蚀变型绿泥石(I 型)。在这个过程铁、镁组

分主要来自围岩本身,几乎没有铁镁组分的带入。随着环境的改变,热液流体温度逐渐降低,流体向氧逸度、硫逸度降低的方向演化。流体成分也随之改变,从围岩中萃取的铁镁组分进入流体,在适当的条件下充填形成脉状绿泥石,与此同时,热液流体中含有一定量的铀,随绿泥石的沉淀而富集成矿。虽然碱性热液蚀变过程并非居隆庵铀矿床主要成矿阶段,但该阶段绿泥石化与早期碱性成矿阶段以及后期酸性蚀变成矿阶段(主成矿阶段)的铀矿化具有密切的关系(图3)。概括起来,主要表现在以下几个方面:

(1) 推测铀成矿物理化学条件。本文研究表明绿泥石形成温度介于 $190.5 \sim 269.9^{\circ}\text{C}$ 之间,平均为 224.54°C 。氧逸度平均值为 -43.49 ,硫逸度的平均值为 -3.0 (对数值)。并且不同产状的绿泥石之间,形成的物理化学条件接近。因此居隆庵矿床碱性热液蚀变矿化阶段的物理化学条件属于中低温、低氧逸度、高硫逸度。

(2) 改变了铀的赋存状态。程华汉等(2000)运用裂变径迹法对下庄铀矿床碱交代岩的研究表明,由黑云母蚀变形成的绿泥石不仅继承了原岩中分布于黑云母中的含铀副矿物释放出来的铀,并且通过吸附作用叠加了一部分在黑云母绿泥石化过程释放出来的铀。可以看出绿泥石化过程中,改变了铀在原岩中的赋存状态,促使铀从含铀副矿物释放出来,同时将该过程释放出来的铀进行预富集,为主成矿阶段成矿创造有利条件。

(3) 改变岩石性质。在绿泥石化以及钠长石化、碳酸盐化为主的碱性热液蚀变过程中,热液流体与围岩相互作用,使围岩孔隙度和渗透性大大增加,岩石由原来致密变成疏松。这不仅有助于主成矿阶段酸性热液与围岩的反应,同时疏松的围岩条件也为主成矿阶段铀矿化提供了良好的沉淀环境。

(4) 促使铀的沉淀。结合居隆庵矿床蚀变特征和不同绿泥石温度变化特征,可以得出早期较高温热液流体活动以黑云母反应发生绿泥石化,并保留黑云母假像为特征,在该蚀变过程分布于黑云母内及岩石中的含铀副矿物的铀被释放出来,随着温度降低,热液性质发生变化,陆续形成长石蚀变型和脉型绿泥石化,随着蚀变继续进行,温度进一步降低,形成早期阶段矿化现象。图3中铀矿物与绿泥石紧密共生,说明在碱性热液蚀变阶段铀被活化进入热液中后进行了短距离的迁移后就发生了铀矿化。

5 结论

(1) 根据绿泥石的产出状态,居隆庵铀矿床绿泥石可分为由黑云母蚀变形成的绿泥石、长石蚀变形成的绿泥石、脉状绿泥石和与铀矿密切共生的绿泥石4种类型。

(2) 绿泥石主要为蠕绿泥石和铁镁绿泥石,个别为鲕绿泥石,化学成分 MgO 和 FeO 含量浮动范围比较大;矿床中绿泥石化是多次热液作用的产物,这与在显微镜下观察到的绿泥石脉被碳酸盐切穿、而后又有绿泥石脉叠加在碳酸盐脉之上相一致。

(3) 绿泥石的形成温度介于 $190.5 \sim 269.9^{\circ}\text{C}$ 之间,主要位于 $190.5 \sim 250.0^{\circ}\text{C}$ 之间,属于中低温条件;绿泥石形成机制分为溶解-沉淀机制和溶解-迁移-沉淀机制两种。

(4) 居隆庵矿床碱性热液蚀变矿化阶段的物理化学条件属于中低温、低氧逸度、高硫逸度。居隆庵铀矿床绿泥石化与铀成矿关系十分密切,在绿泥石化过程改变了铀的赋存状态,促使了铀的预富集,同时改变了岩石性质,使围岩孔隙度和渗透性大大增加,岩石由原来致密变成疏松。这不仅有助于后期热液(居隆庵矿床主成矿阶段酸性热液)与围岩的反应,同时疏松的围岩条件也为铀矿化提供了良好的沉淀环境。

References

- Battaglia. 1999. Applying X-ray diffraction geothermometer to chlorite [J]. *Clays and Clay Minerals*, 47(1): 54~63.
- Bevins R E, Robinson D and Rowbotham G. 1991. Compositional variations in mafic phyllosilicates from regional low-grade metabasites and application of the chlorite geothermometer [J]. *Journal Metamorphic Geology*, 9: 711~721.
- 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.
- Caritat P, Hutchison I and Walshe J L. 1993. Chlorite geothermometry: A review [J]. *Clays and Clay Minerals*, 41(2): 219~239.
- Cathelineau M. 1988. Cation site occupancy in chlorites and illite as a function of temperature [J]. *Clay Minerals*, 23: 471~485.
- Cathelineau M and Nieva D. 1985. Achlorite solid solution-

- geothermometer: The Los Azufres(Mexico) geothermal system[J]. Contribution to Mineralogy and Petrology, 91: 235~244.
- Cao Xiaobing, Lü Guxian, Hu Baoqun, *et al.* 2012. The Wall rock alteration and its geochemical characteristics of the Shazhou deposit in Xiangshan uranium ore-field[J]. Journal of Geomechanics, 18(4): 389~400(in Chinese).
- Chen Zhaobo. 1981. "Double mixing" genetic model of uranium deposits in volcanic rocks and relationship between China's Mesozoic vein-type uranium deposits and Pacific tectonics[A]. Metallogenesis of Uranium[C]. Proceeding of the 26th IGC. Beograd: Geoinstitute, 65~97.
- Cheng Huahan, Ma Hanfeng and Xiang Weidong. 2000. Study on changes of existing state of uranium during alkalic metasomatism using fission-track method[J]. Uranium Geology, 16(5): 291~296 (in Chinese).
- Chen Zhengle, Yang Nong, Wang Pingan, *et al.* 2011. Analysis of the tectonic stress field in the Xiangshan uranium ore field, Linchuan area, Jiangxi, China[J]. Geological Bulletin of China, 30(4): 514~531(in Chinese).
- Deng Linyan. 2012. Characteristics and Formation Environment of Chloritization in Shazhou Uranium Deposit[D]. East China University of Technology(in Chinese).
- Deer W A, Howie R A and Jussman J. 1962. Rock-Forming Minerals: Sheet Silicates[M]. London: Longman, 270.
- Fan Honghai, Ling Hongfei, Wang Dezi, *et al.* 2003. Study on metallogenetic mechanism of Xiangshan uranium ore-field[J]. Uranium Geology, 19(4): 208~213(in Chinese).
- 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).
- Guo Jian. 2014. Uranium Mineralization Alteration Effect Research of Scientific Deep Drilling in Xiangshan Uranium Orefield[D]. Beijing Research Institute of Uranium Geology(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.
- Hu Baoqun, Lü Guxian, Sun zhanxue, *et al.* 2011. Mineralization and fracture-water phase transition coupling in the Xiangshan uranium ore field, Jiangxi[J]. Geotectonica et Metallogemica, 35(4): 502~512 (in Chinese).
- Huang Xiqiang. 2008. The Hydrothermal Alteration Characteristics and Physics and Chemistry Condition of Mineralization of Xiangshan Uranium Ore-field in Jiangxi[D]. Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese).
- Jahren J S and Aagaard P. 1989. Compositional variations in diagenetic chlorites and illites, and relationships with formation-water chemistry [J]. Clay Mineral, 24: 157~170.
- Kranidiotis P and MacLean W H. 1987. Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec[J]. Economic Geology, 82: 1898~1991.
- Inoue A. 1995. Formation of clay minerals in hydrothermal environments[A]. Viede B. Origin and Mineralogy of Clays[C]. Berlin: Springer, 268~330.
- Li Renze, Liu Chengdong, Ling Liang, *et al.* 2016. Characteristics and geological significance of chlorite from the Dafushang uranium deposit in Taoshan area, Jiangxi Province[J]. Acta Petrologica et mineralogica, 35(2): 297~305(in Chinese).
- 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).
- Liu Guoqi, Xia Fei, Pan Jiayong, *et al.* 2011. Multivariate statistical analysis based geochemical characteristics of trace elements in the Xiangshan uranium orefield[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology Geochemistry, 30(4): 423~432(in Chinese).
- MacDowell S D and Elders W A. 1980. Authigenic layer silicate minerals in borehole Elmore I. Salton Sea geothermal field, California, USA [J]. Contribution to Mineralogy and Petrology, 74: 293~310.
- Martinez-Serrano R G and Dubois M. 1998. Chemical variations in chlorite at the Los Hornos geothermal system, Mexico[J]. Clays and Clay Minerals, 46(6): 615~628.
- Nieto F. 1997. Chemical composition of metapelitic chlorites: X-ray diffraction and optical property approach[J]. Eur. J. Mineral, 829~841.
- Rausell C J A, Wiewiora A and Matesanz E. 1991. Relation between composition and d001 for chlorite[J]. Am. Mineral, 76: 1373~1379.
- Shao Fei, Fan Heng, Xia Fei, *et al.* 2011. Metallogenic mechanism and geochemical characteristics of porphyry type uranium deposits[J]. Journal of East China University of Technology, 34(4): 308~314 (in Chinese).

- Walshe J L. 1986. A six-component chlorite solid solution model and the conditions of chlorite formation in hydrothermal and geothermal systems[J]. *Econ. Geol.*, 81: 681~703.
- 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).
- Wang Yun, Hu Baoqun, Sun Zhanxue, *et al.* 2012. The geochemical characteristics of alkali metasomatic ore and its ore-forming significance at Zoujiashan deposit, Xiangshan uranium field[J]. *Uranium Geology*, 28(5): 281~289 (in Chinese).
- Wei Zhengyu, Zhang Shuming, Liu Jinzhi, *et al.* 2014. Characteristics and significance of chlorite in the Longshoushan alkali metasomatic type uranium deposit[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(3): 517~526 (in Chinese).
- Wu Bolin and Zhou Lumin. 2006. Metallogenic physical-chemical conditions analysis of Julong'an uranium deposit in Xiangshan ore-field [J]. *Journal of northwest university*, 36(1): 119~124 (in Chinese).
- Wu Rengui, Yu Dagan and Zhang Shuming. 2003. Identification of rhyolite-dacite porphyry and its relation to uranium mineralization at Xiangshan uranium ore-field[J]. *Uranium Geology*, 19(2): 81~87 (in Chinese).
- Wu Zhijian and Hu Zhihua. 2014. Uranium-polymetallic metallogenic characteristics and prospecting direction of Niutoushan uranium deposit in Xiangshan ore-field[J]. *World Nuclear Geoscience*, 31(2): 89~94 (in Chinese).
- Xiao Zhifeng, Ouyang Ziyuan, Lu Huanzhang, *et al.* 1993. The characteristics of chlorites in the wall-rock alteration zone in the Baoban gold field, Hainan island with emphasis on the physicochemical conditions of hydrothermal alteration[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 13(4): 319~324 (in Chinese).
- Xie X G. 1997. Trioctahedral chlorite from the Barberton greenstone belt: crystal structure and rock composition constraints with implications to geothermometry[J]. *Contrib. Mineral Petrol.*, 126: 275~291.
- Xu Haijiang and Lai Shangcong. 1988. Approach to the lithologic features and the origin of the volcanic rocks in Xianshan and its adjacent areas[J]. *Geoscience*, 2(4): 440~450 (in Chinese).
- Yang Chao, Tang Juxing, Song Junlong, *et al.* 2015. Chlorite characteristic of the naruo porphyry Cu (Au) deposit in Tibet and its geological[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(5): 856~872 (in Chinese).
- Yao Hongxin, Lü Guxian, Nie Jiangtao, *et al.* 2013. Characteristics of mineralizing alteration and hydrothermal sources in Zoujiashan uranium deposits in Xiangshan uranium ore field in Jiangxi Province[J]. *Geoscience*, 27(2): 332~338 (in Chinese).
- Yu Qiulian, Zhang Zhanshi and Chen Zhailin. 2014. Characteristic and formation condition of Dabu uranium deposits in Taoshan[J]. *Uranium Geology*, 30(5): 340~344 (in Chinese).
- 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.
- Zhang Wanliang, Liu Changde and Li Ziyang. 2005. Comparative research of lithogeochemistry for Jiulongzhang and Xiangshan volcano-intrusive complexes[J]. *Geoscience*, 19(2): 205~210 (in Chinese).
- Zhang Wei, Zhang Shuting, Cao Huawen, *et al.* 2014. Characteristics of chlorite minerals from Xiaolonghe ti deposit in west Yunnan, China and their geological implication[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 41(3): 318~328 (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 Qiaorong. 1983. Calculation of the Fe^{3+} and Fe^{2+} contents in silicate and Ti-Fe oxide minerals from epma data[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, (1): 55~62 (in Chinese).
- Zheng Zuoping, Chen Fangrong 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).

附中文参考文献

- 曹小兵, 吕古贤, 胡宝群, 等. 2012. 相山矿田沙洲铀矿床围岩蚀变地球化学特征[J]. *地质力学学报*, 18(4): 389~400.
- 程华汉, 马汉峰, 向伟东. 2000. 利用裂变径迹方法研究碱交代作用中铀赋存状态的变化[J]. *铀矿地质*, 16(5): 291~296.
- 陈正乐, 杨农, 王平安, 等. 2011. 江西临川地区相山铀矿田构造应力场分析[J]. *地质通报*, 30(4): 514~531.
- 邓林燕. 2012. 沙洲铀矿床绿泥石化特征及形成环境研究[D]. 东华理工大学.
- 范洪海, 凌洪飞, 王德滋, 等. 2003. 相山铀矿田成矿机理研究[J]. *铀矿地质*, 19(4): 208~213.
- 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.
- 郭建. 2014. 相山铀矿田科学深钻岩石铀矿化蚀变作用研究[D]. 核工业北京地质研究院.
- 胡宝群, 吕古贤, 孙占学, 等. 2011. 江西相山铀矿田中断裂与水相变耦合成矿——以邹家山矿床铀成矿作用分析为例[J]. 大地构造与成矿学, 35(4): 502~512.
- 黄锡强. 2008. 江西相山铀矿田热液蚀变特征及成矿物理化学条件分析[D]. 中国地质科学院.
- 李仁泽, 刘成东, 梁良, 等. 2016. 江西省桃山铀矿田大府上矿床绿泥石特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 35(2): 297~305.
- 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.
- 刘国奇, 夏菲, 潘家永, 等. 2011. 基于多元统计的相山铀矿田微量元素地球化学特征分析[J]. 矿物岩石地球化学通报, 30(4): 423~432.
- 邵飞, 范衡, 夏菲, 等. 2011. 相山矿田斑岩型铀矿床地球化学特征及成矿机制探讨[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 34(4): 308~314.
- 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.
- 王运, 胡宝群, 孙占学, 等. 2012. 相山铀矿田邹家山矿床碱交代型矿石地球化学特征及其成矿意义[J]. 铀矿地质, 28(5): 281~289.
- 魏正宇, 张树明, 刘金枝, 等. 2014. 甘肃龙首山碱交代型铀矿床绿泥石特征及意义[J]. 岩石矿物学杂志, 33(3): 517~526.
- 吴柏林, 周鲁民. 2006. 相山矿田居隆庵铀矿床成矿物理化学条件分析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 36(1): 119~124.
- 吴仁贵, 余达淦, 张树明. 2003. 相山铀矿田流纹英安斑岩的厘定及与铀矿化的关系[J]. 铀矿地质, 19(2): 81~87.
- 吴志坚, 胡志华. 2014. 相山矿田牛头山铀矿床铀-多金属成矿地质特征及找矿方向[J]. 世界核地质科学, 31(2): 89~94.
- 徐海江, 赖少聪. 1988. 相山及邻区七个火山盆地火山岩岩性特征及成因探讨[J]. 现代地质, 2(4): 440~450.
- 肖志峰, 欧阳自远, 卢焕章, 等. 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.
- 杨超, 唐菊兴, 宋俊龙, 等. 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.
- 于秋莲, 张展适, 陈载林. 2014. 桃山大布铀矿床绿泥石特征及其形成环境[J]. 铀矿地质, 30(6): 340~344.
- 姚宏鑫, 吕古贤, 聂江涛. 2013. 江西相山铀矿田邹家山铀矿床蚀变特征及热液来源[J]. 现代地质, 27(2): 332~338.
- 张万良, 刘德长, 李子颖. 2005. 江西九龙岗和相山火山-侵入杂岩岩石地球化学的对比研究[J]. 现代地质, 19(2): 205~210.
- 张伟, 张寿庭, 曹华文, 等. 2014. 滇西小龙河锡矿床中绿泥石矿物特征及其指示意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 41(3): 318~328.
- 张展适, 华仁民, 季俊峰, 等. 2007. 201和306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.
- 郑巧荣. 1983. 由电子探针分析值计算 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} [D]. 矿物学报, (1): 55~62.
- 郑作平, 陈繁荣, 于学元. 1997. 八卦庙金矿床的绿泥石特征及成岩成矿意义[J]. 矿物学报, 17(1): 100~106.