

doi: 10.12029/gc20200206

潘春蓉, 牟平, 钟福军, 黄广文, 李海东, 潘家永. 2020. 南岭中段黄沙铀矿区绿泥石成因及其与铀成矿关系[J]. 中国地质, 47(2): 348–361.  
Pan Chunrong, Mou Ping, Zhong Fujun, Huang Guangwen, Li Haidong, Pan Jiayong. 2020. Genesis of chlorite in the Huangsha uranium deposit, middle part of Nanling Mountains and its relationship with uranium mineralization[J]. Geology in China, 47(2): 348–361(in Chinese with English abstract).

## 南岭中段黄沙铀矿区绿泥石成因及其与铀成矿关系

潘春蓉<sup>1</sup>, 牟平<sup>1</sup>, 钟福军<sup>1</sup>, 黄广文<sup>1</sup>, 李海东<sup>2</sup>, 潘家永<sup>1</sup>

(1. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 核工业 290 研究所, 广东 韶关 512026)

**摘要:** 绿泥石化是南岭中段黄沙铀矿区中广泛发育的热液蚀变类型。在岩相学的基础上, 通过电子探针分析技术研究了铀区内 221、223 铀矿床绿泥石的矿物共生组合类型与形貌特征, 划分了绿泥石的化学类型, 提出该矿区绿泥石的 4 种产出状态, 探讨了绿泥石的形成温度和形成环境, 讨论了绿泥石的形成机制及其与铀成矿的关系。研究结果显示该矿区绿泥石: (1) 在形貌特征上, 矿前期绿泥石主要呈黑云母假象或星点状、团块状产出, 成矿期绿泥石主要呈脉状产出; (2) 在成因类型上, 绿泥石主要有黑云母蚀变型、长石蚀变型、裂隙充填型和与铀矿共生型 4 种类型; (3) 绿泥石的形成温度为 200~310℃, 其中与铀矿物共生型绿泥石的平均形成温度为 215℃, 属于中低温热液矿床范围; (4) 绿泥石主要形成于还原环境, 形成机制主要有溶解-沉淀和溶解-迁移-沉淀两种。

**关键词:** 黄沙铀矿区; 绿泥石; 成因类型; 矿产勘查工程; 南岭中段

中图分类号: P595 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2020)02-0348-14

## Genesis of chlorite in the Huangsha uranium deposit, middle part of Nanling Mountains and its relationship with uranium mineralization

PAN Chunrong<sup>1</sup>, MOU Ping<sup>1</sup>, ZHONG Fujun<sup>1</sup>, HUANG Guangwen<sup>1</sup>, LI Haidong<sup>2</sup>, PAN Jiayong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 2. No. 290 Institute, CNNC, Shaoguan 512026, Guangdong, China)

**Abstract:** Chloritization is a type of hydrothermal alteration widely developed in the Huangsha uranium deposit in the middle part of the Nanling Mountains. Based on petrographic studies, the authors investigated the types and morphological characteristics of chlorite minerals in No. 221 and No. 223 uranium deposits by using electron microprobe analysis, and classified chemical types of chlorite. Four kinds of chlorite production status were recognized, and the temperature and environment of the formation of chlorite as well as the relationship between chlorite formation and uranium mineralization was discussed. The results are as follows: (1) The early chlorite was mainly of biotite pseudomorph or starlike shape characterized by mass output, and the metallogenic chlorite was mainly produced in the vein. (2) There are four types of genesis i.e., chlorite biotite alteration, feldspar alteration, fracture filling type and uranium deposit association. (3) The chlorite-forming temperature was 200–310℃, and the average formation temperature

收稿日期: 2018-01-07; 改回日期: 2019-06-08

基金项目: 中国地质调查局项目(1212011085395)、国家自然科学基金项目(U1403292)和江西省研究生创新项目(YC2016-B074)联合资助。

作者简介: 潘春蓉, 女, 1992年生, 硕士生, 主要从事铀矿地质科研工作; E-mail: 184799613@qq.com。

通讯作者: 潘家永, 男, 1967年生, 博士, 教授, 主要从事铀矿床学教学与科研工作; E-mail: jypan@ecit.cn。

of chlorite coexisting with uranium minerals was 215 °C, suggesting a middle–low temperature hydrothermal deposit. (4) Chlorite was mainly formed in a reductive environment, and the formation mechanism was dissolution–precipitation and dissolution–migration–precipitation.

**Key words:** Huangsha uranium ore district; chlorite; genetic type; mineral exploration engineering; middle part of Nanling Mountains

**About the first author:** PAN Chunrong, female, born in 1992, master candidate, mainly engages in the study of uranium geology; E-mail: 184799613@qq.com.

**About the corresponding author:** PAN Jiayong, male, born in 1967, professor, mainly engages in the teaching and study of uranium geology; E-mail: jypan@ecit.cn.

**Fund support:** Supported by China Geological Survey Program (No. 1212011085395), National Nature Science Fund of China (No. U1403292) and the Innovation Project for Graduate Students of Jiangxi Province (No. YC2016–B074).

## 1 引言

绿泥石是热液蚀变、中—低温变质作用、成岩作用和沉积作用过程中的常见矿物(Deer et al., 1962; Xie et al., 1997)。国内外众多学者对绿泥石的化学成分及其形成的物理化学条件、矿物共生组合、形成机制及其环境等方面做了大量详细的研究,并建立了一系列的研究模型(MacDowell et al., 1980; Cathelineau et al., 1985, 1988; Kranidiotis et al., 1987; Bryndzia et al., 1987; Bevins et al., 1991; Battaglia, 1999)。如 Cathelineau et al.(1988)在研究墨西哥 Los Azufres 和 Salton Sea 地热系统中绿泥石的成分–温度之间的关系时,发现绿泥石中的  $Al^{IV}$  和温度之间形成正相关关系,提出了绿泥石固溶体地质温度计; Raused–Colom et al.(1991) 提出,后经 Nieto(1997) 修改的计算公式  $d_{001}(0.1nm) = 14.3390.115n(Al^{IV}) - 0.0201n(Fe^{2+})$  来计算面网间距  $d_{001}$  值; Battaglia(1999) 提出了  $d_{001}$  与温度之间的关系方程  $t/°C = (14.379 - d_{001}(0.1nm))/0.001$ , 计算绿泥石的形成温度; Bryndzia et al.(1987) 通过实验得出了绿泥石的成分与氧逸度、硫逸度之间的关系。国内学者对矿床热液蚀变过程中黏土矿物的形成条件进行了较为系统的研究,如艾永福等(1998)对内蒙古大井矿床中的绿泥石进行了研究,提出了可用绿泥石的含铁度,即  $Fe/(Fe+Mg+Mn+Ca)$  来作为矿床不同金属组合的标志; 华仁民等(2003)对金山金矿和银山多金属矿床中黏土矿物的形成条件及其水–岩作用过程进行了研究,计算了绿泥石的形成温度和流体形成的氧逸度。在热液铀矿床的研究方面,张展适等(2007)、郭国林等(2012)、李仁泽等(2016)分

别对 201、302 和大府上铀矿床中的绿泥石特征进行了研究,得到了绿泥石的形成温度,提出了绿泥石的形成机制,并且讨论了绿泥石化与铀成矿的关系。

绿泥石化是黄沙铀区内铀矿床主要的热液蚀变类型之一,是铀成矿前和成矿作用过程中重要的热液蚀变类型。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该铀矿区矿床的成因,并可为该区下一步的找矿工作提供重要的理论依据。因此,本文采集了黄沙铀矿区良伞寨(221)铀矿床和鹅公塘(223)铀矿床中不同产状和成因的绿泥石化岩石与矿石样品,在岩矿鉴定的基础上,采用电子探针分析技术研究绿泥石的化学成分和结构特征,根据绿泥石的产状、化学成分特点、形成的物理化学条件等特征探讨绿泥石化与铀成矿的关系。

## 2 地质背景

南岭成矿带是中国花岗岩型铀矿床的重要产出带。在大地构造位置上,位于华夏古陆西南缘,处于闽、赣后加里东隆起之上,毗邻湘、桂、粤北海西印支拗陷带(商朋强等, 2012),是构造、岩浆、多金属成矿作用长期活动的地区。该区地壳演化经历了加里东、海西—印支、燕山、喜山4个构造旋回,总体上为活动→稳定→活动的演化过程(黄国龙等, 2006; 李锦铁, 2009)。其岩浆活动形成的岩石以花岗岩为主。南岭成矿带内多数大型复式岩体为产铀岩体,如诸广山、贵东、桃园、青嶂山、大东山、骑田岭等岩体(付建明等, 2004; 张万良等, 2018)。这些岩体的共同特征是主体花岗岩均属陆壳重熔型花岗岩,岩石类型多属黑云母花岗岩或二长花岗岩→二云母花岗岩的演化系列。均为含铀背景比较高

的花岗岩,岩石化学成分多具强过铝(或过铝)、富硅、富碱(钾)、低钙、低暗色组分,富集U、REE 稀土、W-Sn-Bi-Mo 等亲石元素,这些花岗岩是铀矿床最重要的铀源岩。

黄沙铀矿区位于南岭铀成矿带中段,221、223 铀矿床产于黄沙铀矿区内,是分布在青嶂山岩体南部的花岗岩型铀矿床。区内构造十分发育,主要表现为断裂和断陷两种形式(图1)。断裂构造主要呈EW向、NNE向展布,NWW向断裂也较发育,但规模较小;EW向断裂是区内发育规模最大、活动时间最长的一组断裂,以黄沙断裂和上竹坑断裂为代

表,横贯全区,它们是竹山—镇岗褶皱带的组成部分,黄沙断裂和上竹坑断裂两者联合组成黄沙断陷带,控制了黄沙铀矿区的展布;NNE向断裂构造的规模也较大,以良伞寨断裂、下村断裂、F53与F55 断裂为代表。F53与F55及良伞寨与下村断裂,分别组成了鹅公塘断陷带与下村断陷带,控制了区内矿床的分布,良伞寨断裂是斜贯全区先扭后压的主导断裂,形成了以蚀变破碎带为主的断裂带;NW向断裂同铀矿化关系极为密切,基本上控制了区内矿体的展布。当中基性岩脉(特别是闪斜煌斑岩)有成矿期的硅质脉充填、叠加或同近EW向、NEE向蚀

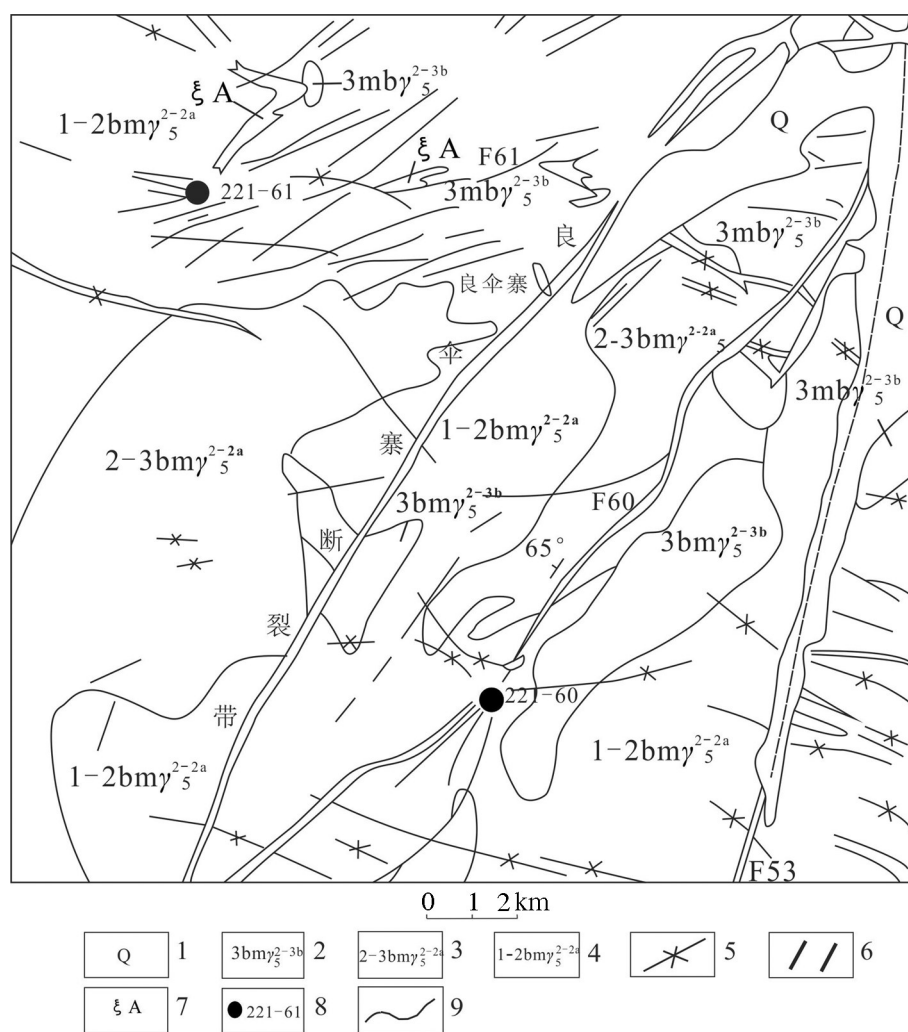


图1 黄沙铀矿区地质简图(底图据杜乐天,1982)

1—第四系;2—细粒二云母花岗岩;3—中细粒二云母花岗岩;4—粗中粒二云母花岗岩;5—中基性岩脉;  
6—硅化、蚀变构造带;7—碱交代岩;8—矿带及编号;9—地质界线

Fig.1 Geological map of the Huangsha uranium ore district (after Du,1982)

1—Quaternary; 2—Fine-grained two mica granite; 3—Medium-fine grained two mica granite; 4—Coarse-grained two mica granite; 5—Intermediate-basic dikes; 6—Silicified, tectonic alteration zone; 7—Alkaline metasomatic rock; 8—Ore belt and its serial number; 9—Geological boundary



变破碎带、硅化带重接、斜接、反接时,往往铀矿化变好,或有较大的工业矿体产出,NW向的中基性脉岩同NW向的硅化破碎带重接部位也有较好的铀矿化或矿体产出,NW向的硅化破碎带单独出现时,也可形成规模小、变化大的矿体(杜乐天,1982)。

矿区内铀矿床主要产于燕山早期中粗粒黑云母花岗岩和燕山晚期中细粒二云母花岗岩中,严格受构造破碎蚀变带控制。该矿区内铀矿体一般呈脉状、群脉状产出,单个矿体呈透镜状、团块状或不规则状。矿石结构构造较简单,主要呈浸染状、细脉状等。铀矿物主要有沥青铀矿和晶质铀矿;次生矿物有铀黑、脂铅铀矿、硅钙铀矿、钙铀云母等,呈集合体产于矿石的颗粒间和裂隙中。脉石矿物主要有石英、玉髓、萤石、方解石、高岭土等。金属矿物有黄铁矿、赤铁矿,少量方铅矿、黄铜矿等。围岩蚀变主要有碱交代、白云母化、绿泥石化、碳酸盐化、绢云母化、赤铁矿化、硅化等,局部可见萤石化、黄铁矿化,它们相互叠加,一般很少单独出现。其中碱交代、绿泥石化、碳酸盐化、赤铁矿化、萤石化与铀成矿关系最为密切,在碱性热液构造蚀变带中,绿泥石化与赤铁矿化同时发育,有时还伴有碳酸盐化,在酸性热液构造蚀变带中,绿泥石化往往与硅化、萤石化、水云母化同时存在。前期的碱性蚀变使富铀花岗岩中的黑云母矿物中惰性铀活化成活性铀,同时使岩石由于受到热液蚀变作用,使其物理性质发生了改变——抗压降低,孔隙度增加,渗透性增强等(章邦桐,1994;张成江等,1996);后期叠加的酸性热液蚀变使铀从 $U^{6+}$ 还原成 $U^{4+}$ 而沉淀流体中的铀酰被进一步还原,由 $U^{6+}$ 变成 $U^{4+}$ ,并发生沉淀,形成以四价铀为主的铀矿物。

### 3 分析方法

野外采集了矿区内2个典型铀矿床中不同产状和成因的绿泥石样品,并对样品进行了详细的镜下岩相学观察和电子探针分析。

绿泥石的微区化学成分分析在东华理工大学核资源与环境国家重点实验室完成,测试仪器型号为JXA-8100型电子探针仪,测试条件为:加速电压15.0 kV,电流2.0 nA,束斑直径为2  $\mu\text{m}$ 。测试过程按照硅酸盐矿物电子探针定量分析国家标准(GB/T 15617-2002)进行。标准样品为SPI 53个矿物标

样(编号为SPI#02753-AB)。其中镁、铁、铝、硅等4种元素采用绿泥石作为标样,以钾长石、硬玉、磷灰石、金红石、氧化铬和蔷薇辉石分别作为钾、钠、钙、钛、铬、锰等元素标样。所有绿泥石特征值是采用28个氧原子为标准的结构式计算。由于电子探针不能检测矿物中 $Fe^{3+}$ 的含量,因此,在绿泥石的离子计算当中,常把 $Fe^{2+}$ 当作铁离子来计算。由于绿泥石颗粒相对细小、结构较为复杂,以及其内部时常含有其他矿物包裹体,因此,在进行电子探针定量分析其化学成分时会出现微小偏差。据此Foster(1962)、Hiller et al.(1991)和Zang et al.(1995)提出的 $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO})$ 可以用来判断绿泥石的成分是否存在混染的标准指标,如果 $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO}) > 0.5\%$ ,则被认为成分存在混染。

## 4 分析结果

### 4.1 绿泥石产状

镜下观察,绿泥石常呈叶片状、鳞片状,集合体往往呈蠕虫状及放射状。铀矿区内绿泥石主要以黑云母蚀变型、长石蚀变型、裂隙充填型以及与铀矿物共生型四种形态产出。黑云母蚀变型绿泥石在铀矿区内分布最广,属于黑云母退变成因,是黑云母在固体状态下的次生蚀变,常部分或完全交代黑云母而呈黑云母假象(图2a、b),与绿泥石共生的矿物常见黑云母、石英、钾长石,此外还有锆石、磷灰石等副矿物;长石蚀变型绿泥石与长石关系密切,长石在早期较高温度的流体中晶出,随后晚期热液交代长石形成长石蚀变型绿泥石,绿泥石一般呈星点状、蠕虫状分布于长石颗粒中(图2c、d),绿泥石矿物颗粒较小且破碎,与绿泥石共生的矿物常见石英、锆石以及黄铁矿等矿物;裂隙充填型绿泥石常呈脉状充填于长石、石英裂隙中,或叠加于石英脉之上(图2e、f),裂隙充填型绿泥石可能是由后期热液流体沉淀充填而形成,可见绿泥石化与硅化、萤石化共生;与铀矿物共生型绿泥石颗粒细小,常与沥青铀矿共生(图2g、h),常伴生碳酸盐、萤石、锆石、磷灰石及稀土矿物。

### 4.2 绿泥石化学成分特征

对上述不同产状的绿泥石进行电子探针微区化学成分分析(表1)。从表中结果可看出绿泥石的各成分之间的含量:  $\text{SiO}_2$ 变化于20.08%~27.86%,

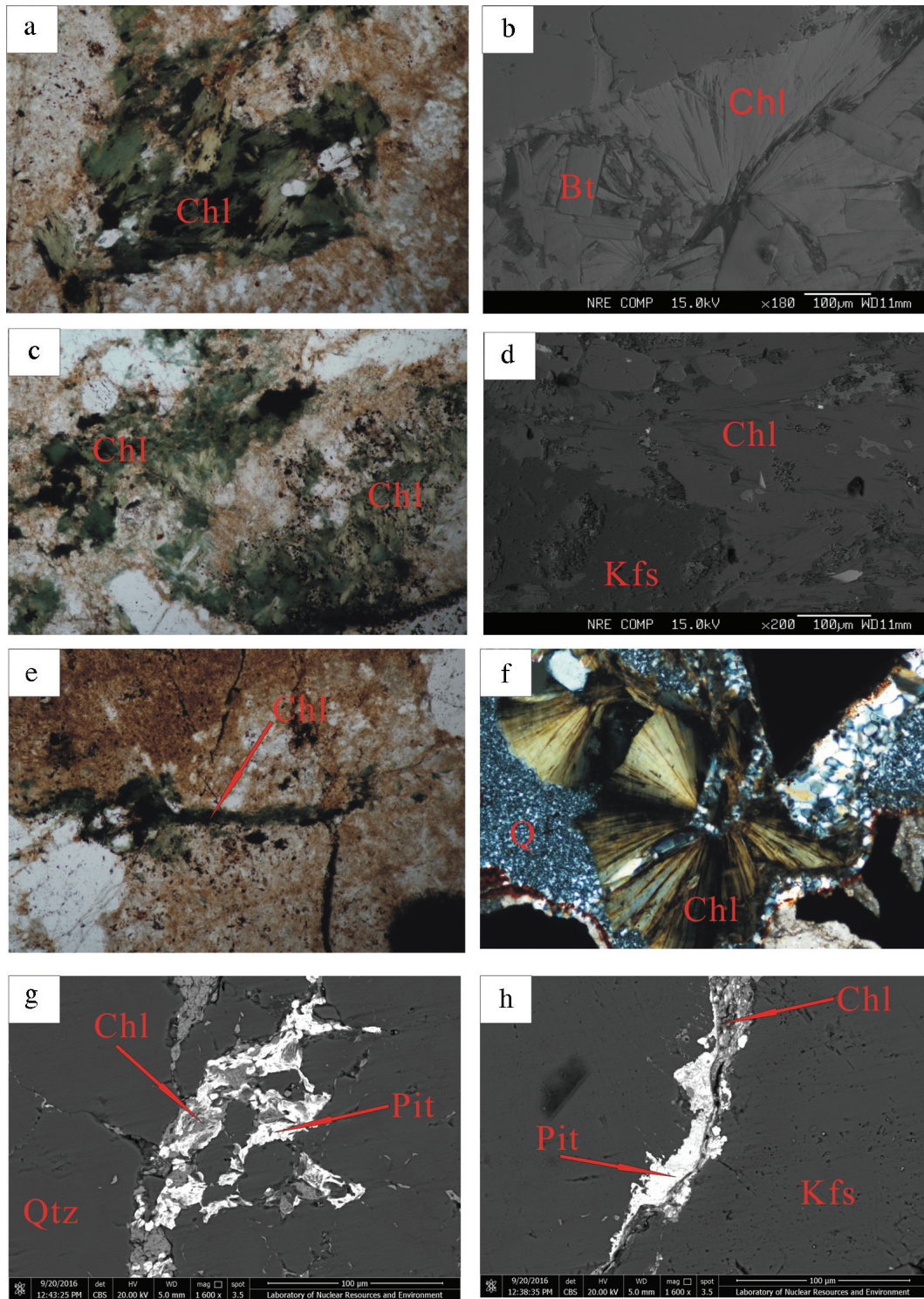


图2 黄沙铀矿区绿泥石镜下特征

a、b—黑云母蚀变型绿泥石,保留黑云母假象;c、d—长石蚀变型绿泥石,呈星点状、蠕虫状分布于长石中;e、f—裂隙充填型绿泥石,充填于长石、石英裂隙中,或叠加于石英脉之上;g、h—与铀矿物密切共生型绿泥石;Chl—绿泥石;Qtz(Q)—石英;Kfs—钾长石;Pit—沥青铀矿

Fig. 2 Microscopic features of chlorites in the Huangsha uranium ore district

a, b—Chlorite subjected to biotite alteration; c, d—Chlorite subjected to feldspar alteration showing a star-like, worm-like distribution in feldspar; e, f—Chlorite of fissure fillin type, chlorites filled in feldspar, quartz fissure, or superimposed on the quartz veins; g, h—Chlorite associated closely with uranium minerals; Chl—Chlorite; Qtz(Q)—Quartz; Kfs—K-feldspar; Pit—Pitchblende



平均为 24.27%;  $Al_2O_3$  变化于 16.98%~21.53%, 平均为 19.49%;  $FeO$  变化于 14.73%~38.53%, 平均为 28.37%;  $MgO$  变化于 5.29%~22.50%, 平均为 12.12%。整体来看  $FeO$  和  $MgO$  的含量波动较大,  $Fe$  和  $Mg$  往往出现此消彼长的现象, 反映了它们在绿泥石晶格中的相互置换。不同蚀变类型的绿泥石在化学成分上也有较为明显的差异, 总体而言, 相对于与铀矿物共生型绿泥石, 黑云母蚀变型、长石蚀变型、裂隙充填型绿泥石以富  $Fe$ , 贫  $Si$ 、 $Mg$  为特征; 而与铀矿物共生型绿泥石主要表现为富  $Si$ 、 $Mg$ , 相对贫  $Fe$  的特征。与铀矿物共生型绿泥石在化学成分上所表现出的这种差异与热液流体的成分变化有直接关系, 在构造作用下, 热液流体与围岩发生水-岩反应, 使得碎裂蚀变花岗岩中的铀从含矿原岩中活化解离出来, 随热液流体迁移, 在扩容带中沉淀。同时也反映了在成矿作用过程中前者形成与相对富  $Fe$ 、贫  $Mg$ 、贫  $Si$  流体有关, 后者形成与相对富  $Mg$ 、富  $Si$ 、贫  $Fe$  流体有关。

在对黄沙铀区内典型铀矿床中不同蚀变类型的绿泥石的分类和命名上, 采用  $Fe-Si$  图解来对绿泥石进行分类和命名(Deer, 1962)。从绿泥石的  $Fe-Si$  图解(图3)中可以看出: 鹅公塘(223)铀矿床中绿泥石的种类多样, 主要有蠕绿泥石、密绿泥石、假鳞绿泥石以及铁镁绿泥石, 其中裂隙充填型和与铀矿物共生型绿泥石主要为蠕绿泥石和密绿泥石, 而黑云母蚀变型和长石蚀变型绿泥石可能因受流体作用, 成分变化大, 主要有蠕绿泥石、假鳞绿泥石以

及少量铁镁绿泥石; 良伞寨(221)铀矿床中绿泥石类型主要有蠕绿泥石、假鳞绿泥石、鲕绿泥石以及铁镁绿泥石, 其中黑云母蚀变型绿泥石因流体作用, 绿泥石类型多样, 主要有蠕绿泥石、假鳞绿泥石以及鲕绿泥石, 长石蚀变型和裂隙充填型主要为蠕绿泥石, 与铀矿物共生型绿泥石为铁镁绿泥石, 反映了该矿床形成于还原环境(Inoue, 1995)。总体来看, 黄沙铀区内与铀矿物共生的绿泥石主要有蠕绿泥石、密绿泥石以及铁镁绿泥石。

### 4.3 绿泥石的原岩判别

$n(Mg)/n(Fe+Mg)-n(Al)/n(Al+Mg+Fe)$  的关系图解, 已被广泛用于判别绿泥石与其母岩的关系(Laird, 1998)。一般情况下, 由泥质岩蚀变形成的绿泥石其  $n(Al)/n(Al+Mg+Fe)$  比值都大于 0.35, 但是由铁镁质岩石转化而形成的绿泥石其  $n(Al)/n(Al+Mg+Fe)$  比值则明显小于 0.35。由表 2 可知, 黄沙铀区内鹅公塘矿床(223)绿泥石的  $n(Al)/n(Al+Mg+Fe)$  比值介于 0.32~0.37, 其中大部分黑云母蚀变型和长石蚀变型绿泥石的  $n(Al)/n(Al+Mg+Fe)$  比值大于 0.35, 仅个别数据小于 0.35, 说明鹅公塘矿床内黑云母蚀变型和长石蚀变型绿泥石的原岩为泥质岩, 可能受到了铁镁质流体的影响; 而裂隙充填型绿泥石和与铀矿物共生型绿泥石的  $n(Al)/n(Al+Mg+Fe)$  比值除个别测点外, 均小于 0.35, 说明这两种绿泥石的原岩为铁镁质岩, 这与该矿床内伴有大量幔源富铁镁质基性岩脉的贯入现象相吻合。良伞寨铀矿床(221)不同蚀变类型绿泥石的  $n(Al)/n(Al+Mg+$

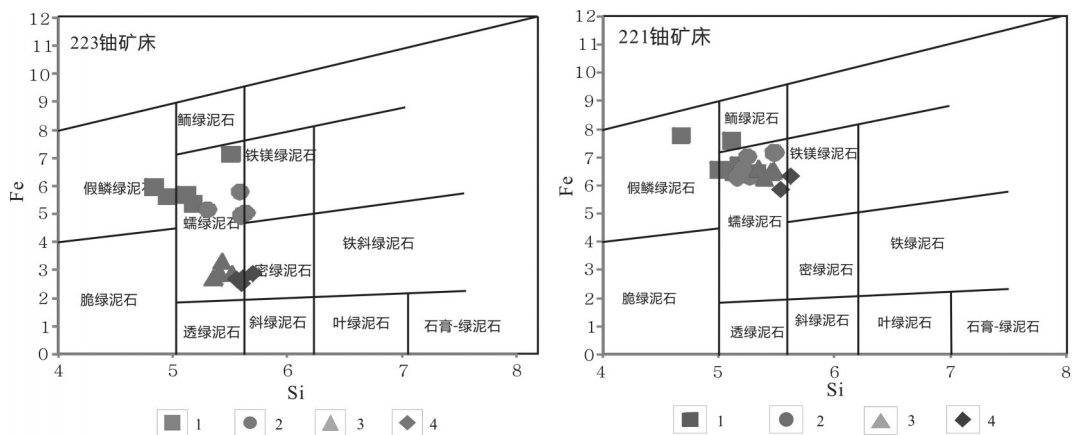


图3 黄沙铀矿区 221、223 铀矿床绿泥石分类图解(底图据 Deer et al., 1962)

1—黑云母蚀变型绿泥石; 2—长石蚀变型绿泥石; 3—裂隙充填型绿泥石; 4—与铀矿物共生型绿泥石

Fig. 3 Classification of chlorites from No. 221, No. 223 uranium deposit in the Huangsha uranium ore district (after Deer et al., 1962)

1—Chlorite subjected to biotite alteration; 2—Chlorite subjected to feldspar alteration; 3—Chlorite of fissure filling type; 4—Chlorite associated closely with uranium minerals

表1 黄沙铀矿区221、223铀矿床中绿泥石的电子探针化学成分(%)

Table 1 EPMA analyses of chlorite from No. 221, No. 223 uranium deposit in the Huangsha uranium ore district (%)

类型	样品编号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	NiO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Total
I	LSZ96-2-17	23.48	0.06	20.59	33.96	1.31	-	0.02	-	6.75	-	0.07	86.33
	LSZ96-2-18	22.05	0.09	21.28	33.92	1.37	0.07	0.04	-	7.43	0.10	0.09	86.45
	LSZ98-5	22.19	0.18	19.57	38.53	1.19	0.07	0.11	-	5.29	-	0.18	87.19
	LSZ98-6	20.08	0.02	20.84	37.89	1.19	-	0.06	0.03	5.80	0.02	0.02	85.95
	LSZ98-13	22.81	0.08	20.06	34.81	1.14	-	0.04	-	7.64	0.04	0.09	86.82
	LSZ98-14	22.76	0.07	20.33	33.53	1.13	0.04	0.08	0.02	8.47	-	0.07	86.51
	EGT52.6	21.18	0.04	20.59	29.63	0.74	0.05	-	0.02	11.26	-	0.08	83.70
	EGT52.7	23.08	0.01	20.74	29.63	0.67	0.01	0.12	0.02	11.31	0.02	-	85.94
	EGT52.13	22.45	0.02	20.62	29.82	0.62	0.07	0.11	-	11.77	-	0.09	86.23
	EGT52.14	23.50	0.04	16.98	35.69	0.58	0.07	0.12	0.01	7.53	-	-	84.68
	EGT61.2	23.25	0.11	19.41	27.98	0.32	0.08	0.04	0.05	13.06	-	0.03	84.54
II	LSZ98-11	23.51	0.03	19.70	34.17	1.30	-	-	-	8.54	-	0.03	87.33
	LSZ98-12	23.50	0.01	20.10	33.22	1.12	-	0.02	-	8.80	0.05	0.01	87.03
	LSZ98A	23.28	0.13	17.24	35.90	0.96	0.01	0.06	0.03	6.74	-	0.13	84.65
	LSZ98B	23.32	0.07	20.33	34.63	1.18	0.03	0.08	0.03	7.94	0.05	0.07	88.00
	LSZ98-3	22.62	0.21	19.16	35.71	1.17	-	0.09	-	6.37	-	0.21	85.60
	LSZ98-4	22.91	0.22	20.12	32.72	1.07	0.06	0.04	0.05	8.84	0.02	0.22	86.26
	EGT52.19	24.75	0.13	17.12	30.13	0.42	0.21	0.01	0.04	11.69	0.04	0.18	84.73
	EGT52.20	25.93	0.11	19.98	27.55	0.30	0.06	0.06	-	12.75	0.13	0.08	87.27
	EGT61.8	24.27	0.15	20.75	28.04	0.48	0.09	-	-	12.25	0.03	0.18	86.26
	EGT61.10	26.04	0.52	19.55	27.68	0.48	0.03	0.05	0.40	11.42	-	0.10	86.30
	III	LSZ98-10	24.10	0.10	18.85	34.29	0.98	0.10	0.10	0.03	7.69	-	0.10
LSZ98-15		23.73	-	18.90	32.64	1.26	-	-	-	9.13	0.04	-	85.88
LSZ96-2-16		23.21	0.07	19.95	34.14	1.52	0.10	0.13	-	6.17	-	0.07	85.56
LSZ98-8		24.19	0.06	19.32	34.32	1.11	0.08	0.04	-	7.67	0.05	0.06	87.28
EGT62.6		26.30	-	18.38	16.76	0.83	0.16	0.01	-	20.39	-	0.07	84.53
EGT62.13		26.51	0.02	19.36	16.32	0.91	0.05	0.01	0.01	21.43	0.04	0.08	85.15
EGT62.16		27.02	-	18.62	15.36	0.89	-	0.01	-	21.77	-	0.09	84.67
EGT62.22		26.31	-	18.62	15.85	0.81	0.10	0.09	0.01	21.32	0.01	0.01	84.76
IV	LSZ98-7	25.12	0.14	19.27	31.59	0.84	0.02	0.12	0.08	9.76	0.06	0.14	87.38
	LSZ98-9	24.38	0.14	18.05	32.63	1.00	0.06	0.19	0.12	7.56	0.06	0.14	84.53
	EGT62.5	27.07	0.04	18.98	15.51	0.59	0.05	-	0.01	22.26	-	0.05	84.74
	EGT62.14	27.86	-	19.81	14.73	0.68	0.11	0.01	0.02	22.21	-	0.06	86.23
	EGT62.17	27.18	0.03	19.36	16.32	0.72	0.06	0.09	0.04	20.09	-	-	84.22
	EGT62.18	26.85	0.06	19.16	15.19	0.67	0.02	0.01	0.03	22.50	-	0.01	84.68

注:I—黑云母蚀变型绿泥石;II—长石蚀变型绿泥石;III—裂隙充填型绿泥石;IV—与铀矿物共生型绿泥石;“-”表示低于检出限。

Fe)比值在0.34~0.39,平均为0.36,除个别点外,均大于0.35,说明该矿床内不同蚀变型绿泥石的原岩均为泥质岩,也可能受到了铁镁质流体的影响。在 $n(\text{Mg})/n(\text{Fe}+\text{Mg})-n(\text{Al})/n(\text{Al}+\text{Mg}+\text{Fe})$ 的关系图解上(图4),鹅公塘矿床(223)和良伞寨矿床(221)的 $n(\text{Mg})/n(\text{Fe}+\text{Mg})$ 与 $n(\text{Al})/n(\text{Al}+\text{Mg}+\text{Fe})$ 图解均呈正相关关系,反映了黄沙铀矿区内不同成因和产状的绿泥石绝大部分原岩为泥质岩,与华南地区花岗岩的成因类型为S型花岗岩的源岩特征相符合,即花

岗岩是由泥质沉积岩经历角闪岩相至麻粒岩相变质作用,然后又经历不同程度部分熔融所形成的(方清浩等,1987;赵希林等,2012);少数绿泥石原岩为铁镁质岩,可能是由于铀矿区内伴有的晚期幔源富铁镁质基性岩脉贯入造成的。

#### 4.4 绿泥石主要阳离子间的相关性

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

前人研究表明,可用绿泥石的 $\text{Al}^{\text{IV}}$ 、 $\text{Al}^{\text{VI}}$ 值及

表2 黄沙铀矿区221、223铀矿床绿泥石的电子探针特征值

Table 2 Characteristic values of electron microprobe analysis of chlorite from No. 221, No. 223 uranium deposit in the Huangsha uranium ore district

类型	样品编号	Si	Ti	Al	TFe	Mn	Mg	Ca	Na	K	Al <sup>IV</sup>	Al <sup>VI</sup>	Fe/(Fe+Mg)	Mg/ (Fe+Mg)	nAl/ (Al+Fe+Mg)	d <sub>001</sub> /0.1 nm	t/°C	
		W <sub>B</sub> /%											n/mol					
I	LSZ96-2-17	5.33	0.01	5.52	6.44	0.25	2.28	-	0.01	-	2.67	2.85	0.74	0.25	0.39	14.12	258	
	LSZ96-2-18	5.01	0.02	5.72	6.54	0.26	2.52	0.02	0.03	-	2.99	2.73	0.72	0.28	0.39	14.10	278	
	LSZ98-5	5.11	0.03	5.35	7.58	0.23	1.82	0.02	0.10	-	2.89	2.46	0.81	0.19	0.36	14.10	283	
	LSZ98-6	4.68	-	5.80	7.75	0.23	2.02	-	0.05	0.02	3.32	2.48	0.79	0.21	0.37	14.07	310	
	LSZ98-13	5.18	0.01	5.39	6.70	0.22	2.59	-	0.03	-	2.82	2.57	0.72	0.28	0.37	14.11	270	
	LSZ98-14	5.14	0.01	5.44	6.45	0.22	2.85	0.01	0.07	0.01	2.86	2.58	0.69	0.31	0.37	14.11	270	
	EGT52.6	4.84	0.01	5.61	5.95	0.14	3.84	0.01	-	0.01	3.16	2.45	0.61	0.39	0.36	14.1	282	
	EGT52.7	5.12	-	5.46	5.67	0.13	3.74	-	0.11	0.01	2.88	2.58	0.60	0.40	0.37	14.12	263	
	EGT52.13	4.95	-	5.42	5.60	0.12	3.87	0.02	0.09	-	3.05	2.37	0.59	0.41	0.36	14.11	273	
	EGT52.14	5.51	0.01	4.72	7.12	0.12	2.63	0.02	0.11	0.01	2.49	2.22	0.73	0.27	0.33	14.12	256	
II	EGT61.2	5.18	0.02	5.14	5.35	0.06	4.34	0.02	0.04	0.03	2.82	2.32	0.55	0.45	0.35	14.12	256	
	LSZ98-12	5.28	-	5.32	6.29	0.21	2.94	-	0.01	-	2.72	2.60	0.68	0.32	0.37	14.12	260	
	LSZ98A	5.49	0.02	4.81	7.15	0.19	2.37	-	0.06	0.02	2.51	2.29	0.75	0.25	0.34	14.12	257	
	LSZ98B	5.21	0.01	5.38	6.56	0.22	2.65	0.01	0.07	0.02	2.79	2.59	0.71	0.29	0.37	14.11	267	
	LSZ98-3	5.26	0.04	5.26	7.00	0.23	2.21	-	0.08	-	2.74	2.52	0.76	0.24	0.36	14.11	269	
	LSZ98-4	5.17	0.04	5.37	6.26	0.20	2.98	0.02	0.03	0.03	2.83	2.54	0.68	0.32	0.37	14.11	266	
	EGT52.19	5.59	0.02	4.58	5.77	0.08	3.94	0.05	0.01	0.02	5.77	2.40	0.59	0.41	0.32	14.14	237	
	EGT52.20	5.60	0.02	5.05	4.91	0.05	4.05	0.01	0.05	-	4.91	2.47	0.55	0.45	0.36	14.15	230	
	EGT61.8	5.31	0.02	5.35	5.13	0.09	4.00	0.02	-	-	2.69	2.66	0.56	0.44	0.37	14.13	247	
	EGT61.10	5.64	0.09	5.02	5.01	0.09	3.69	0.01	0.04	0.22	2.36	2.66	0.58	0.42	0.37	14.15	224	
III	LSZ98-10	5.48	0.02	5.06	6.52	0.19	2.61	0.02	0.09	0.02	2.52	2.54	0.71	0.29	0.36	14.13	251	
	LSZ98-15	5.40	-	5.07	6.26	0.24	3.09	-	-	-	2.60	2.47	0.67	0.33	0.35	14.13	253	
	LSZ96-2-16	5.35	0.01	5.43	6.58	0.30	2.12	0.02	0.12	-	2.65	2.78	0.76	0.24	0.38	14.12	258	
	LSZ98-8	5.46	0.01	5.14	6.47	0.21	2.58	0.02	0.03	-	2.54	2.60	0.71	0.29	0.36	14.13	252	
	EGT62.6	5.41	-	4.56	2.88	0.14	6.25	0.04	0.01	-	2.59	1.97	0.32	0.68	0.33	14.16	215	
	EGT62.13	5.52	-	4.76	2.85	0.16	6.65	0.01	-	-	2.48	2.28	0.30	0.70	0.33	14.17	212	
	EGT62.16	5.43	0.01	5.19	3.31	0.11	5.66	0.01	0.02	-	2.57	2.62	0.37	0.63	0.37	14.16	220	
	EGT62.22	5.36	-	4.58	2.70	0.14	6.48	0.02	0.07	0.01	2.64	1.95	0.29	0.71	0.33	14.16	217	
	IV	LSZ98-7	5.54	0.02	5.03	5.83	0.16	3.21	0.01	0.10	0.05	2.46	2.57	0.64	0.36	0.35	14.14	240
		LSZ98-9	5.63	0.02	4.93	6.30	0.20	2.60	0.02	0.17	0.07	2.37	2.56	0.71	0.29	0.35	14.14	239
EGT62.5		5.62	0.01	4.65	2.70	0.10	6.89	0.01	-	0.01	2.38	2.27	0.28	0.72	0.33	14.17	205	
EGT62.14		5.61	-	4.75	2.48	0.12	6.67	0.02	0.01	0.01	2.39	2.36	0.27	0.73	0.34	14.18	201	
EGT62.17		5.56	-	4.57	2.64	0.16	6.68	-	-	-	2.44	2.13	0.28	0.72	0.33	14.17	206	
EGT62.18		5.70	0.01	4.80	2.84	0.13	6.29	0.01	0.07	0.02	2.30	2.51	0.31	0.69	0.34	14.18	200	

注:I—黑云母蚀变型绿泥石;II—母长石蚀变型绿泥石;III—变裂隙充填型绿泥石;IV—充与铀矿物共生型绿泥石;“-”表示低于检出限。

(Fe+Al<sup>VI</sup>)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 et al.(1997)研究认为,当绿泥石中四面体位置上的替代关系为完全的钙镁闪石型替代时,绿泥石的n(Al<sup>IV</sup>)与n(Al<sup>VI</sup>)之间具有接近1:1的线性关系。由表2可知,黄沙

铀矿区内,221和223铀矿床中绿泥石的n(Al<sup>IV</sup>)值介于2.37~4.91,n(Al<sup>VI</sup>)值介于1.95~2.85;除个别测点,大部分测点的n(Al<sup>IV</sup>)值高于n(Al<sup>VI</sup>)值;Al<sup>IV</sup>/Al<sup>VI</sup>比值介于0.92~1.35,变化浮动范围较窄。从n(Al<sup>IV</sup>)-n(Al<sup>VI</sup>)图解中可知(图5b),黄沙铀矿区内221和223



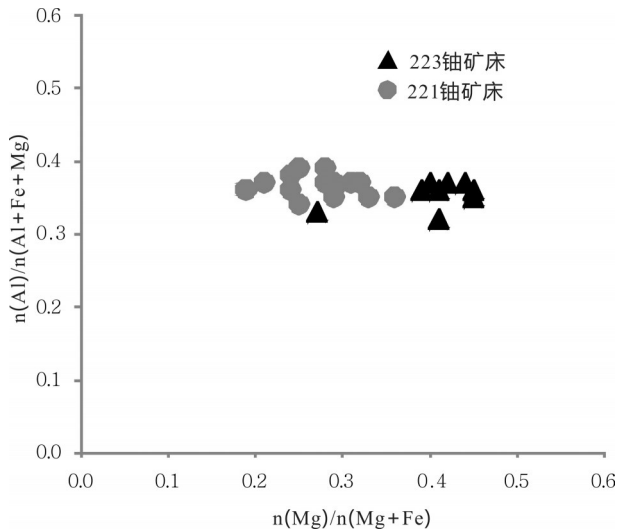


图4 黄沙铀矿区221、223铀矿床绿泥石原岩判别图解(据 Laird,1998)

Fig. 4 Source rock discrimination diagram of chlorite from the No.221, No. 223 uranium deposit in the Huangsha uranium ore district(after Laird,1998)

铀矿床的 $n(\text{Al}^{\text{IV}})$ 与 $n(\text{Al}^{\text{VI}})$ 呈现弱的负相关性,且它们并不是呈现1:1的线性关系,这说明了该铀矿区内绿泥石的四面体位置并不是单纯的钙镁闪石型替代。由于绿泥石中四面体位置上的 $\text{Al}^{\text{IV}}$ 在晶体结构中主要是替代 $\text{Si}^{4+}$ ,为了达到电荷平衡,需要 $\text{Al}^{\text{IV}}$ 在八面体位置上替代Fe或Mg(华仁民等,2003),绿泥石中 $\text{Al}^{\text{IV}}$ 值普遍高于 $\text{Al}^{\text{VI}}$ 的值,反映出 $\text{Al}^{\text{VI}}$ 对八面体位置上的Fe和Mg的置换要高于四面体位置上 $\text{Al}^{\text{IV}}$ 对 $\text{Si}^{4+}$ 的置换。

从 $\text{Al}^{\text{IV}}-\text{Fe}/\text{Fe}+\text{Mg}$ 和 $\text{Al}^{\text{IV}}-\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ 图解中可以看出(图5c、d), $\text{Al}^{\text{IV}}$ 与 $\text{Mg}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ 呈一定的负相关关系,而 $\text{Al}^{\text{IV}}$ 与 $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ 呈一定的正相关关系。这反映了随着四面体位置上 $\text{Al}^{\text{IV}}$ 对硅替换的同时,八面体位置上铁对镁也进行了替换,使得Fe的含量在增加Mg的含量在降低,并且Fe在对Mg置换的过程中,导致绿泥石内部结构产生变动,反过来又促进了 $\text{Al}^{\text{IV}}$ 对Si的置换(Xie et al.,1997)。

Xie et al.(1997)研究显示,  $(\text{Fe}+\text{Al}^{\text{VI}})-\text{Mg}$ 关系图解可以反映出绿泥石的八面体位置上的替换关系。在黄沙铀矿区绿泥石的 $(\text{Al}^{\text{VI}}+\text{Fe})-\text{Mg}$ 图解上(图5a),可以看出绿泥石的投点显示出很好的线性负相关关系。这说明了在绿泥石八面体位置上主要被这三种元素占据,并且在该位置上 $\text{Al}^{\text{VI}}$ 和Fe都

可以替换Mg。

#### 4.4.2 主要阳离子与镁的关系图解

据Xie et al.(1997)研究表明,绿泥石中主要阳离子与镁的关系图解可以反映出原岩所经历的热液蚀变作用过程,只经历过一次热液蚀变作用形成的绿泥石,其主要阳离子与镁离子具有良好的线性关系。从黄沙铀矿区的绿泥石中主要阳离子与镁的关系图解中可以看出(图6): $\text{Si}-\text{Mg}$ (图6a)图解中显示弱的正相关性,具有弱的线性关系, $\text{Fe}-\text{Mg}$ (图6b)和 $\text{Al}^{\text{IV}}-\text{Mg}$ (图6c)图解呈现负相关性,但相关性也不是那么明显,而 $\text{Mg}-\text{Al}^{\text{VI}}$ (图6d)明显没有相关性,这反映了矿区内绿泥石是多期次热液活动的产物。

## 5 讨 论

### 5.1 绿泥石形成温度及环境

绿泥石形成于中低温、中低压的环境。因其结构上具有很大的可变性,并且在成分上也具有非计量性,因此绿泥石的成分和结构变化与其形成温度之间具有一定的联系(Cathelineau et al., 1985, 1988; Walshe, 1986; Decaritat et al., 1993; Zang and Fyfe, 1995; Battaglia,1999)。

本文运用 Rused-Colom et al.(1991)提出,后经 Nieto(1997)修改的计算公式 $d_{001}(0.1\text{nm}) = 14.339 - 0.115n(\text{Al}^{\text{IV}}) - 0.0201n(\text{Fe}^{2+})$ 来计算面网间距 $d_{001}$ 值,然后再根据 Battaglia(1999)提出的 $d_{001}$ 与温度之间的关系方程 $t/^{\circ}\text{C} = (14.379 - d_{001}(0.1\text{nm}))/0.001$ 计算出绿泥石的形成温度。由表2可知,良伞寨矿床(221)绿泥石的形成温度介于239~310 $^{\circ}\text{C}$ ,平均为264 $^{\circ}\text{C}$ ,鹅公塘矿床(223)绿泥石的形成温度介于200~282 $^{\circ}\text{C}$ ,平均232 $^{\circ}\text{C}$ 。总体来看,黄沙铀矿区内黑云母蚀变型绿泥石形成温度的平均值为273 $^{\circ}\text{C}$ ,长石蚀变型与裂隙充填型绿泥石形成温度的平均值分别为251 $^{\circ}\text{C}$ 、231 $^{\circ}\text{C}$ ,而与铀矿物共生型绿泥石形成温度平均值为215 $^{\circ}\text{C}$ ,属于中低温热液矿床范围。由上述结果可知,自矿前期形成的黑云母蚀变型绿泥石、长石蚀变型绿泥石、裂隙充填型绿泥石至成矿期形成的与铀矿物共生型绿泥石,绿泥石形成温度具有下降趋势。

此外, Bryndiza and Steven(1997)研究表明,绿泥石的 $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ 值的变化与系统的氧逸度有关,系统越还原,绿泥石的 $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ 值越大由表2可

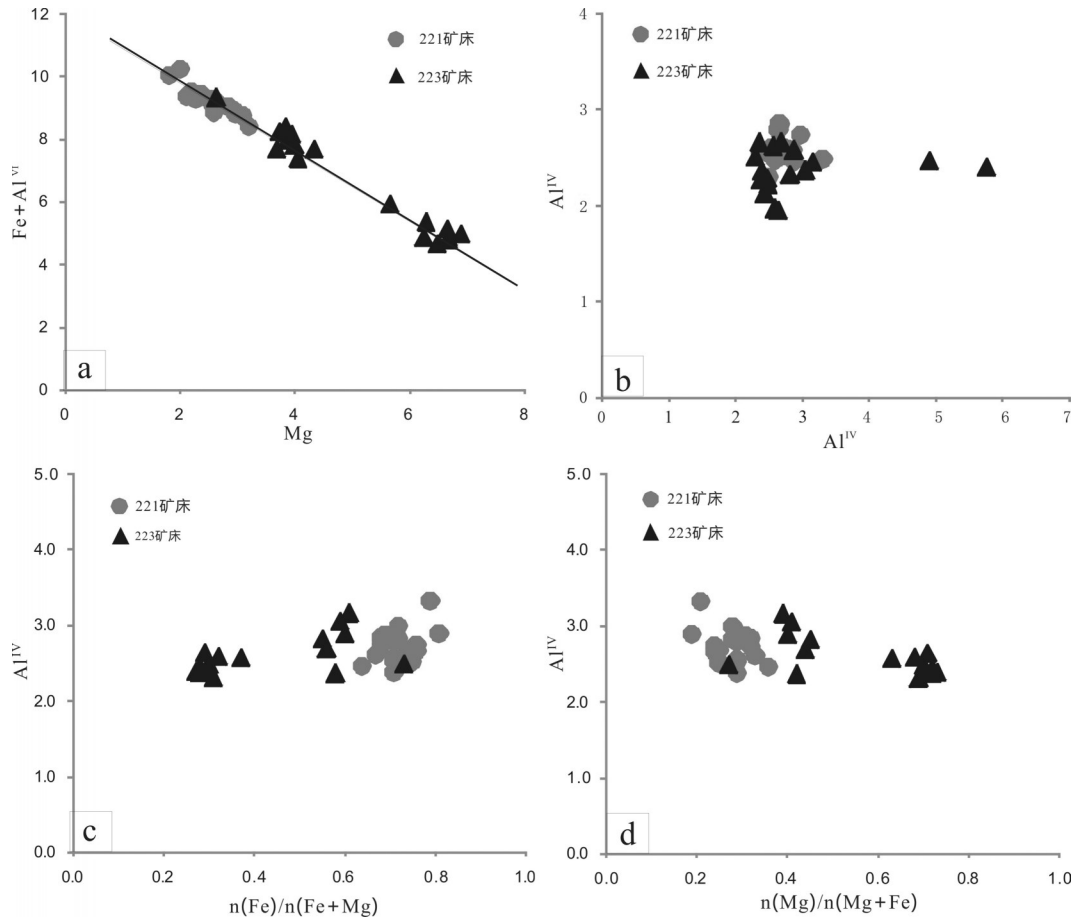


图5 黄沙铀矿区221、223铀矿床绿泥石中离子的相关性图解

Fig. 5 The ion correlation diagram of chlorite from No.221, No. 223 uranium deposit in the Huangsha uranium ore district

知,黄沙铀矿区内铀矿床中绿泥石的  $Fe/(Fe+Mg)$  值 0.27~0.81, 平均值为 0.58, 指示其形成时热液流体具有还原性质。Inoue(1995)认为,脉状矿床热液蚀变中,在低 pH 值、低氧化的条件下,有利于形成富镁绿泥石,而还原环境有利于形成铁绿泥石。前文已述及,黄沙铀矿区内 221、223 铀矿床中绿泥石的类型大多数为富铁的蠕绿泥石及铁镁绿泥石,表明其形成于还原环境。

绿泥石中  $Fe^{2+}$  和  $Mg^{2+}$  形成广泛的类质同象替代。若  $Fe^{2+}$  取代  $Mg^{2+}$ , 表征其形成于相对酸性环境,反之,  $Mg^{2+}$  取代  $Fe^{2+}$ , 则表征相对碱性环境(刘英俊等, 1987; 艾永福等, 1998)。黄沙铀矿区内铀矿床矿前期形成的黑云母蚀变型绿泥石、长石蚀变型绿泥石、裂隙充填型绿泥石多表现为  $Mg^{2+}$  取代铁,而成矿期形成的与铀矿区共生型绿泥石多表现为  $Fe^{2+}$  取代  $Mg^{2+}$ , 这表明铀成矿过程中热液流体随着温度不断下降,其性质向酸性方向演化。

## 5.2 绿泥石形成机制及其与铀成矿关系

绿泥石化是黄沙铀矿区内广泛发育的热液蚀变类型。绿泥石的形成过程是一个反应动力学控制的水-岩反应的过程,该过程主要受温度、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)。张展适等(2007)、张玉燕等(2011)、王小雨等(2014)、魏正宇等(2014)、李仁泽等(2016)对热液蚀变形成的绿泥石进行过详细研究,整体上都将绿泥石的形成机制划分为两种:溶解-沉淀机制和溶解-迁移-沉淀机制。本文结合显微镜和电子探针背散射图下观察到的绿泥石与其他矿物共生组合关系,以及绿泥石形成的温度,也将黄沙铀矿区内绿泥石的形成机制划分为溶解-沉淀和溶解-迁移-沉淀两种机制。在溶解-沉淀机制中,黑云母蚀变型、长石蚀变型绿泥石是在这种机制下形成的,主要表现为热液流体在岩石运移的过程中,交代了黑云母(图 2a、b)、长石(图 2c、d)

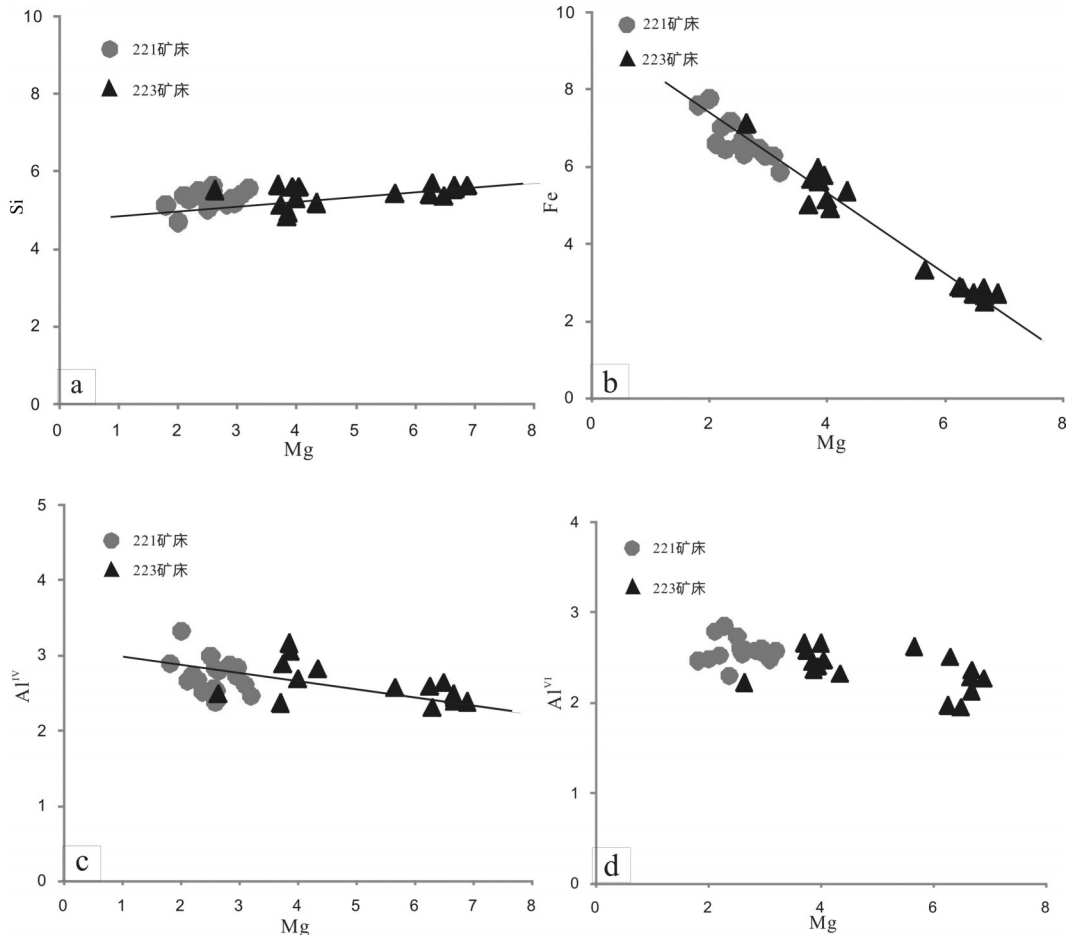


图6 黄沙铀矿区221、223铀矿床绿泥石主要阳离子与镁的关系图解

Fig. 6 The relationship between the major cations and magnesium of chlorite from No.221, No. 223 uranium deposit in the Huangsha uranium ore district

等矿物,在被交代的矿物原地形成绿泥石,并展现出交代蚀变的特征或呈现假象的交代结构现象;溶解-迁移-沉淀机制主要表现为各种沿裂隙分布的绿泥石(图2e、f),是热液流体在萃取了围岩中的铁、镁等元素后,迁移了一段距离,在各种裂隙中沉淀形成脉状绿泥石。

综合前文分析,并结合前人对绿泥石化与铀成矿关系的结果(胡受奚等,1982;章邦桐等,1994;程华汉等,2000;张展适等,2007;魏晋庭,2009;陈其平,2010;郭国林等,2012;李仁泽等,2016),可大致推断黄沙铀区内绿泥石化与铀成矿的关系有以下几点:

(1)改变岩石的物理化学性质:产铀花岗岩体在发生绿泥石化、白云母化、碱交代等热液蚀变的过程中,热液与围岩发生反应,使得岩石的物理化

学性质发生转变,由质地坚硬转变为疏松易碎,岩石的孔隙度、渗透性大大增加。

(2)提供铀成矿所需的环境:绿泥石形成相对还原的环境,在氧逸度和硫逸度都低情况下,使富铀热液中的 $U^{6+}$ 被还原成 $U^{4+}$ 沉淀下来,表明绿泥石的形成能够为铀成矿提供所需的还原环境。

(3)促使铀的活化:富铀岩体能否形成铀矿床的关键在于赋存于副矿物中的惰性铀能否在热液蚀变过程中被活化出来,成为活性铀;黑云母蚀变成绿泥石的过程中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(程华汉,2000)。绿泥石化热液蚀变导致了岩体中铀的赋存状态的改变,致使含铀副矿物中的惰性铀转化成了活性铀。



(4)促使铀的沉淀:前文研究表明,黄沙铀矿区内主要的绿泥石为富Fe的蠕绿泥石和铁镁绿泥石,表明了矿区内铀矿床形成于相对酸性的还原环境,当富铀热液遇到这种相对酸性的还原环境时,原有的物理化学平衡遭到破坏,流体中的铀酰被进一步还原,由 $U^{6+}$ 变成 $U^{4+}$ ,并发生沉淀,形成以四价铀为主的铀矿物(魏晋庭等,2009;郭国林等,2012)。

(5)与铀矿物共生型绿泥石受矿区内辉绿岩脉热液蚀变的影响。绿泥石与沥青铀矿紧密共生,暗示铀矿物的沉淀与辉绿岩脉叠加断裂活动时发生的热液蚀变有关。黄沙铀矿区内发育规模不等的北西向辉绿岩脉和北东向硅化断裂带,而铀矿化仅产于少数辉绿岩脉与硅化破碎带的交汇部位。铀矿化地段广泛发育强烈的绿泥石化、赤铁矿化、硅化以及碱交代蚀变,而未发现铀矿化的地段热液蚀变规模小,蚀变程度低。铀矿化与成矿期的脉状绿泥石化、赤铁矿化和硅化关系密切,北西向基性岩脉与北东向硅化带交汇部位的脉状绿泥石化、赤铁矿化和硅化的叠加区可作为该铀矿区重要的找矿标志之一。

## 6 结 论

黄沙铀矿区内绿泥石主要有黑云母蚀变型、长石蚀变型、裂隙充填型及与铀矿物共生型四种,黑云母蚀变型绿泥石在铀矿区内分布最广,常部分或完全交代黑云母而呈黑云母假象;长石蚀变型绿泥石由后期热液交代早期晶出的长石形成,一般呈星点状、蠕虫状分布于长石颗粒中,绿泥石矿物颗粒较小;裂隙充填型绿泥石常呈脉状充填于长石、石英裂隙中,或叠加与石英脉之上,裂隙充填型绿泥石可能是由后期热液流体沉淀充填而形成;与铀矿物共生型绿泥石颗粒细小,常与沥青铀矿、碳酸盐、萤石、锆石、磷灰石等矿物共生。

绿泥石的化学特征表明,该矿区的绿泥石类型主要有蠕绿泥石、假鳞绿泥石、铁镁绿泥石,与铀成矿密切相关的绿泥石为富铁的蠕绿泥石和铁绿泥石;绿泥石的形成温度为 $200\sim 310^{\circ}\text{C}$ ,其中与铀矿物共生型绿泥石的平均形成温度为 $215^{\circ}\text{C}$ ,指示其形成于中低温的还原环境;绿泥石的形成机制主要为溶解-沉淀和溶解-迁移-沉淀两种,黑云母蚀变型、长石蚀变型绿泥石是在溶解-沉淀机制下形成

的,而裂隙充填型、与铀矿物共生型绿泥石是在溶解-迁移-沉淀机制下形成。

绿泥石化改变了岩石的物理化学性质,提供了铀成矿所需的环境、铀源,并且促使了铀的活化、迁移和沉淀。绿泥石化可作为一种重要的找矿标志,对加强黄沙铀矿区内铀矿床的成因认识以及指导下一步找矿方向具有重要的理论意义和现实意义。

## References

- Ai Yongfu, Liu Guoping. 1998. The study chlorite at Dajing deposit in Inner-Mogolia of China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis(Natural Science Edition),34(1): 97-105 (in Chinese with English abstract).
- Battaglia.1999. Applying X-ray diffraction geothermometer to chlorite[J].Clays and Clay Minerals,47(1):54-63.
- Bevins R E, Robinson D, 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, 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.
- Cathelineau M.1988. Catio site occupancy in chlorites and illite as a function of temperature[J]. Clay Minerals,23:471-485.
- Cathelineau M, Nieva D. 1985. A chlorite solid solution geothermometer: The LosAzufres(Mexico) geothermal system[J]. Contribution to Mineralogy and Petrology,91:235-244.
- Chen Qiping. 2010. Discussion on the relationship between uranium mineralization belt sodium metasomatism and uranium mineralization in the north margin of North Qilian, Gansu[J]. Gansu Science and Technology, 26(17): 33-36(in Chinese with English abstract).
- Cheng Huahan, Ma Hanfeng, 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 with English abstract).
- Decaritat P, Hutchion I, Walshe J L. 1993. Chlorite geothermometry: A review[J]. Clays and Clay Minerals, 40: 470-479.
- Deer W A, Howie R A, Iussman J. 1962. Rock-Forming Minerals: Sheet Silicates[M]. London: Longman, 270.
- Du L T. 1982. Granite Type Uranium Deposit Collection[M]. Beijing: Atomic Energy Press.
- Fang Qinghao, Feng Junchu, He Lingyi. 1987. The s-type granite suite in Darongshan Guangxi provinde[J]. Acta Petrologica Sinica, (3):23-34, 100 (in Chinese with English abstract).
- Foster M D. 1962. Interpretation of the composition and classification for the chlorite [J]. US Geology Survey Prof Paper,414A: 33.

- Fu Jianming, Ma Changqian, Xie Caifu, Zhang Yeming, Peng Sunbo. 2004. Zircon SHRIMP dating of the Cailing granite on the eastern margin of the Qitianling granite, Hunan South China, and its significance[J]. *Geology in China*, 31(1):96–100 (in Chinese with English abstract).
- Guo Guolin, Liu Chengdong, Pan Jiayong, Zhang Zhanshi, Li Xingbin. 2012. Character of chlorite and its relationship to uranium mineralization in uranium deposit No.302[J]. *Uranium Geology*, 28(1): 35–41 (in Chinese with English abstract).
- Hiller S, Velde B. 1991. Octahedral occupancy and the chemical composition of diagenetic (low-temperature) chlorite[J]. *Clay Minerals*, 26: 149–168.
- Hu Shouxi, Zhou Shunxi, Ren Qijiang, Sun Mingzhi. 1982. Theoretical basis of alkali metasomatic metallogenic model and its metallogenic mechanism[J]. *Geology and Exploration*, (1): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Hua Rengming, Li Xiaofeng, Zhang Kaiping, Ji Junfeng, Zhang Wenlan. 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 with English abstract).
- Huang Guolong, Wu Lieqing, Deng Ping, Zhu Ba, Zhang Yanchun. 2006. Analysis of geological setting of uranium mineralization in Jiuquling area, Hunan[J]. *Uranium Geology*, 22(5): 267–275 + 280 (in Chinese with English abstract).
- Inoue A. 1995. Formation of clay minerals in hydrothermal environments[C]// *Veide Origin and Mineralogy of Clays*. Berlin: Springer, 268–30.
- Laird J. 1998. Chlorites: Metamorphic petrology[C]// *Bailey S W. Hydrous Phyllosilicates*. *Reviews in Mineralogy*, 9: 405–453.
- Li Jinyi. 2009. Cycles and Stages of Geological History of China Mainland[J]. *Geology in China*, 36(3): 504–527 (in Chinese with English abstract).
- Li Renze, Liu Chengdong, Liangliang, Kong Ming, Wan Bing, Wan Jianjun. 2016. Characteristics and geological significance of chlorite from the Dafushang uranium deposit in Taoshan area, Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(2): 297–305 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaofeng, Hua Renming, Ji Junfeng, Lu Jianjun, Liu Shengxiangxian, Liu Lianwen. 2002. Origin of illite and its relation with ore-forming fluids in yinshan polymetallic deposit, Dexing, Jiangxi Province[J]. *Chinese Journal of Geology*, 37(1): 86–95 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yingjun, Cao Liming. 1987. Introduction to Elemental Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 124–128 (in Chinese with English abstract).
- MacDowell S D, Elders W A. 1980. Authigenic layer silicate minerals in borehole Elmore ISalton Sea geothermal field, California, USA[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 74: 293–310.
- Martinez-Serrano R G, Dubois M. 1998. Chemical variations in chlorite at the Los Humeros geothermal system, Mexico[J]. *Clays and Clay Minerals*, 46(6): 615–628.
- Niteo F. 1997. Chemical composition of matapelitic chlorites: X-ray diffraction and optical property approach[J]. *Eur. J. Mineral.*, 8: 829–841.
- Raused-Colom J A, Wiewiora A, Matesanz E. 1991. Relation between composition and d001 for chlorite[J]. *Am. Mineral.*, 76: 1373–1379.
- Shang Pengqiang, Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Zhang Guoquan, Tian Jianji. 2012. Sr, Nd and Pb isotopic geochemistry of gangue minerals in the Xiazhuang uranium orefield, northern Guangdong Province[J]. *Geology in China*, 39(6): 1847–1856 (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]. *Econ. Geol.*, 81: 681–703.
- Wang Xiaoyu, Mao Jingwen, Chen Yanbo, Zhang Xinkang, Liu Peng, Liu Shihua, Fang Si. 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).
- Wei Jinting, Chen Qiping, An Guobao. 2009. Discussion about the relationship between sodium metasomatism and uranium mineralization in uranium metallogenic belt on north edge of middle section of Northern Qilianshan[J]. *Mineral Resources and Geology*, 23(1): 36–41 (in Chinese with English abstract).
- Wei Zhengyu, Zhang Shuming, Liu Jinzhi, Chen Yunjie, Fu Chengming, Zhang Liang. 2014. Characteristics and significance of chlorite in the Longshoushan alkalimetasomatic type uranium deposit[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(3): 517–526 (in Chinese with English abstract).
- Xie X G, Gary R. Byerly Ray E. Ferrell Jr. 1997. II b trioctahedral chlorite from the Barberton greenstone belt: Crystal structure and rock composition constraints with implications to geothermometry[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 126: 275–291.
- Zang W, Fyfe W S. 1995. Chloritization of the hydrothermally altered bedrock at the Igarape Bahia gold deposit, Carajas, Brazil[J]. *Mineral Deposita*, 30: 30–38 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Bangtong. 1994. Geochemical evidence for uranium mobilization and migration in granites from South China[J]. *Geochimica*, 23(2): 161–167 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chengjiang. 1996. The genesis of uranium and non-uranium bearing granites from several complexes in South China and their relationship to uranium mineralization[J]. *Journal of Chengdu Institute of Technology*, 23(4): 33–40 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wanliang, Gao Mengqi, Lü Chuan, Huang Chao, Huang Di, Xie Zhicong. 2018. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and its geological significance in Lujing area of Hunan and Jiangxi

- border[J]. Geological Survey and Research, 41(3):161-166,175.
- Zhao Xiling, Liu Kai, Mao Jianren, Ye Haimin. 2012. Metallogenesis of two types of late early Yanshanian granitoids in South China: Case studies of south Jiangxi and southwest Fujian[J]. Geology in China, 39(4):871-886(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuyan, Li Yuying, Cao Shousun. 2011. Alteration zone and its geochemical characteristics of Julongan uranium deposit[J]. Uranium Geology, 27(2): 95-102(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhanshi, Hua Renming, Ji Junfeng, Zhang Yanchun, Guo Guolin, Yin Zhenping. 2007. Characteristics and formation conditions of chlorite in No.201 and No.306 uranium deposit[J]. Acta Mineralogica Sinica, 27(2): 161-172(in Chinese with English abstract).
- 李锦轶. 2009. 中国大陆地质历史的旋回与阶段[J]. 中国地质, 36(3): 504-527.
- 李仁泽, 刘成东, 梁良, 孔明, 王冰, 万建军. 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]. 矿物岩石学杂志, 27(2): 297-305.
- 李晓峰, 华仁民, 季俊峰, 陆建军, 刘盛祥, 刘连文. 2002. 江西银山多金属矿床伊利石的形成与流体成矿作用的初步研究[J]. 地质科学, 37(1): 86-95.
- 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.
- 商朋强, 胡瑞忠, 毕献武, 张国全, 田建吉. 2012. 粤北下庄铀矿田脉石矿物 Sr、Nd、Pb 同位素地球化学研究[J]. 中国地质, 39(6):1847-1856.
- 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.
- 魏晋庭, 陈其平, 安国堡. 2009. 北祁连中段北缘铀成矿带钠交代与铀成矿关系探讨[J]. 矿产与地质, 23(1): 36-41.
- 魏正宇, 张树明, 刘金枝, 陈云杰, 傅成铭, 张良. 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.
- 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, 23(2):161-167.
- 张成江. 1996. 华南几个杂岩体中产铀与非产铀花岗岩的成因及其与铀成矿关系[J]. 成都理工学院学报, 23(4):33-40.
- 张万良, 高梦奇, 吕川, 黄超, 黄迪, 谢智聪. 2018. 湘赣边境鹿井地区花岗岩斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及意义[J]. 地质调查与研究, 41(3):161-166,175.
- 赵希林, 刘凯, 毛建仁, 叶海敏. 2012. 华南燕山早期晚阶段两类花岗岩质岩体与成矿作用:以赣南—闽西南地区为例[J]. 中国地质, 39(4):871-886.
- 张玉燕, 李子颖, 曹寿孙. 2011. 居隆庵铀矿床蚀变分带及其地球化学特征[J]. 铀矿地质, 27(2): 95-102.
- 张展适, 华仁民, 季俊峰, 张彦春, 郭国林, 尹征平. 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.
- 艾永福, 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
- 陈其平. 2010. 甘肃北祁连中段北缘铀成矿带钠交代与铀成矿关系探讨[J]. 甘肃科技, 26(17): 33-36.
- 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.
- 杜乐天. 1982. 花岗岩型铀矿床文集[M]. 北京: 原子能出版社.
- 方清浩, 冯君储, 何令仪. 1987. 广西大容山 S-型花岗岩套[J]. 岩石学报, (3):23-34,100.
- 付建明, 马昌前, 谢才富, 张业明, 彭松柏. 2004. 湖南骑田岭岩体东缘菜岭岩体的锆石 SHRIMP 定年及其意义[J]. 中国地质, 31(1):96-100.
- 郭国林, 刘晓东, 潘家永, 张展适, 李兴斌. 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.
- 胡受溪, 周顺元, 任启江, 孙明志. 1982. 碱交代成矿模式及其成矿机制的理论基础[J]. 地质与勘探, (1): 1-6.
- 华仁民, 李晓峰, 张开平, 季峻峰, 张文兰. 2003. 金山金矿热液蚀变黏土矿物特征及水—岩反应环境研究[J]. 矿物学报, 23(1): 23-30.
- 黄国龙, 吴烈勤, 邓平, 朱捌, 张彦春. 2006. 粤北花岗岩型铀矿找矿潜力及找矿方向[J]. 铀矿地质, 22(5):267-275,280.

### 附中文参考文献