

甘肃龙首山碱交代型铀矿床绿泥石特征及意义

魏正宇¹, 张树明^{1,2}, 刘金枝², 陈云杰³, 傅成铭³, 张 良¹

(1. 东华理工大学 核资源与环境省部共建国家重点实验室培育基地, 江西 南昌 330013; 2. 东华理工大学 放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室, 江西 南昌 330013; 3. 核工业 203 研究所, 陕西 咸阳 712000)

摘 要: 绿泥石化是龙首山铀矿床重要的蚀变类型之一。通过对龙首山碱交代型铀矿床的绿泥石等蚀变矿物进行的岩相学和电子探针成分分析研究, 确定了龙首山地区绿泥石的化学类型主要为铁镁绿泥石, 少数为蠕绿泥石。依据绿泥石成因或与共生矿物的关系, 绿泥石可被划分为黑云母蚀变型、长石蚀变型、沥青铀矿共生型和副矿物共生型等 4 种类型。泥质岩是本区绿泥石的主要原岩类型, 是多期次地质作用形成的产物。研究认为, 龙首山地区碱交代型铀矿床的成矿过程可表述为矿前期在相对较高温度的热液流体作用下, 黑云母发生绿泥石化蚀变, 随后热液继续交代长石, 形成长石蚀变型绿泥石, 进而在成矿期热液温度相对较低的条件下形成与沥青铀矿紧密共生的绿泥石。绿泥石在铀成矿过程中不但活化了花岗岩里的铀, 而且还给铀矿化供应了相对良好的积淀环境。

关键词: 绿泥石, 碱交代, 铀成矿, 龙首山

中图分类号: P578.962; P619.14

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)03-0517-10

Characteristics and significance of chlorite in the Longshoushan alkali-metasomatic type uranium deposit

WEI Zheng-yu¹, ZHANG Shu-ming^{1,2}, LIU Jin-zhi², CHEN Yun-jie³, FU Cheng-ming³ and ZHANG Liang¹
(1. State Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Resources and Environment, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China; 2. National Defense Key Laboratory of Radioactive Geology and Exploration Technology, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China; 3. No. 203 Institute of Nuclear Industry, Xianyang 712000, China)

Abstract: Chloritization is one of the most important alteration types in the Longshoushan uranium deposit. Based on EP-MA analysis and mineralogical study of the chlorites in the Longshoushan uranium deposit, the authors found that the chemical types of chlorite in Longshoushan area is mainly mafic chlorite, with a small amount of ripidolite. Based on the genesis or the relationship with coexisting minerals of chlorite, the authors divide the chlorites into four types, i. e., biotite alteration type, feldspar alteration type, pitchblende association type and accessory mineral association type. Argillaceous rock is the main protolith of chlorite, which is the product of multi-stage geological activities. Studies show that the uranium mineralization process of the Longshoushan alkali-metasomatic type uranium deposit experienced different temperatures at different stages: At first, the hydrothermal solution was of high temperature and resulted in the chloritization of biotite, and then the metasomatism of feldspar formed chlorite of feldspar alteration type. At the mineralization stage, the hydrothermal solution was of low temperature and formed chlorite closely associated with pitchblende. In the process of uranium mineralization, chlorite not only activated uranium in the granite but also offered a favorable deposition environment.

Key words: chlorite; alkali-metasomatism; uranium mineralization; Longshoushan

收稿日期: 2013-09-16; 修订日期: 2014-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41172079)

作者简介: 魏正宇(1989-), 男, 硕士研究生, 矿床地球化学专业, E-mail: klmwzy@163.com; 通讯作者: 张树明(1965-), 男, 博士, 教授, 主要从事铀矿床学和岩石学的科研与教学工作, E-mail: zsmfjxy@hotmail.com.

龙首山地区是我国碱交代热液型铀矿最为典型的地区,也是祁连-秦岭铀成矿省龙首山-祁连山铀矿成矿带的重要组成部分(刘金枝等,2010)。该区铀矿地质研究主要完成于上世纪80年代初及之前(胡受奚,1980,1982;程学友,1981;甘肃省地质局,1989)认为该区热液铀矿全部产于钠交代的花岗岩中,属于钠交代热液型铀矿,主要矿床有新水井矿床、茆岭矿床和牛角沟、革命沟等矿点。该区花岗岩类(包括与成矿有关的闪长岩和碱性岩)出露面积590.65 km²,占全区面积的22.7%,其中加里东花岗岩588.35 km²,占花岗岩类出露面积的99.6%,是龙首山花岗岩类的主体。研究区除茆岭矿床和新水井矿床勘查程度较高外(勘探深度也均小于300 m),其他矿床(点)研究程度还是较低。绿泥石化蚀变是龙首山铀矿床重要的蚀变类型之一,深入研究并探讨绿泥石化蚀变与铀成矿的关系,有助于更好地了解矿床成因。但受当时成矿理论、研究手段、测试方法等的局限,对绿泥石等与铀成矿关系密切的蚀变

矿物特征及意义研究较为薄弱,在一定程度上制约了对该矿床的深化认识。笔者选择龙首山地区最为典型的碱交代型铀矿床茆岭矿床和新水井矿床中的绿泥石等蚀变矿物,在岩矿鉴定分析的基础上,对绿泥石进行电子探针微区化学成分分析,从而讨论绿泥石与铀成矿之间的联系。

1 区域地质背景

龙首山地区位于华北地台西南缘阿拉善地块的南缘,南临走廊拗陷,北接潮水盆地(甘肃省地质局,1989;王青山,2008),是我国碱交代型铀矿床具有代表性地区之一(图1)。龙首山-祁连山铀成矿带是我国较为重要的铀成矿带之一,属于古欧亚大陆成矿域中的祁连-秦岭铀成矿省。该成矿域内的铀和其他金属内生矿床均为古生代构造-岩浆活动的产物,矿床成矿年龄主要属于加里东期-海西期,也有部分燕山期的矿化(黄净白等,2005)。

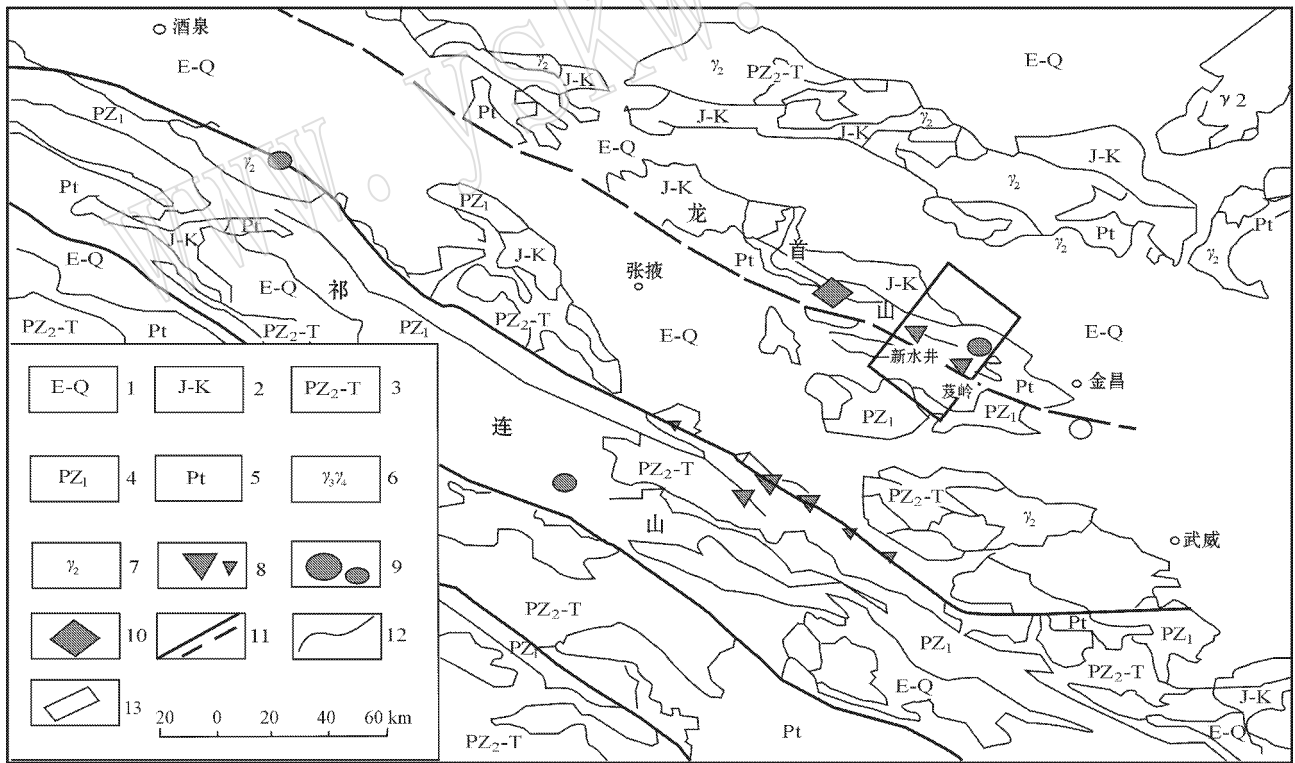


图 1 祁连山-龙首山铀成矿带概略地质图

Fig. 1 Generalized geological map of the Qilianshan-Longshoushan uranium metallogenic belt

- 1—古近系-第四系; 2—侏罗系-白垩系; 3—上古生界-三叠系; 4—下古生界; 5—元古界; 6—加里东期、华力西期花岗岩;
- 7—晋宁期花岗岩; 8—碱交代热液型铀矿、矿点; 9—花岗岩型铀矿床、矿点; 10—伟晶岩型铀矿床; 11—主要断裂带及推测主要断裂带;
- 12—地质界线; 13—研究区域

- 1—Paleogene-Quaternary; 2—Jurassic-Cretaceous; 3—Paleozoic-Triassic; 4—Lower Paleozoic; 5—Proterozoic; 6—Caledonian, Variscan granite;
- 7—Jinningian granite; 8—alkali-metasomatic hydrothermal uranium deposit (ore spot); 9—granite-type uranium deposit (ore spot); 10—pegmatite-type uranium deposit; 11—major fault and inferred main faulted zone; 12—geological boundary; 13—study area

区内地层主要是下元古界龙首山群、中元古界墩子沟群和震旦系韩母山群。龙首山群由片岩、片麻岩、大理岩和混合岩等变质岩组成,为一套浅海-滨海碎屑-碳酸盐夹中基性火山岩建造,属于绿片岩-角闪岩相;墩子沟群的主要岩性是千枚岩、灰岩和砂岩,为浅海相薄层沉积;韩母山群下部以碎屑岩为主,上部由灰岩组成。

区内岩浆活动强烈,岩浆岩出露面积广、种类多,其展布方向与区域构造基本一致。其中加里东晚期岩浆岩最发育,规模较大,系深部陆壳重熔交代成因。产铀的茈岭岩体就是其中之一。

区内构造活动强烈,由一系列褶皱、断裂组成。褶皱为两个不对称的复背斜、复向斜,背斜紧密,向斜开阔。南北缘区域深大断裂和不同方向次级断层,把整个龙首山切割成若干个菱形、三角形断块。茈岭矿床(701矿床)和新水井矿床(706矿床)两个矿床均分布在茈岭断块内。

该区矿化类型较多,有中条期混合岩成因的伟晶白岗岩型(红石泉矿床)、加里东晚期或海西早期的硅质脉类型(革命沟矿床),也有淋积型铀矿化(金边寺矿床)、砂岩型、碱性杂岩中铀矿化等,但具有典型意义的是碱交代型热液铀矿化。

2 矿床地质概况

地处甘肃省永昌县境内的龙首山地区是我国碱交代型铀矿床最具代表性地区之一,属于钠交代型铀矿床,主要矿床包括茈岭矿床(701矿床)和新水井矿床(706矿床)。铀矿床产于花岗岩中,其大地构造属于华北板块阿拉善隆起地块的西南缘,为早古生代大陆边缘隆起带。龙首山碱交代型铀矿床位于阿拉善地块龙首山拱断带茈岭复背斜的轴部加里东斜长花岗岩体内部,701矿床居其中段,706矿床在其西端。

2.1 茈岭矿床

茈岭铀矿床属于祁连-秦岭铀成矿省之龙首山-祁连山铀成矿带的重要组成部分,矿化主要发育于祁连山北缘断裂带内,成矿类型为与深源幔质活动有关的碱交代型铀矿床,矿化形成于海西早期(胡受奚,1982;甘肃省地质局,1989;黄净白等,2005;杜乐天,2009)。

茈岭矿床矿区地层出露简单,主要为下元古界片岩、含铁石英岩、白云质厚层大理岩、绿泥石石英云母片岩以及震旦系硅质条带状灰岩夹千枚岩。茈

岭岩体东宽西窄,呈楔形和谐地侵入于前寒武系变质岩中。该岩体主要由花岗岩、闪长岩、正长岩及酸性和基性脉岩组成,为复式杂岩体,早期侵入的为加里东早期闪长岩(U-Th-Pb法,558 Ma),中期侵入的为灰白色斜长(闪长)花岗岩,晚期侵入的为肉红色中粗粒斑状花岗岩、肉红色中粗粒花岗岩等(Rb-Sr等时线法,438.8 Ma),末期侵入的为正长岩脉和细粒花岗岩(401.8 Ma),构成一个完整的岩浆演化系列。花岗岩和早期闪长岩发生不同程度的混染作用,形成混染岩带(杜乐天,2001;王青山,2008)。

龙首山钠交代岩主要集中于茈岭岩体南带的南缘,沿NW向马路沟大断裂及其次级近EW向断裂零星分布。马路沟断裂(F101)长20余km,总体走向 $280^{\circ}\sim 315^{\circ}$,倾角较陡,达 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$,呈“S”型展布。该断裂为一组高角度仰冲断裂,分支断裂多达5条。断裂带岩石呈挤压状态,片理、叶理、挤压透镜体发育,构造岩以碎裂岩、碎斑岩为主,其次为糜棱岩。断裂活动具有多期次特点,早期显压扭性,主断裂及其次级断裂控制了钠质溶液运移和赋存,形成钠交代岩。之后断裂再次活动,钠交代岩碎裂,为成矿提供了赋存空间。后期显张扭性,活动弱,范围小,表现为硅质、碳酸盐胶结的角砾岩沿断裂发育,局部地段硅化强烈,形成硅质角砾岩,并有铀矿化。

茈岭矿床位于马路沟断裂(F101)下盘10~300m范围内钠长石化花岗岩中,矿体侧列,大体与F101平行,铀矿化则赋存于次级东西向压扭性断裂构造(碎裂蚀变)带中。矿床由3条碎裂蚀变带组成,矿体走向近东西,向南陡倾,隐伏于地下数米到120m。单个矿体长数米至120m,宽十几米至数十米,沿倾斜延伸最大180m。矿体形态复杂,分支复合、膨涨收缩现象明显可见。钠交代体产于茈岭岩体南部边缘部位,沿马路沟断裂带零星分布,其围岩主要是肉红色中粗粒-似斑状黑云母花岗岩、弱钠长石化中细粒混染黑云石英闪长岩。

2.2 新水井矿床

新水井矿床位于马路沟断裂一支断裂(F121)的上盘钠长石化花岗岩中,矿体侧列,呈不规则透镜状,与控矿断裂平行。矿床主要由3个矿体组成,单个矿体规模大,形态简单,集中赋存于长200m、宽60m、沿倾斜延伸320m的含矿带中,目前探明的铀矿均产于茈岭强烈钠交代花岗岩中,属龙首山钠交代岩的一部分。

矿区内地层仅在西北部见一长条状下元古界地

层,长330 m,宽5~20 m,呈北西西向展布,其南北两侧被马路沟断裂(F101)所切割,岩性为大理岩和云母石英片岩。控矿构造为马路沟断裂分支(F121)。围岩蚀变有钠长石化、绿泥石化、水针赤铁矿化及碳酸盐化。

矿床的含矿主岩为钠交代岩,混染闪长岩有时也含矿。钠交代体在地表以F121为界,呈不规则的小岩株状,东西连续长达280 m,平均宽50 m,在马路沟断裂两侧还分布有一些小型钠交代体,但均无矿。铀的存在形式以铀矿物为主,占70%以上,铀矿物有沥青铀矿和铀黑;其次铀被赤铁矿、绿泥石、碳酸盐、锐钛矿等吸附。铀成矿同位素年龄为33~245、299和124~99 Ma 3组(孙圭等,1998)^①。前者为主成矿期。伴生金属矿物有赤铁矿及少量方铅矿、黄铁矿等,非金属矿物为钠长石、绿泥石、方解石等。伴生元素有钇和钍,钇品位0.027%,常在磷灰石、锐钛矿、赤铁矿中,钍品位0.02%~0.03%,主要分布在2285标高以上。钍多与钇在一起,钍钇相关

系数0.059~0.81,铀钇相关系数0.56~0.66。矿石具有微粒状结构,浸染状、细脉状、网脉状构造(甘肃省地质局,1989;孙圭等,1998^①)。

前人研究表明矿区范围内的花岗质岩石均广泛发育了各种类型的蚀变作用,主要有微斜长石化、钠长石化、白云母化和绿泥石化等,其中绿泥石化既可产在由微斜长石化、钠长石化及白云母化构成的碱交代岩内,同时还在碱交代岩旁侧形成独立的绿泥石化带,矿体就产在碱交代与绿泥石化岩石的过渡带部位偏绿泥石化带中(蒙晓莲等,1990;李月湘,1990;刘埃平等,1993)。

3 样品特征及分析测试

3.1 样品采集

本次研究样品采自龙首山地区茈岭和新水井两个典型碱交代型铀矿床,样品的采集位置及岩性见表1。

表1 样品采集位置与岩性简述
Table 1 Sampling position and lithology

序号	样品编号	矿床	北纬	东经	岩石性质及描述
1	LSS10-01	茈岭	38°33'59.64"	101°47'53.58"	肉红色石英赤铁绿泥方解强钠交代岩
2	LSS10-03	茈岭	38°33'59.64"	101°47'53.58"	肉红色绿泥赤铁方解钠交代岩
3	LSS10-13	茈岭	38°32'45.36"	101°53'29.46"	褐红色斑状斜长花岗岩
4	LSS10-23	茈岭	38°38'11.34"	101°39'43.26"	紫红夹灰绿色赤铁方解绿泥钠交代岩
5	LSS10-24	茈岭	38°38'11.34"	101°39'43.26"	紫红夹灰绿色方解赤铁绿泥强钠交代岩
6	LSS10-28	茈岭	38°38'11.34"	101°39'43.26"	紫红夹灰绿色赤铁绿泥强钠交代岩
7	LSS10-29	新水井	38°38'12.72"	101°39'45.18"	中粗粒绿帘石化花岗岩
8	LSS10-31	新水井	38°38'11.22"	101°39'27.36"	中粗粒赤铁矿化硅化花岗岩
9	LSS12-18	新水井	38°38'6.5"	101°39'47.3"	绿泥石化钠交代岩
10	LSS12-19	新水井	38°38'6.5"	101°39'47.3"	钠交代岩

3.2 岩相学特征

3.2.1 宏观特征

在野外观察龙首山地区钠交代作用岩体和周围未交代的原岩边界模糊不清,呈渐变过渡关系。早期交代是非常强烈的,在完全保留了原岩结构的情况下,矿物发生了彻底的假像交代,残留的矿物很难找到。钠交代作用在成矿时期不发育,在早期交代岩石基础上发生碎裂,钠交代矿物主要以重结晶方式形成,以脉状、网脉状充填为主。

钠交代岩的结构、构造具有显著的秉承性,新生矿物的粒径与它所交代的矿物的粒径基本一致。肉红色中粗粒斑状花岗岩经钠交代作用形成了中粗粒斑状钠交代岩,肉红色中粗粒花岗岩经钠交代作用形成了中粗粒钠交代岩,肉红色中细粒花岗岩经钠交代作用形成了中细粒钠交代岩。原岩为变砾岩、大理岩和片岩时,钠交代岩与原岩结构构造有较大差别,但残余暗色矿物往往构成阴影状构造(图2b),依然保留原岩结构构造的影子(王青山,2008)。

① 孙圭,赵致和. 1998. 中国北西部铀矿地质[M]. 核工业西北地质局(内部资料).

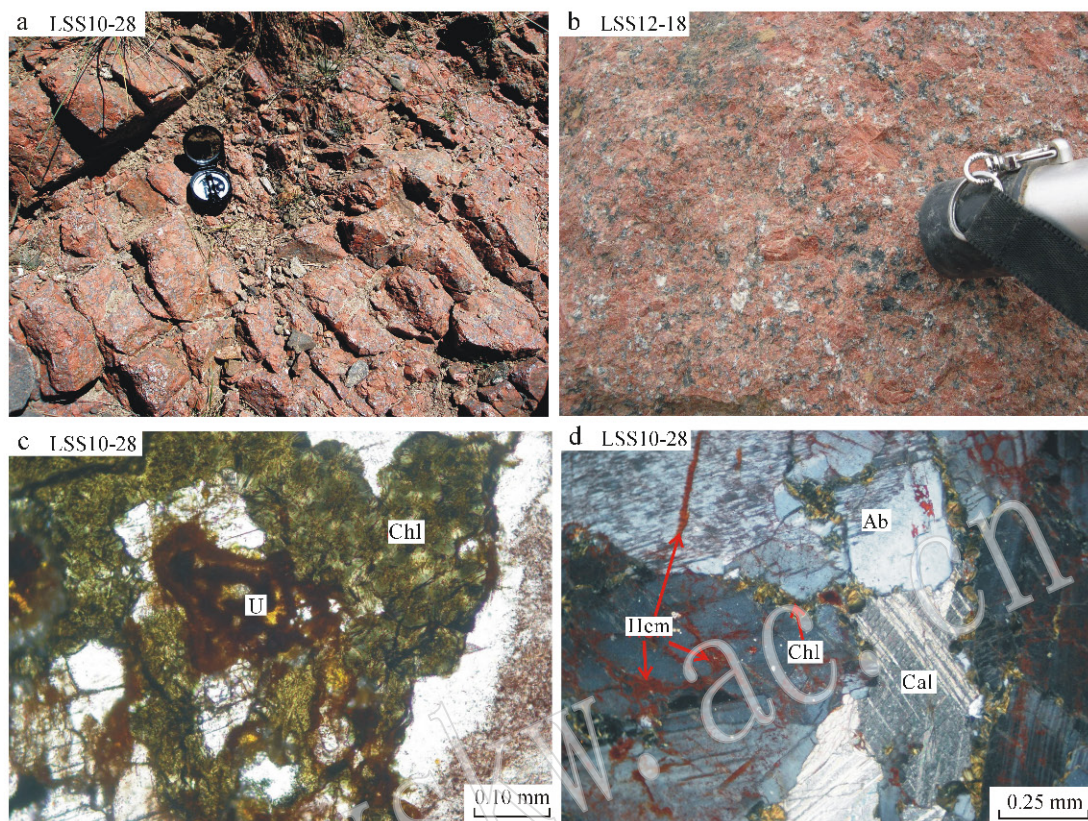


图2 样品特征

Fig.2 Characteristics of the sample

a—样品野外特征; b—暗色矿物交代原岩, 结构不发生变化; c—放射状绿泥石与铀共生; d—绿泥石与长石、赤铁矿、方解石等共生
 a—field characteristics of the sample; b—dark minerals replacing protolith, with no change of the structure; c—radial chlorite associated with uranium; d—association of chlorite and feldspar, hematite, calcite and other minerals

3.2.2 微观特征

绿泥石主要呈放射状和叶状, 为叶绿泥石(图2c), 可能是由粘土矿物蚀变而来, 有的还有少量的碳酸盐化和硅化, 形成的碳酸盐主要为菱铁矿和方解石, 呈脉状填充于裂隙间(图2d)。除此之外还有水云母化和褐铁矿化, 它们的先后顺序为: 钠长石化-绿泥石化-硅化-碳酸盐化-水云母化-褐铁矿化。另外, 还有较多的磷灰石和少量的锆石、萤石、楣石等副矿物, 水云母主要是长石的水云母化形成的, 分布于长石的解理缝和裂隙之间。

花岗岩经过钠交代作用后, 增大了岩石的孔隙度, 并使钠交代岩较原岩更易碎裂, 从而有利于成矿溶液的流通和赋存(杜乐天, 2001)。

3.3 绿泥石微区化学成分测试及结果

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省部共建国家重点实验室培养基地电子探针室进行。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 2.0×10^{-8} A, 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。其中, Mg、Fe、Al、Si 等 4 个元素均采用绿泥石作为标样, 以硬玉、钾长石、磷灰石、金红石、氧化铬和蔷薇辉石分别作为 Na、K、Ca、Ti、Cr、Mn 等元素的标样。

4 分析结果讨论

4.1 绿泥石成分特点及类型

4.1.1 绿泥石成分特点

通过对采自龙首山碱交代地区铀矿床的样品进行仔细的镜下观察得出: 石英、钾长石、斜长石为主要矿物, 绿泥石、绢云母为次要矿物以及粘土矿物、方解石及不透明矿物等副矿物构成了混合花岗岩铀矿石。因为岩体早期蚀变, 石英被大量方解石交代, 基本消失; 长石约 40%, 颗粒一般较小或破碎, 部分

已绢云母化、绿泥石化。绿泥石大多呈淡绿色集合体存在于矿石中,约占 15%;还含有 2% 的黄铁矿;浸染状的铀矿物多分布在绿泥石及绢云母等矿物中,约占 7%。

从表 2 中可以看出,研究区绿泥石的化学成分具有以下特点:SiO₂ 含量为 24.44%~36.34%,平均值为 29.65%;Al₂O₃ 含量为 14.49%~21.79%,平均值为 17.89%;FeO 含量为 10.03%~28.53%,平均值为 22.47%;MgO 含量为 8.12%~20.34%,平均值为 15.80%。总体上看,Fe、Mg、Si 的变化范围最大,Si 的变化指示了岩石酸性的变化,Fe、Mg 之间的此消彼长指示了它们在绿泥石中彼此置换比较普遍;Na₂O+K₂O+CaO 平均含量低于标准,但个别较高;另外,K、Na、Ca 的含量变化可能反映了绿泥石化的程度。

4.1.2 绿泥石的类型

绿泥石中 Fe/Si 图解常被用来对绿泥石进行分类和命名(Foster, 1962),图 3 是龙首山碱交代型铀矿床绿泥石的分类命名图解。从图 3 可知,该区绿泥石的类型主要是铁镁绿泥石,少数为蠕绿泥石。

依据绿泥石成因或与共生矿物的关系,本区绿泥石可划分为黑云母蚀变型、长石蚀变型、沥青铀矿共生型和副矿物共生型等 4 种类型。其中,黑云母蚀变型绿泥石在岩石中分布最为广泛,为黑云母矿物蚀变而成。绿泥石部分或全部交代了黑云母,但保留了黑云母假象,形态以蠕虫状集合体为主,少数为叶片状,常常与黄铁矿、铀钍石共生(图 4a)。长石蚀变型绿泥石是由长石蚀变形成,一般颗粒细小,多破

碎,与长石紧密共生(图 4f)。沥青铀矿共生型绿泥石则多与方解石、赤铁矿等共生(图 4c)。副矿物共生型绿泥石主要是与锆石、磷灰石等副矿物共生(图 4d)。

4.2 绿泥石原岩类型判别

Laird(1998)提出的 $n(\text{Mg})/n(\text{Fe}+\text{Mg})-n(\text{Al})/n(\text{Al}+\text{Mg}+\text{Fe})$ 关系图解,已被广泛用于判断绿泥石的原岩类型。一般认为,由泥质岩蚀变形成的绿泥石比由铁镁质岩石转化而成的绿泥石具有较高的 $n(\text{Al})/n(\text{Al}+\text{Mg}+\text{Fe})$ 值(>0.35)。龙首山碱交代型铀矿床绿泥石的 $n(\text{Al})/n(\text{Al}+\text{Mg}+\text{Fe})$ 变化于 0.34~0.39 之间,其中有 15 个样品的 $n(\text{Al})/n(\text{Al}+\text{Mg}+\text{Fe})$ 大于 0.35,只有 1 个样品小于 0.35,还有 1 个等于 0.35,平均值 >0.35 。研究区样品的绿泥石 $n(\text{Mg})/n(\text{Fe}+\text{Mg})-n(\text{Al})/n(\text{Al}+\text{Mg}+\text{Fe})$ 关系图解(图 5)基本体现一种正相关关系,其中绿泥石的线性方程为: $n(\text{Al})/n(\text{Al}+\text{Mg}+\text{Fe})=0.253 n(\text{Mg})/n(\text{Mg}+\text{Fe})+0.277$ 。图解和方程都说明,不论其产状或成因,研究区大部分绿泥石是来自于泥质岩石,但还有部分来自于富铁、镁的流体或部分与晚期的富铁镁岩石的侵入有关,也就是说本区花岗岩起源于泥质岩石。

4.3 绿泥石形成环境讨论

Xie 等(1997)研究了 Barberton 绿岩带中绿泥石的各种主要阳离子与镁的关系,并得出结论:在一次变质作用形成的绿泥石中,阳离子与镁应具有好的线性相关性。

研究区的主要阳离子与镁的关系图(图 6)中,仅 b 和 d(Al^{VI} 和 Fe)有良好的线性关系,Si 和 Al^{IV} 与 Mg 之间相关性不好,投点较为分散,说明本区绿泥石是多期次地质作用形成的。另外,Inoue(1995)认为在脉状矿床的热液蚀变中,在低氧化、低 pH 值的条件下,有利于形成富镁绿泥石,而还原环境有利于形成铁绿泥石。本次研究表明龙首山碱交代型铀矿床绿泥石的主要类型为铁镁绿泥石和蠕绿泥石,它们是富铁的绿泥石,形成于还原环境。

4.4 绿泥石化与铀成矿的关系

绿泥石化是与铀成矿关系最为密切的围岩蚀变之一。通常认为,矿前期的绿泥石化分布在矿体外围,主要由铁、镁硅酸盐矿物转化而成,一般没有铁、镁组分带入,形成黑云母蚀变型绿泥石和少量长石蚀变型绿泥石。含铀热液活动的初期,由于温度较高,黑云母和斜长石与热液反应形成绿泥石,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

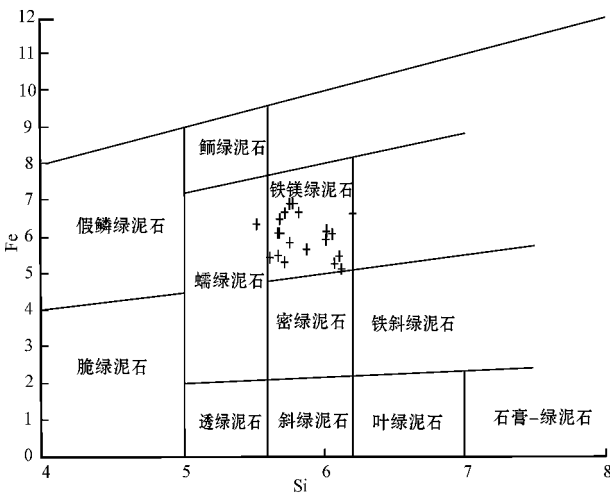


图 3 龙首山铀矿床绿泥石分类图

Fig. 3 Classification of chlorites in the Longshoushan uranium deposit

表2 绿泥石电子探针分析结果和特征值

Table 2 Electron microprobe analyzes and characteristic values of chlorite

序号	样品号	Ne ₂ O	K ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	FeO	C ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	CaO	Total	Fe/(Mg+Fe)	Mg/(Mg+Fe)	Al/(Al+Mg+Fe)	Si/(Si+Al)	w _B /%
1	LSSI0-1-1	0.01	0.01	17.97	14.75	22.81	0.10	30.84	0.28	0.00	0.05	0.28	87.12	0.62	0.38	0.38	0.51	0.51
2	LSSI0-1-2	0.03	0.06	18.54	15.82	23.27	0.05	32.60	0.19	0.00	0.02	0.33	90.89	0.62	0.38	0.38	0.50	0.50
3	LSSI0-1-3	0.10	0.14	15.04	14.49	22.56	0.07	30.52	0.17	0.01	0.02	0.30	83.38	0.64	0.36	0.37	0.50	0.50
4	LSSI0-3-1	0.07	0.02	16.34	16.95	21.24	0.09	31.89	0.41	0.02	0.00	0.17	87.20	0.58	0.42	0.39	0.48	0.48
5	LSSI0-13-1	0.01	0.01	8.12	21.79	25.26	0.08	31.68	0.00	0.04	0.00	0.09	86.85	0.64	0.37	0.37	0.49	0.49
6	LSSI0-23-1	0.02	0.05	12.88	16.27	26.46	0.05	28.43	0.45	0.00	0.09	0.10	84.85	0.68	0.32	0.34	0.52	0.52
7	LSSI0-23-2	0.11	0.05	13.37	16.73	24.18	0.02	28.12	0.42	0.03	0.11	0.27	83.39	0.65	0.35	0.35	0.51	0.51
8	LSSI0-24-1	0.01	0.01	10.98	17.81	28.53	0.01	24.44	0.43	0.00	0.03	0.00	82.29	0.59	0.41	0.39	0.49	0.49
9	LSSI0-24-2	0.06	0.03	12.15	17.53	26.24	0.01	30.72	0.41	0.01	0.01	0.01	87.18	0.65	0.35	0.38	0.51	0.51
10	LSSI0-28-1	0.18	0.04	14.56	19.20	18.72	0.02	30.57	0.28	0.00	0.03	0.23	83.96	0.59	0.41	0.39	0.50	0.50
11	LSSI0-28-2	0.05	0.01	15.77	18.15	19.05	0.03	30.78	0.42	0.00	0.00	0.32	84.67	0.60	0.40	0.39	0.53	0.53
12	LSSI0-29-1	0.02	0.01	15.37	19.18	27.28	0.07	28.39	0.58	0.00	0.00	0.02	90.96	0.64	0.36	0.35	0.51	0.51
13	LSSI0-31-1	0.14	0.30	19.04	18.96	19.49	0.00	27.24	0.48	0.03	0.08	0.63	86.39	0.63	0.36	0.35	0.54	0.54
14	LSSI2-18-1	0.09	0.04	20.34	16.87	10.03	0.08	36.34	0.13	0.00	0.00	0.35	84.23	0.69	0.31	0.38	0.51	0.51
15	LSSI2-18-2	0.04	0.04	18.18	17.46	20.07	0.07	29.71	0.51	0.04	0.01	0.25	86.52	0.60	0.40	0.37	0.54	0.54
16	LSSI2-18-3	0.00	0.00	18.99	19.21	19.50	0.05	29.51	0.23	0.02	0.12	0.02	87.71	0.60	0.40	0.39	0.52	0.52
17	LSSI2-19-1	0.12	0.03	19.11	18.19	21.05	0.05	28.40	0.58	0.00	0.10	0.12	87.74	0.59	0.41	0.36	0.52	0.52
18	LSSI2-19-2	0.14	0.04	13.90	18.89	27.99	0.07	27.32	0.74	0.05	0.00	0.09	89.22	0.67	0.33	0.36	0.50	0.50
19	LSSI2-19-3	0.00	0.00	18.70	19.29	21.96	0.04	27.90	0.50	0.00	0.00	0.00	88.44	0.64	0.36	0.35	0.51	0.51
20	LSSI2-19-4	0.00	0.00	16.68	20.18	23.65	0.08	27.55	0.32	0.04	0.05	0.00	88.54	0.66	0.34	0.39	0.49	0.49

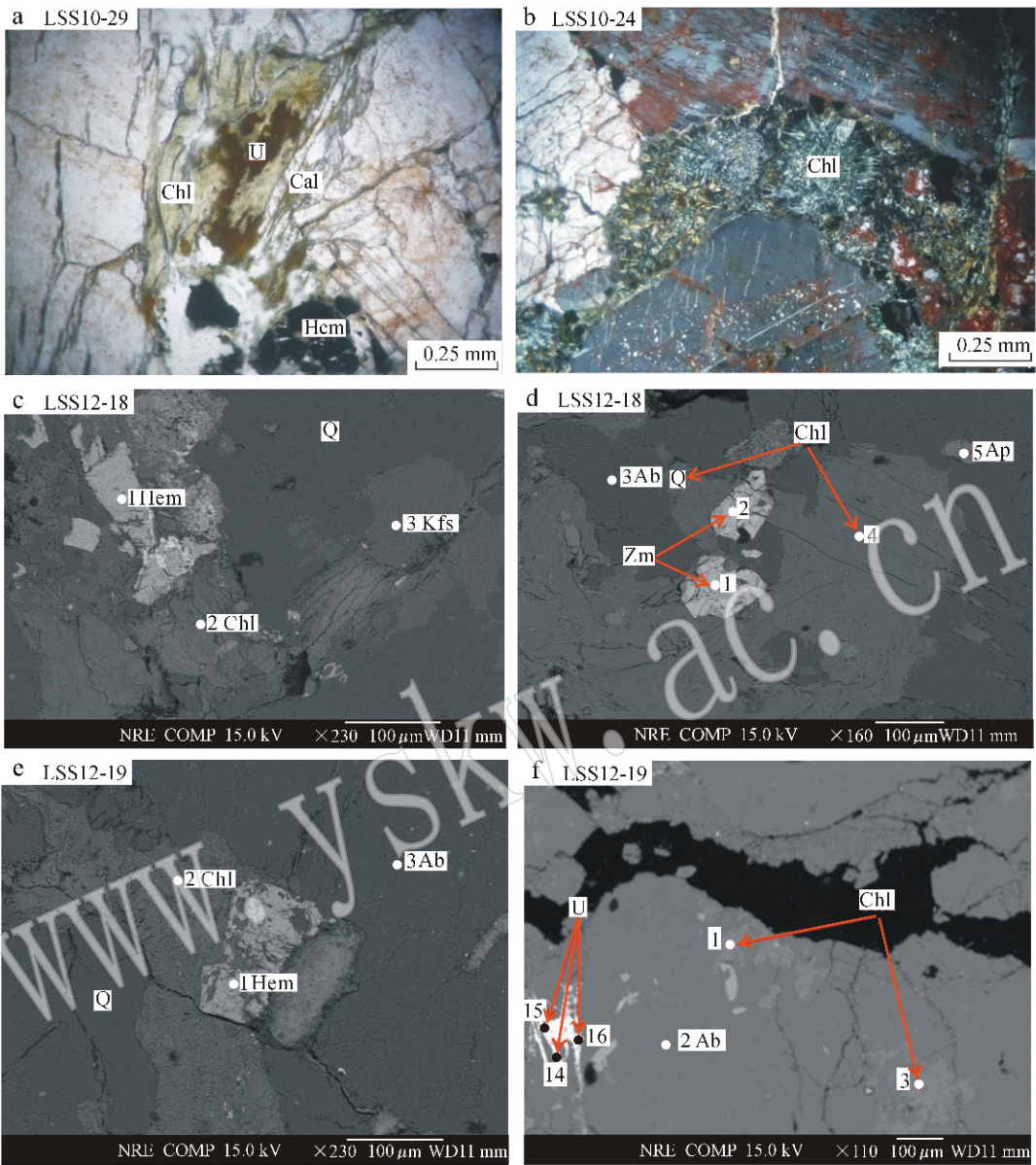


图4 龙首山铀矿床绿泥石镜下特征

Fig. 4 Microscopic characteristics of chlorite in the Longshoushan uranium deposit

a—铀矿物与绿泥石、方解石和赤铁矿伴生；b—放射状绿泥石和铀矿物；c—绿泥石与赤铁矿、石英、长石等共生；d—绿泥石与锆石、磷灰石、长石等共生；e—绿泥石-富铀矿化；f—绿泥石、钠长石、铀矿物共生；Chl—绿泥石；Cal—方解石；Ab—钠长石；Q—石英；Hem—赤铁矿；U—铀矿物

a—association of uranium minerals and chlorite, calcite and hematite; b—radial chlorite and uranium minerals; c—association of chlorite, hematite, quartz, feldspar and other minerals; d—association of chlorite, zircon, apatite, feldspar and other minerals; e—chlorite-rich uranium mineralization; f—association of chlorite, albite and uranium minerals; Chl—chlorite; Cal—calcite; Ab—albite; Q—quartz; Hem—hematite; U—uranium minerals

矿提供了铀源(胡受奚等, 1982; 章邦桐, 1994; 张展适, 2011)。

龙首山地区碱交代型铀矿床中的绿泥石与铀成矿之间的关系主要表现在以下方面:

(1) 绿泥石化对岩石物理性质的影响

在绿泥石化过程中, 赋矿围岩中的黑云母和热液反应形成绿泥石, 使其孔隙度增高, 渗透性增大, 岩石的牢固性变差, 绿泥石形成时的还原环境可以使热液中的铀还原成四价铀并沉淀, 可见绿泥石的形成成为铀矿化提供了良好的沉淀环境。

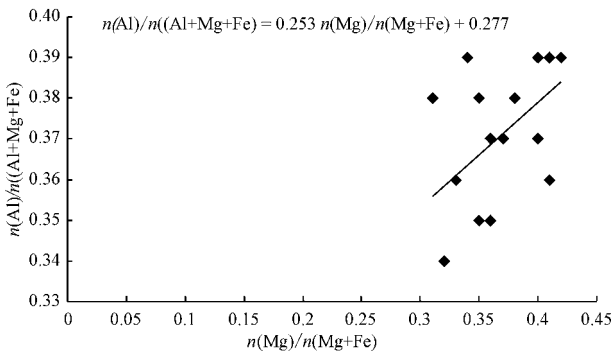


图 5 绿泥石的 $n(\text{Al})/n(\text{Al} + \text{Mg} + \text{Fe}) - n(\text{Mg})/n(\text{Mg} + \text{Fe})$ 关系图解

Fig. 5 $n(\text{Al})/n(\text{Al} + \text{Mg} + \text{Fe}) - n(\text{Mg})/n(\text{Mg} + \text{Fe})$ diagram of chlorite

(2) 促使铀活化转移

铀在岩体内富集成矿, 不仅与岩体含铀量有关, 而且还取决于铀在岩体内的赋存状态。由黑云母蚀变而来的绿泥石不但继承了原岩中分布在黑云母中的含铀副矿物的裂变径迹特征, 而且通过吸附作用叠加了一部分黑云母绿泥石化过程中释放出来的铀(程华汉等, 2000)。这种作用改变了铀在花岗岩中的赋存状态, 使固定铀变成了活性铀。

(3) 促使铀的沉淀

成矿热液最初是铀酰碳酸钠溶液, 当富铀热液

原有的物理化学平衡在这种相对酸性的还原环境中被破坏时, 铀酰与配位阴离子脱离, 并被进一步还原、沉淀, 形成以四价铀为主的铀矿物, 在此过程中, 铀载体的平衡遭到破坏, 从而造成铀的沉淀(魏晋庭等, 2009; 陈其平, 2010)。

因此, 本文认为绿泥石在铀成矿过程中不但活化了花岗岩里的铀, 而且还给铀矿化提供了相对良好的积淀环境。

5 结论

(1) 绿泥石化是龙首山铀矿床重要的蚀变类型之一, 原岩中的斜长石、钾长石等均被钠长石、方解石及绿泥石等所取代, 形成该区特征的钠长石化-碳酸盐化-赤铁矿化-绿泥石化“四位一体”的共生矿物组合。

(2) 绿泥石的化学成分分析结果表明, 本区绿泥石主要是铁镁绿泥石, 少数为蠕绿泥石, 说明流体中 $n(\text{Fe}^{2+}) > n(\text{Mg}^{2+})$, 含矿溶液沉淀时是一个中-低温的还原环境。

(3) 依据绿泥石成因或与共生矿物的关系, 研究区绿泥石可划分为黑云母蚀变型、长石蚀变型、沥青铀矿共生型和副矿物共生型等 4 种类型。

(4) 研究区绿泥石主要是来自于泥质岩石, 部分

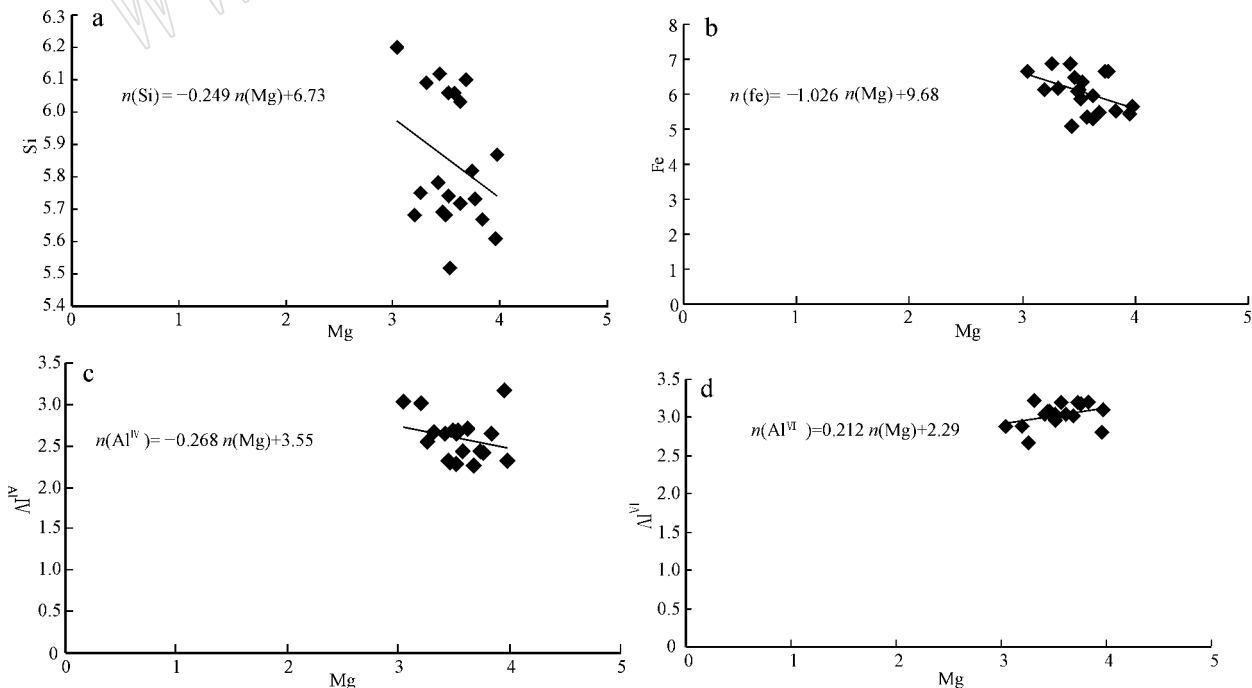


图 6 绿泥石中主要阳离子与 Mg 的关系图解

Fig. 6 The relationship between major cations and Mg in chlorite

来自于富铁、镁的流体或与晚期的富铁镁岩石的侵入有关,表明本区含矿主岩花岗岩起源于泥质岩石。

(5)龙首山地区碱交代型铀矿床的成矿过程可表述为矿前期在相对较高温度的热液流体作用下,黑云母发生绿泥石化蚀变,随后热液继续交代长石,形成长石蚀变型绿泥石,进而在成矿期热液温度相对较低的条件下形成与沥青铀矿紧密共生的绿泥石。

References

Foster M D. 1962. Interpretation of the composition and classification for the chlorite [J]. US Geology Survey Prof, 414A : 33.

Inoue A. 1995. Formation of clay minerals in hydrothermal environment [A]. Viede B. Origin and Mineralogy of Clays [C]. Berlin : Springer, 268 ~ 330.

Laird J. 1998. Chlorites : metamorphic petrology [A]. Bailey S W. Hydrous Phyllosilicates [C]. Reviews in Mineralogy, 19 : 405 ~ 453.

Xie X G. 1997. Ilb trioctahedral chlorite from the Barberton greenstone belt : crystal structure and rock composition constraints with implications to geothermometry [J]. Contrib. Mineral. Petrol., 126 : 275 ~ 291.

Chen Qiping. 2010. To investigate the relationship between sodium and uranium mineralization account middle of the northern margin of the North Qilian metallogenic belt of uranium in Gansu [J]. Gansu Science and Technology, 26(17) : 33 ~ 36 (in Chinese).

Cheng Xueyou. 1981. Sodium hydrothermal uranium mineralization [J]. Radioactive Geological, (4) : 295 ~ 299 (in Chinese).

Du Letian. 2001. China Hydrothermal Uranium Mineralization Basic Rules and General Science Hydrothermal Mineralization [M]. Beijing : Atomic Energy Publishing House (in Chinese).

Du Letian. 2009. More on the Important Value on Alkali Metasomatism Theoretical in the Uranium Mineralization and Prospecting [M]. Beijing : Geological Publishing House, 36 ~ 42 (in Chinese).

Gansu Provincial Geological Bureau. 1989. Regional Geology of Gansu Province [M]. Beijing : Geological Publishing House (in Chinese).

Hu Shouxi. 1980. Metasomatic Alteration Petrology [M]. Beijing : Geological Publishing House (in Chinese).

Hu Shouxi, Zhou Shunzhi, Ren Qijiang, et al. 1982. Alkali account metallogenic model and metallogenic mechanism theoretical basis [J]. Geology and Prospecting, (1) : 1 ~ 6 (in Chinese).

Huang Jingbai and Huang Shijie. 2005. China uranium resources regional metallogenic characteristics [J]. Uranium Geology, 21(3) : 129 ~ 138 (in Chinese).

Li Yuexiang. 1990. 201 Rich alteration geochemistry of uranium deposit [J]. Uranium Geology, (6) : 359 ~ 367 (in Chinese).

Liu Aiping and Jin Jingfu. 1993. Structure ore deposits of 361 uranium [J]. Chengdu University of Technology (Natural Science), 20(2) : 106 ~ 111 (in Chinese).

Liu Jinzhi and An Weitao. 2010. Study on the alkali metasomatism in Longshoushan alkali-metasomatic type hydrothermal uranium de-

posit [J]. Technology Square, (7) : 187 ~ 189 (in Chinese).

Meng Xiaolian and Xie Qiangpeng. 1990. To explore the relationship between physical and chemical conditions of 201 deposit formation and rich uranium ore [J]. East China Geological Institute, 13(2) : 31 ~ 41 (in Chinese).

Wang Qingshan. 2008. Longshoushan Alkali-metasomatic Type Uranium Deposits geochemistry and ore-controlling factors [J]. Gansu Geology, 17(1) : 23 ~ 29 (in Chinese).

Wei Jinting, Chen Qiping and An Guobao. 2009. To investigate the relationship between uranium mineralization and sodium account in the middle of the northern margin of the North Qilian metallogenic belt of uranium [J]. Mineral Resources and Geology, 23(1) : 36 ~ 41 (in Chinese).

Zhang Bangtong. 1994. Geochemical evidence for uranium mobilization and migration in granites from south China [J]. Geochemistry, 2 : 161 ~ 167 (in Chinese).

Zhang Zhanshi. 2011. Magmatism and Its Relationship with Uranium Mineralization in Xiaozhuang Uranium Field [M]. Beijing : Atomic energy Publishing House, 65 ~ 76 (in Chinese).

附中文参考文献

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.

程学友. 1981. 热液钠交代与铀矿化 [J]. 放射性地质, (4) : 295 ~ 299.

杜乐天. 2001. 中国热液铀矿基本成矿规律和一般热液成矿学 [M]. 北京 : 原子能出版社.

杜乐天. 2009. 再论碱交代作用理论在铀矿成矿和找矿中的重要价值 [M]. 北京 : 地质出版社, 36 ~ 42.

甘肃省地质局. 1989. 甘肃省区域地质志 [M]. 北京 : 地质出版社.

胡受奚. 1980. 交代蚀变岩石学 [M]. 北京 : 地质出版社.

胡受奚, 周顺之, 任启江, 等. 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.

黄净白, 黄世杰. 2005. 中国铀资源区域成矿特征 [J]. 铀矿地质, 21(3) : 129 ~ 138.

李月湘. 1990. 201 富铀矿床蚀变地球化学研究 [J]. 铀矿地质, 6(6) : 359 ~ 367.

刘埃平, 金景福. 1993. 361 铀矿床的构造控矿特征 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 20(2) : 106 ~ 111.

刘金枝, 安伟涛. 2010. 龙首山钠交代热液型铀矿床的碱交代作用研究 [J]. 科技广场, (7) : 187 ~ 189.

蒙晓莲, 谢鹏. 1990. 201 矿床形成的物理化学条件及其与富铀矿关系探讨 [J]. 华东地质学院学报, 13(2) : 31 ~ 41.

王青山. 2008. 龙首山钠交代岩型铀矿地球化学特征及其控矿因素 [J]. 甘肃地质, 17(1) : 23 ~ 29.

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.

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.

张展适. 2011. 下庄铀矿田岩浆作用及其与铀成矿关系 [M]. 北京 : 原子能出版社, 65 ~ 76.