

苗儿山中段向阳坪铀矿床绿泥石特征及其成岩成矿意义

谭双^{1,2,3}, 陈琪^{2,3}, 万建军¹, 高翔^{2,3}, 吴昆明^{2,3}, 欧阳平宁^{2,3}, 张涛^{2,3}

(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. 核工业二三〇研究所, 湖南长沙 410007; 3. 湖南省伴生放射性矿产资源评价与综合利用工程技术研究中心, 湖南长沙 410007)

摘要: 向阳坪铀矿床是近年在苗儿山地区发现的重要矿床, 绿泥石化是向阳坪铀矿床重要的蚀变类型和找矿标志。本文对向阳坪矿床发现的铀-绿泥石型矿物的蚀变矿物学特征进行了系统地观察, 结合电子探针原位微区分析, 查明了绿泥石相关矿物的共生组合关系, 获得了其化学定量分析结果, 划分了绿泥石的种类及其形成条件, 在此基础上探讨了绿泥石性质及其对铀成矿的启示。结果显示, 向阳坪铀矿床绿泥石可分为黑云母蚀变型、裂隙充填型、铀矿物相关型和黏土矿物吸附铁镁质转变型4种。铁硅协变图解表明向阳坪矿床主体为铁镁绿泥石, 部分为蠕绿泥石, 含少量的密绿泥石。据经验公式计算所得绿泥石形成温度变化范围为190~265℃, 平均239℃, 属中低温热液蚀变, 其形成机制包括溶蚀-结晶和溶蚀-迁移-结晶2种。绿泥石化为铀成矿过程提供了所需的环境, 促进了铀的活化、迁移并最终沉淀成矿。

关键词: 绿泥石; 电子探针; 形成温度; 铀成矿; 向阳坪铀矿床

中图分类号: P578; P616

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)06-1097-12

Characteristics of chlorite in Xiangyangping uranium ore deposit, middle segment of Miaoershan and its petrogenetic and metallogenic significance

TAN Shuang^{1,2,3}, CHEN Qi^{2,3}, WAN Jian-jun¹, GAO Xiang^{2,3}, WU Kun-ming^{2,3}, OUYANG Ping-ning^{2,3} and ZHANG Tao^{2,3}

(1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. Changsha Uranium Geology Research Institute, CNNC, Changsha 410007, China; 3. Hunan Engineering and Technology Research Center for Evaluation and Comprehensive Utilization of Associated Radioactive Mineral Resources, Changsha 410007, China)

Abstract: The Xiangyangping uranium ore deposit is a new-found deposit in Miaoershan ore field for the past few years. Chloritization is one of the most important alteration types and prospecting indicators in the Xiangyangping uranium deposit. Based on the detailed field and interior petrographic observation for the ore samples in the Xiangyangping uranium deposit, electron probe microanalyzer (EPMA) is employed to study paragenetic association characteristics and morphological features of chlorites. Chemical compositions of chlorites could help to confirm the chemical types of chlorites and formation condition of chlorites, and finally to discuss their formation mechanism and the relationship with uranium mineralization. The chlorites in the Xiangyangping uranium ore deposit could be divided into four types, including biotite-alteration type, fracture-filling type, uranium-associated types and clay

收稿日期: 2022-03-14; 接受日期: 2022-09-05; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 中核集团青年英才项目(CNNC2021-230); “十四五”国防预先研究项目; 中国核工业地质局地勘项目(202222); 核资源与环境国家重点实验室开放基金(2020NRE04); 放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室开放基金项目(2022RGET05)

作者简介: 谭双(1993-), 男, 博士研究生, 工程师, 研究方向为铀矿地质勘查和研究, E-mail: 835257339@qq.com。

minerals transformed types. The Fe-Si diagram has revealed that the chlorites are mainly brunsvigite area, partly ripidolite and few pycnochlorite, respectively. The formation temperature range of chlorite is 190~265°C (averagely 239°C), which belong to the mesothermal epithermal alteration. The formation mechanism is dissolution-crystallization and dissolution-migration-crystallization. The chloritization provided the environment for uranium mineralization, and promoted the activation, migration and deposition of uranium.

Key words: chlorite; EPMA; formation temperature; uranium metallogenesis; Xiangyangping uranium deposit

Fund support: Young Talent Program of the China National Nuclear Corporation (CNNC2021-230); Advance Research Project of the 14th Five-Year Plan; Geological Exploration Projects of the China Nuclear Geology (202222); Open Fund of the State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment (2020NRE04); Open Fund of the Fundamental Science on Radioactive Geology and Exploration Technology Laboratory (2022RGET05)

绿泥石作为热液矿床中典型的蚀变矿物,在诸多矿床中广泛发育,其矿物学方面的研究对热液矿床的低温热液蚀变机制、热液成矿环境变化等研究具有重要意义(Deer *et al.*, 1962; Cathelineau and Nieva, 1985; Bryndzia and Scott, 1987; Cathelineau, 1988; Bevins *et al.*, 1991; De Caritat *et al.*, 1993; 张展适等, 2007; 夏菲等, 2016; 谭双等, 2017)。不少学者对与绿泥石密切相关的各类成矿热液系统进行了研究,概括出不同类型绿泥石的化学组成和结构构造性质,并探索出能够间接指示其形成温压条件的方程及计算模型(Cathelineau and Nieva, 1985; Bryndzia and Scott, 1987; Cathelineau, 1988; Bevins *et al.*, 1991; Battaglia, 1999; Grigsby, 2001; Tóth *et al.*, 2007; Gould *et al.*, 2010)。Rausll-Colom等(1991)、Nieto(1997)与 Battaglia(1999)等对前人总结的绿泥石温度计算公式进行更新和补充,新的算法逐步得到学术界认可,并广泛运用到许多热液矿床的成矿温度计算。

苗儿山地区是我国南方重要的铀成矿区,向阳坪矿床是2006年以来在苗儿山地区开展勘查工作新发现的矿床。前人对该区控矿构造、矿床地球化学、矿床成因及年代学等方面开展了大量的研究工作(黄宏业等, 2008; 李妩巍等, 2010, 2011; 石少华等, 2011; 陈琪等, 2013, 2020, 2021; 吴昆明等, 2016; 谭双等, 2021),并取得了一系列的成果。广泛发育的各类围岩蚀变是花岗岩型热液铀矿床最为显著的特征之一,碱交代、赤铁矿化、硅化、黏土化等不同蚀变类型为热液铀矿床铀元素迁移、活化、富集、沉淀等成矿过程中的关键环节提供了必要条件(杜乐天, 1986; 章邦桐等, 1990; Cuney *et al.*, 2012; 钟福军等, 2017; 吴德海, 2020)。前人对向阳坪铀矿床围岩蚀变陆续开展了蚀变类型划分、蚀

变分带等方面的研究,取得了蚀变空间分布规律、蚀变矿物共生组合等方面的认识(李妩巍等, 2010; 陈琪等, 2013; 吴昆明等, 2016)。除此之外,热液蚀变作用常常伴随着铀矿化的产生,并影响着热液矿床中成矿元素的活化、迁移、富集和沉淀,蚀变过程中更为关键的各元素迁移规律、蚀变与矿化时空耦合关系、各阶段物理化学条件、蚀变矿物学特征等水岩反应机理、热液铀成矿精细成矿过程的信息,制约着华南热液型铀矿的矿床成因以及下一步的铀矿找矿工作。绿泥石化蚀变现象在向阳坪铀矿床中广泛发育,是该矿床与铀成矿密切相关的重要蚀变类型之一,同时也是该矿床的找矿标志。绿泥石化主要形成于富Fe-Mg、弱碱性的中低温热液环境,酸性火成岩中黑云母和斜长石容易被绿泥石交代,其形成过程中局部的氧化-还原环境可为铀元素沉淀提供条件。可见,绿泥石化对向阳坪矿床的铀矿勘查工作,特别是铀-绿泥石型铀矿化的下一步找矿方向十分关键,但相关的绿泥石研究工作尚未开展。因此,本矿床亟需开展绿泥石精细矿物学及成分特征的研究,以宏观结合微观的角度进一步细化何种类型的绿泥石能够作为找矿标志,剖析绿泥石与铀矿化关系,为铀矿床成因和铀矿找矿工作提供理论和数据支撑。本次研究采集了向阳坪铀矿床中各类型代表性绿泥石样品,开展了绿泥石岩相学观察和电子探针分析,以揭示向阳坪矿床绿泥石形成时的物理化学条件,并讨论了其与铀成矿之间的关系。

1 矿床地质特征

向阳坪矿床是苗儿山铀矿田近年最新发现的铀矿床,大地构造位置属江南地块南缘,处于岩石圈具多层叠置式结构的桂北幔凹区,北东向的安化-

城步深断裂带、新-资深成韧性剪切带与北西向的新宁-蓝山深断裂带交汇夹持区，苗儿山-越城岭花岗岩穹隆构造区。该区经历了自元古代以来复杂的地质构造与成矿作用演化，为热液型铀、多金属及非金属矿集区，研究区内断裂构造发育，一系列的北北东向构造控制了区内铀矿化的发育，如图 1a 所示(欧阳平宁等, 2012; 王正庆, 2018)。地层出露主要为新元古界、古生界变沉积岩系和白垩系红色砂砾岩。矿床周围出露香草坪和豆乍山两种岩体，锆石 SHRIMP U-Pb 法测定其成岩年龄均为印支期，分别为 211 ± 2 Ma 和 228 ± 11 Ma(谢晓华等, 2008; 李妩巍等, 2010)。

研究区内构造为 $F_1 \sim F_{13}$ 等一系列北北东向控矿构造，其中， $F_7 \sim F_{10}$ 断裂带控制了向阳坪矿床的产出(图 1)。野外宏观蚀变分带和蚀变矿物学研究显示，向阳坪矿床铀矿体多以透镜状和雁列式产出，矿化蚀变较为广泛，与铀矿化密切相关的蚀变主要是绿泥石化、黄铁矿化、赤铁矿化以及硅化。向阳坪铀矿床内的绿泥石化分布广泛，主要由长石和黑云母蚀变而来，常充填于岩石裂隙间，绿泥石化与赤铁矿化两种蚀变叠加时铀矿化较好，成矿期绿泥石常与铀矿物共生。本次取样钻孔分布于矿床内 F_8 号带，在弱蚀变、中等蚀变到强蚀变带中进行了系统的取样工作，代表了向阳坪矿床绿泥石化的特征。

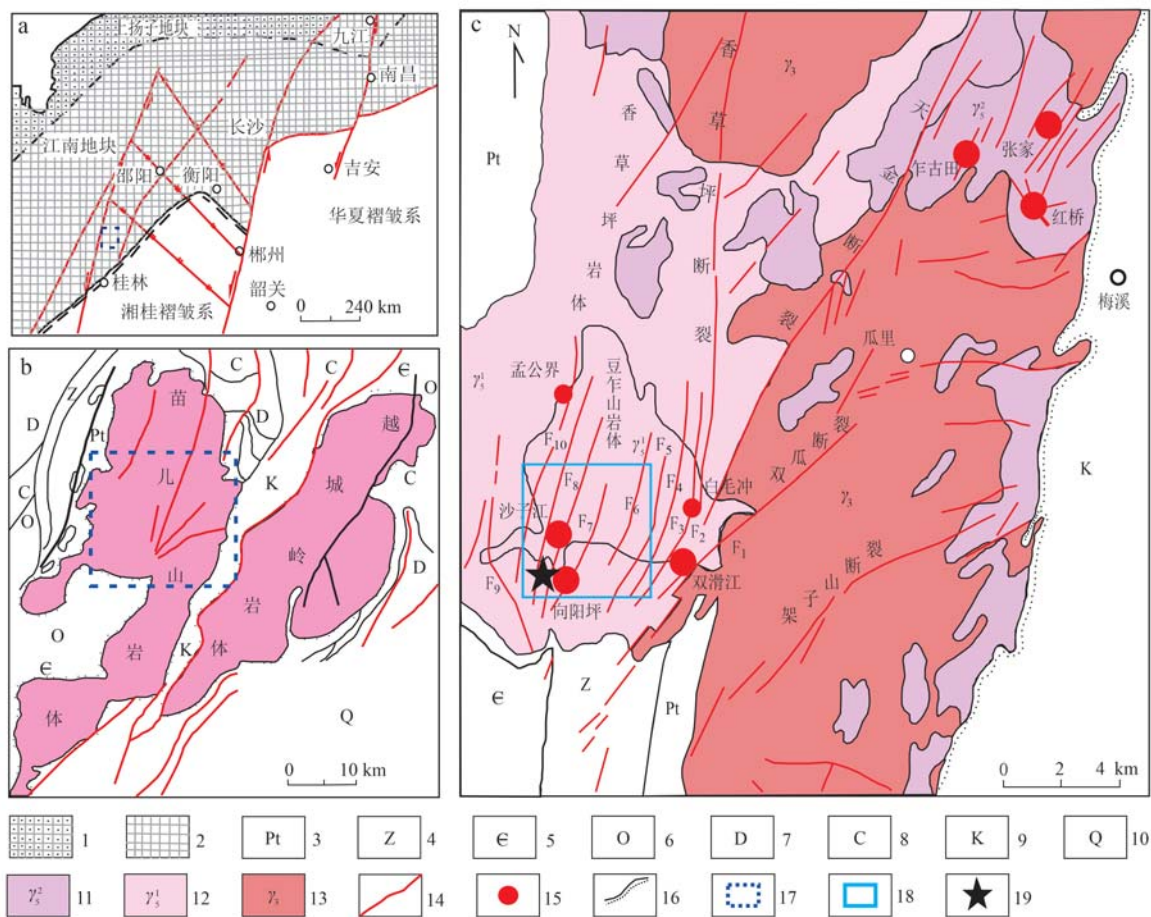


图 1 苗儿山大地构造位置图(a)、苗儿山岩体(b)及中段铀成矿区(c)地质简图(据谭双等, 2021)

Fig. 1 Tectonic position of Miaoershan(a) and geological sketch map of Miaoershan rock mass(b) and the middle part of uranium ore field(c) (modified after Tan Shuang *et al.*, 2021)

1—上扬子地块; 2—江南地块; 3—板溪群; 4—震旦系; 5—寒武系; 6—奥陶系; 7—泥盆系; 8—石炭系; 9—白垩系; 10—第四系; 11—燕山期花岗岩; 12—印支期花岗岩; 13—加里东期花岗岩; 14—断裂; 15—铀矿床; 16—地质界线; 17—苗儿山中段; 18—研究区; 19—取样位置

1—the Upper Yangtze Block; 2—the Jiangnan Block; 3—Banxi Group; 4—Sinian; 5—Cambrian; 6—Ordovician; 7—Devonian; 8—Carboniferous; 9—Cretaceous; 10—Quaternary; 11—Yanshanian granite; 12—Indosinian granite; 13—Caledonian granite; 14—fault; 15—uranium deposit; 16—geological boundary; 17—middle of Miaoershan; 18—study area; 19—sampling location

2 测试方法

对样品进行了岩相学观察和电子探针分析,测试工作均在东华理工大学核资源与环境国家重点实验室完成。仪器分别为 FEI-Nova NanoSEM40 型电镜和 JXA-8230 型电子探针。电子探针工作电压和电流分别为 15.0 kV 和 2.0×10^{-8} A, 束斑为 1 μm 。根据 EPMA 数据开展的绿泥石结构式计算,其标准为 28 个氧原子, Fe^{3+} 值计算参考郑巧荣(1983),即通过正电价总和与负电价总和平衡原理。考虑到绿泥石本身属于蚀变矿物,电子探针检测限较高,故采用钠、钾、钙氧化物含量总和是否大于 0.5 以判别绿泥石测点是否有效,本文所列数据已去除不符合要求的点。

3 绿泥石岩相学特征

通过系统的钻孔岩心编录和宏观手标本观察,可以发现本矿床中绿泥石化现象广泛发育,其与铀矿化的空间分布关系主要有以下两种:①绿泥石分

布在发育赤铁矿化、钾长石化的碎裂岩型矿体的上下盘(图 2a、2b);②绿泥石化矿石较为松散,绿泥石与沥青铀矿等铀矿物密切共生(图 2c、2d)。结合光学显微镜的详细观察,可将其归纳为黑云母蚀变型(I型)、裂隙充填型(II型)、铀矿物相关型(III型)和黏土矿物吸附铁镁转变型(IV型)。其中, I 型绿泥石显微镜下呈半自形-他形次棱角状、叶片状,整体呈黑云母形态,判断由矿前期热液交代黑云母蚀变而成,矿物缝隙及颗粒间产出钍石、赤铁矿、磷灰石等矿物(图 3a、3d); II 型绿泥石多以脉状形式充填于造岩矿物颗粒间,伴随有局部还原环境沉淀出的少量铀矿物和其他金属矿物(图 3b、3e); III 型绿泥石与铀矿物关系密切,由含矿热液蚀变黑云母而形成,但与 I 型绿泥石有所区别, III 型绿泥石多为他形,矿物自形程度较差、粒径较小,形状多为不规则状,周边多分布沥青铀矿、硅钙铀矿等铀矿物(图 3f),而根据矿物结构和绿泥石-铀矿物共生组合关系可以判断, II 型和 III 型绿泥石均为主成矿期热液流体作用的产物; IV 型绿泥石整体呈云雾状,晶形较差,多色性较弱,由黏土矿物与含矿热液共同作用后吸附其中的铁镁质,生成绿泥石,常与

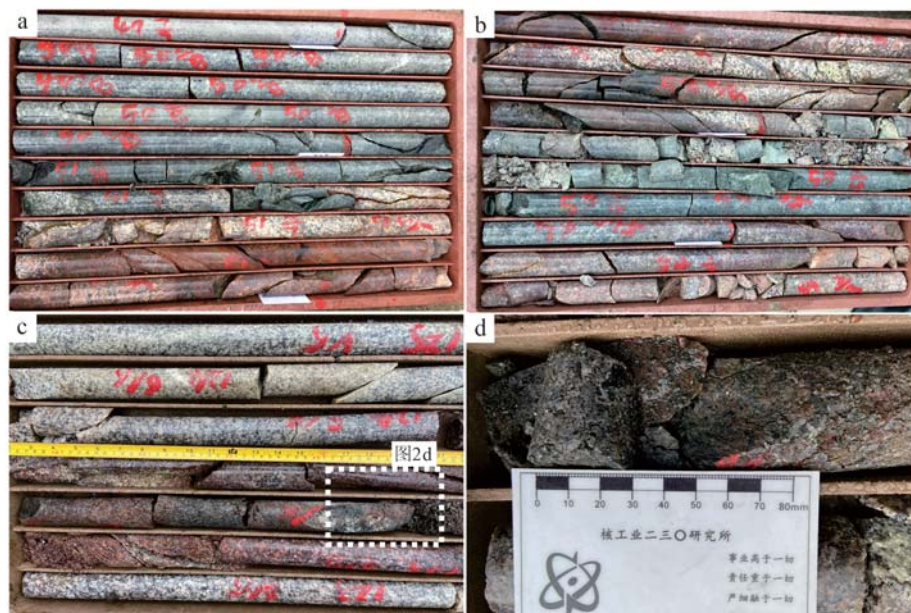


图 2 向阳坪铀矿床绿泥石化岩心照片

Fig. 2 Photos of chloritized cores from the Xiangyangping uranium deposit

a、b—首尾相连的岩心,其中暗红色为赤铁矿化的碎裂岩,见高品位铀矿化,矿体上下盘分别发育墨绿色绿泥石化现象;c—绿泥石化与铀矿物密切共生;d—矿石样品手标本,铀矿物和绿泥石紧密共生

a, b—the photographs of drill core, and the dark red position is hematitization cataclasite with high grade uranium mineralization. Hanging and heading side of the ore body developed the alteration of dark green chloritization; c—chlorites are closely associated with the uranium minerals; d—the photographs of hand specimen, chlorites are closely associated with the uranium minerals

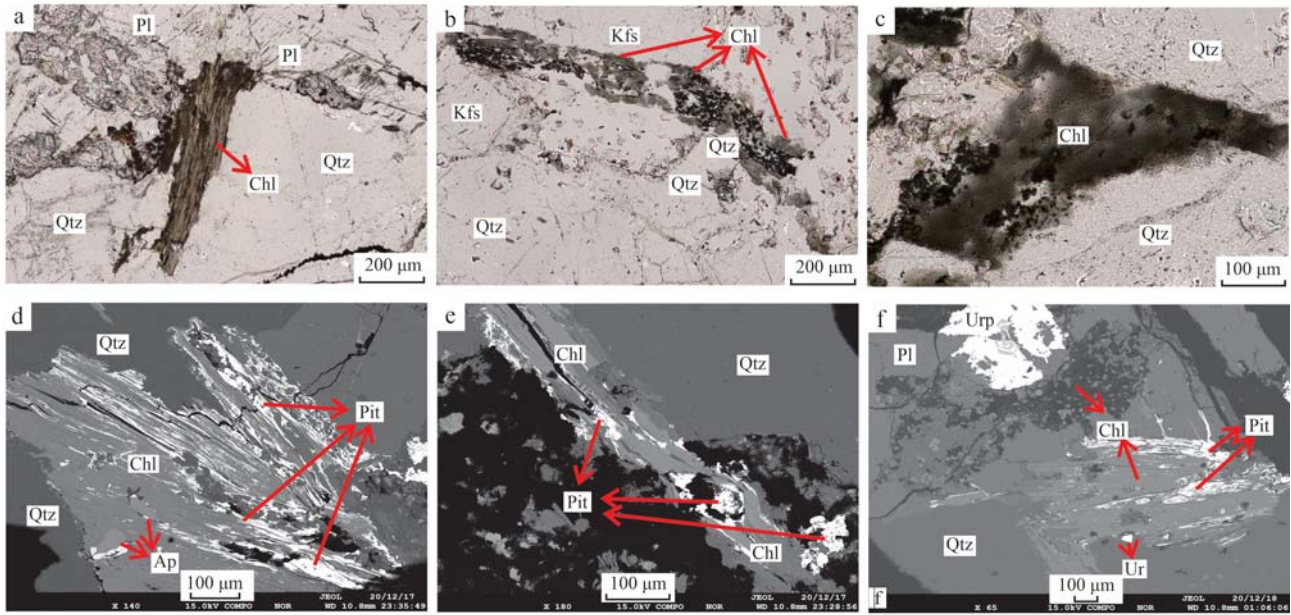


图3 向阳坪铀矿床各类型绿泥石岩相学特征

Fig. 3 Petrographic features of various types of chlorites from the Xiangyangping uranium deposit

a—黑云母绿泥石化, 呈黑云母的假像, 片状, 解理缝和粒间隙中常包含磷灰石、沥青铀矿等矿物(单偏光); b—沿长石、石英裂隙分布的绿泥石(单偏光); c—由大量黏土矿物吸附成矿期流体中的 Mg、Fe 质后向绿泥石、黑云母转变而成, 呈云雾状(单偏光); d—黑云母绿泥石化, 呈黑云母的假像, 裂隙间包含磷灰石和沥青铀矿(背散射); e—绿泥石一般呈脉状充填于长石、石英的裂隙间, 伴随有局部还原环境沉淀出的金属矿物和铀矿物(背散射); f—成矿期热液流体交代黑云母蚀变而成, 保留黑云母的假像, 粒径较小, 呈不规则状、鳞片状产出, 周围可见沥青铀矿、硅钙铀矿等铀矿物(背散射); Ap—磷灰石; Chl—绿泥石; Kfs—钾长石; Pit—沥青铀矿; Pl—斜长石; Qtz—石英; Urp—硅钙铀矿; Ur—晶质铀矿

a—flake-like chloritization biotite kept the biotite pseudomorph, apatite, pitchblende and other minerals filled in the cleavage crack and intergranular crystals (single polarized light); b—chlorite distributed along the fractures of feldspar and quartz (single polarized light); c—clay minerals transformed chlorite and biotite during the adsorption of Mg and Fe from the ore-forming fluid, which showed sheet cloudy (single polarized light); d—chloritization biotite, apatite, pitchblende and other minerals filled in the cleavage crack (backscatter); e—chlorite filled in the feldspar and quartz, and metal minerals and uranium minerals precipitated in local reducing environment (backscatter); f—the biotite was altered by mineralization period hydrothermal fluid, which surrounded by pitchblende and uranite, and kept the biotite pseudomorph, appeared in irregular (backscatter); Ap—apatite; Chl—chlorite; Kfs—potash feldspar; Pit—pitchblende; Pl—plagioclase; Qtz—quartz; Urp—uranite; Ur—uraninite

赤铁矿、磁铁矿和铀矿物伴生, 亦形成于成矿期(图3c)。

4 绿泥石化学成分特征

对4种不同类型绿泥石开展电子探针原位微区分析, 结果见表1。I类绿泥石 SiO_2 含量最高, 均值为25.95%, III类绿泥石最低, 均值为23.58%; Al_2O_3 含量差别不大, 4类绿泥石均值变化范围为20.67%~20.89%; FeO和MgO含量区别较大, I类绿泥石FeO、MgO分别为31.52%、5.89%, II类为32.82%、5.67%, III类为34.50%、6.01%, IV类为31.98%、5.65%。其中, 硅铝含量变化范围较小, 铁镁的质量分数变化相对较大, 指示研究区绿泥石矿

物存在较为普遍的铁镁相互置换作用。

表2为绿泥石测试数据以28个氧原子为基准计算的阳离子数和特征值。基于计算所得离子数, 进一步根据Deer等(1962)提出的铁-硅划分原则(图4)对所有绿泥石具体判断, 结果表明, 向阳坪铀矿床主体为铁镁绿泥石, 部分为蠕绿泥石, 含少量密绿泥石, 但都属于富铁绿泥石大类。其中, I型绿泥石主要为铁镁绿泥石和蠕绿泥石, II型绿泥石主要为铁镁绿泥石, III型绿泥石为铁镁绿泥石, IV型主要为铁镁绿泥石, 少量为密绿泥石。Inoue(1995)指出, 上述富铁绿泥石大类, 通常多形成于相对酸性的还原环境, 并与热液沸腾作用关系密切, 说明向阳坪铀矿床中相对酸性的还原环境更有利于铀的沉淀富集。

表1 向阳坪铀矿床中不同类型绿泥石的化学组成

 $w_B/\%$

Table 1 Electronic microprobe analyses of various types of chlorites from the Xiangyangping uranium deposit

类型	样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	F	Cl	Total	
I	XYP1-2	27.10	0.05	20.79	30.69	1.45	6.08	0.14	0.03	0.02	0.00	0.00	86.34	
	XYP1-4	26.95	0.04	20.84	29.57	1.35	6.34	0.23	0.01	0.01	0.00	0.00	85.33	
	XYP2-1	24.80	0.00	21.12	33.21	1.89	5.92	0.00	0.03	0.05	0.00	0.00	87.02	
	XYP3-1	24.33	0.11	20.60	30.75	2.00	5.71	0.00	0.20	0.06	0.34	0.02	83.97	
	XYP4-1	24.64	0.07	20.84	33.29	2.07	4.09	0.00	0.04	0.00	0.41	0.01	85.27	
	XYP4-2	24.71	0.08	21.11	32.03	2.08	6.13	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.01	86.18
	XYP4-3	24.39	0.00	20.43	32.65	1.99	5.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	85.09
	XYP4-5	24.62	0.00	21.10	32.93	2.14	5.83	0.13	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	86.76
	XYP5-1	27.28	0.07	20.27	29.91	1.08	6.12	0.20	0.04	0.10	0.00	0.00	0.04	85.10
	XYP5-2	29.23	0.20	20.07	30.04	0.87	5.60	0.41	0.00	0.08	0.16	0.00	0.00	86.60
	XYP5-4	26.86	0.00	21.11	30.90	1.43	6.11	0.20	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	86.64
	XYP6-1	26.18	0.10	21.26	31.61	1.65	6.39	0.02	0.06	0.09	0.00	0.00	0.00	87.36
	XYP6-3	26.21	0.10	21.40	31.75	1.52	6.47	0.04	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	87.57
	XYP6-4	26.50	0.30	20.27	31.56	1.35	5.67	0.15	0.04	0.19	0.00	0.00	0.01	86.04
XYP6-5	25.49	0.10	20.90	31.87	1.68	6.26	0.05	0.11	0.03	0.00	0.00	0.01	86.49	
II	XYP1-6	24.55	0.18	20.74	33.63	1.66	5.48	0.05	0.04	0.02	0.00	0.00	86.35	
	XYP7-1	24.82	0.32	20.94	32.95	1.60	5.52	0.14	0.07	0.04	0.00	0.01	86.40	
	XYP7-3	24.51	0.06	20.95	33.34	1.69	5.47	0.04	0.06	0.01	0.00	0.00	86.12	
	XYP8-8	26.23	0.06	21.14	33.80	1.35	5.61	0.18	0.00	0.03	0.00	0.01	88.41	
	XYP8-9	25.40	0.04	20.75	33.24	1.85	5.74	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	87.06	
	XYP9-6	25.73	0.05	20.59	33.83	1.80	3.61	0.04	0.04	0.02	0.00	0.01	85.71	
	XYP9-8	24.38	0.22	21.08	32.92	1.91	5.51	0.08	0.04	0.01	0.00	0.00	86.14	
	XYP9-9	24.53	0.08	21.62	33.78	1.60	4.98	0.06	0.00	0.01	0.00	0.00	86.66	
	XYP9-10	25.43	0.05	20.83	32.60	1.81	6.29	0.04	0.05	0.04	0.00	0.01	87.14	
	XYP9-11	26.42	0.03	19.22	30.90	1.44	6.84	0.30	0.07	0.03	0.00	0.00	85.25	
	XYP11-4	25.02	0.26	20.99	32.56	1.90	5.92	0.02	0.04	0.02	0.30	0.01	86.90	
	XYP11-6	25.39	0.06	21.50	32.87	1.71	6.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	88.01	
	XYP12-8	24.64	0.05	19.89	31.61	2.03	5.72	0.25	0.05	0.02	0.42	0.00	84.50	
	XYP12-9	24.67	0.04	20.75	32.00	2.17	6.10	0.08	0.04	0.02	0.00	0.01	85.88	
XYP12-5	24.31	0.05	20.62	32.33	2.06	5.75	0.08	0.06	0.03	0.00	0.01	85.28		
III	XYP6-16	23.83	0.02	20.49	35.15	1.33	5.52	0.04	0.00	0.02	0.57	0.01	86.75	
	XYP6-18	24.03	0.01	20.78	34.88	1.46	6.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	87.30	
	XYP7-22	23.65	0.06	20.52	34.86	1.46	5.53	0.08	0.02	0.00	0.00	0.00	86.17	
	XYP8-10	23.91	0.03	20.55	33.35	1.23	5.97	0.13	0.00	0.00	0.58	0.00	85.49	
	XYP8-12	23.00	0.09	20.85	34.57	1.28	6.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	85.81	
	XYP9-18	23.30	0.05	20.88	34.46	1.45	5.80	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	85.97	
	XYP9-23	23.86	0.02	20.73	34.15	1.40	6.62	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	86.80	
	XYP13-1	23.64	0.02	20.13	34.60	1.05	6.01	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	85.50	
	XYP13-3	24.52	0.04	20.53	32.01	0.87	6.79	0.04	0.00	0.05	0.00	0.01	84.86	
	XYP13-4	23.15	0.03	20.84	35.09	1.38	5.91	0.04	0.04	0.00	0.00	0.01	86.49	
	XYP13-5	23.19	0.05	21.04	35.49	1.40	5.77	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	87.00	
	XYP13-6	23.36	0.02	20.02	34.29	1.36	5.82	0.11	0.06	0.02	0.00	0.00	85.06	
	XYP13-7	23.92	0.01	20.52	34.97	1.29	5.87	0.11	0.01	0.00	0.00	0.00	86.70	
	XYP13-9	23.38	0.09	21.14	35.05	1.21	6.21	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	87.11	
XYP14-8	23.02	0.07	21.03	34.63	1.22	6.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	86.10		
IV	XYP15-1	24.34	0.05	20.52	32.17	1.66	5.29	0.14	0.13	0.05	0.00	0.03	84.37	
	XYP15-2	24.30	0.09	20.59	32.59	1.62	5.55	0.15	0.11	0.04	0.00	0.01	85.06	
	XYP15-4	24.99	0.23	21.04	32.84	1.78	5.49	0.15	0.13	0.04	0.00	0.02	86.72	
	XYP15-6	23.75	0.14	19.95	31.87	1.86	5.34	0.19	0.08	0.04	0.00	0.02	83.24	
	XYP15-9	24.75	0.20	20.86	32.66	1.98	5.37	0.18	0.12	0.06	0.00	0.03	86.19	
	XYP16-3	24.67	0.01	21.12	32.37	1.87	5.99	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	86.05	
	XYP16-4	25.30	0.00	20.69	31.66	1.74	5.87	0.09	0.00	0.05	0.00	0.00	85.40	
	XYP16-5	24.61	0.03	20.70	31.92	1.82	5.58	0.14	0.04	0.04	0.00	0.01	84.89	
	XYP16-7	24.71	0.04	20.85	32.97	1.94	5.57	0.08	0.05	0.01	0.00	0.00	86.22	
	XYP16-9	26.11	0.05	21.29	31.41	1.41	5.96	0.07	0.00	0.01	0.00	0.01	86.30	
	XYP17-5	26.05	0.02	21.37	29.84	1.33	6.03	0.12	0.05	0.01	0.00	0.00	84.82	
	XYP17-6	24.79	0.02	21.11	32.61	2.06	5.92	0.01	0.05	0.03	0.00	0.00	86.61	
	XYP18-4	24.62	0.05	20.89	32.89	1.96	5.83	0.02	0.00	0.02	0.00	0.02	86.29	
	XYP19-3	27.05	0.01	21.44	30.34	1.80	4.90	0.18	0.01	0.03	0.00	0.00	85.76	
XYP20-1	24.80	0.06	21.00	31.63	1.96	6.03	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	85.54		

注: 绿泥石烧失主要为 H₂O 及其他易挥发分, 经换算, H₂O 通常可达 10% 左右。

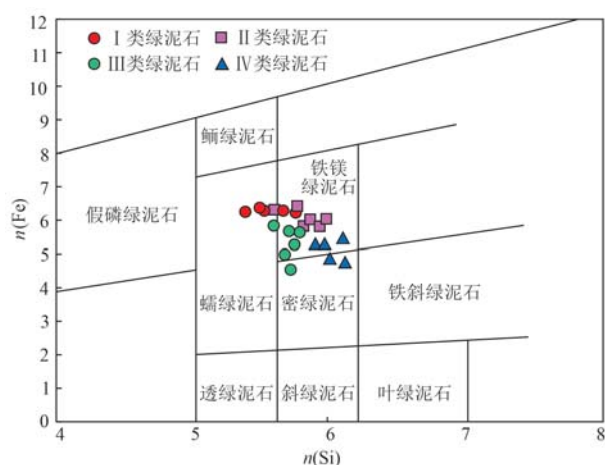


图4 向阳坪铀矿床中不同类型绿泥石硅铁分类图解

(据 Deer *et al.*, 1962)

Fig. 4 The classification graphic for various types of chlorites in the Xiangyangping uranium deposit (modified from Deer *et al.*, 1962)

5 讨论

5.1 绿泥石的原岩类型判别

Laird (1988) 利用绿泥石的镁、铝、铁离子数之间的关系, 判别绿泥石与其母岩的关系, 具体表现为 $Al/(Al+Mg+Fe) > 0.35$, 原岩为泥质岩, 反之, 则原岩为铁镁质岩石。向阳坪铀矿床各类型绿泥石 $Al/(Al+Mg+Fe)$ 值介于 0.39~0.44 之间, 平均为 0.41, 均大于 0.35, 且 $Mg/(Fe+Mg)$ 与 $Al/(Al+Mg+Fe)$ 具较弱的负相关性 (图 5a), 指示向阳坪铀矿床不同成因和产状的绿泥石都来源于泥质岩。此外, 前人研究认为, 基性岩中绿泥石 $Mg/(Fe+Mg)$ 一般要高于相对含铁的基底地层, 可用于指示绿泥石母岩的基性岩浆岩成因和富铁沉积岩成因 (Zang and Fyfe, 1995; 张展适等, 2007; 夏菲等, 2016; 谭双等, 2017)。向阳坪铀矿床绿泥石 $Mg/(Fe+Mg)$ 变化范围为 0.16~0.28, 均值为 0.24, 相对较低, 更接近于古老基底地层, 说明向阳坪铀矿床绿泥石化花岗岩源于沉积岩母岩, 这与谢晓华等 (2008)、王正庆 (2018) 认为区内赋矿豆乍山岩体、香草坪岩体由华夏板块元古代基底泥质岩经部分熔融形成的观点相一致。

5.2 绿泥石各离子数的特征参数

Xie 等 (1997) 认为, 如果绿泥石离子互换关系是典型的钙镁闪石型, 则 Al^{IV} 与 Al^{VI} 更趋于 1:1 (相

关系系数=0.95)。向阳坪铀矿床绿泥石的 Al^{IV} 变化范围为 1.66~2.74, 均值 2.39, Al^{VI} 变化范围为 2.87~3.58, 均值 3.13。数据整体表现为 $Al^{IV} < Al^{VI}$, Al^{IV}/Al^{VI} 值变化范围为 0.48~0.90, $Al^{VI} = -0.6551 \times Al^{IV} + 4.698$, 指示向阳坪铀矿床绿泥石可能不仅仅为单一的钙镁闪石型。通常, $Al^{IV} - Si^{4+}$ 互换过程导致的电荷差需要 Al^{VI} 在八面体上对铁或镁互换, 从而使得电荷重新平衡 (谭双等, 2017; 吴德海等, 2018)。向阳坪矿床各类绿泥石的 Al^{VI}/Al^{IV} 均大于 1, 指示各类绿泥石 Fe^{3+} 含量较低, 可能归因为 Al^{VI} 在八面体上对铁或镁的互换。此外, $(Al^{VI} + Fe) - Mg$ 图解亦能够说明绿泥石的元素替换关系, 如图 5b 所示, 向阳坪铀矿床绿泥石数据点呈现较明显的线性负相关关系, 指示绿泥石八面体位置主要被 Al^{VI} 、铁和镁等元素替换, 且 Al^{VI} 和铁均可替换镁。

不仅如此, Xie 等 (1997) 研究还显示, 绿泥石阳离子与镁之间是否具有较好的线性关系, 能够指示流体对原岩的热液蚀变改造。向阳坪铀矿床中绿泥石 Si-Mg-Fe- Al^{IV} 四元协变图解 (图 5c~5f) 表明, Mg-Fe 和 Mg- Al^{VI} 呈现明显的负相关性, 线性关系良好, Mg-Si 线性关系显示出弱负相关性, Mg- Al^{IV} 线性关系不明显, 指示向阳坪铀矿床中的绿泥石可能经历了多期次流体作用。同时也说明, 研究区绿泥石八面体位置上以 Fe 置换 Mg 为主, 可能产于含铁高的背景中, 与前文提及的富铁绿泥石相符。

在 $Al^{IV} - Fe - Mg$ 协变关系图解中 (图 5g、5h), Al^{IV} 与 $Fe/(Fe+Mg)$ 之间表现为较弱的正相关关系, 而 Al^{IV} 与 $Mg/(Fe+Mg)$ 之间表现为相反的负相关关系, 反映在 Al^{IV} 对 Si 互换的同时, 还伴随着八面体上铁对镁的互换。而此过程导致的绿泥石结构变化, 将会引起更加强烈的 $Al^{IV} - Si$ 替换作用, 绿泥石化蚀变也随之强烈。

5.3 绿泥石形成的物理化学条件

不少学者曾针对绿泥石形成时的物理化学条件及其成分之间的关系进行探索, 本文根据经验公式 $d_{001} = 14.339 - 0.115Al^{IV} - 0.0201Fe^{2+}$ 计算面网间距 d_{001} 值, 并在此基础上, 利用 $t = (14.379 - d_{001}) / 0.001$ 计算绿泥石温度 ($^{\circ}C$) (表 2) (Bryndzia and Scott, 1987; Rausell-Colom, 1991; Nieto, 1997; Battaglia, 1999)。向阳坪铀矿床 I 类绿泥石温度变化范围为 190~244 $^{\circ}C$, 平均值为 226 $^{\circ}C$; II 类温度稍高, 变化范围为 216~247 $^{\circ}C$, 平均值为 238 $^{\circ}C$; III 类

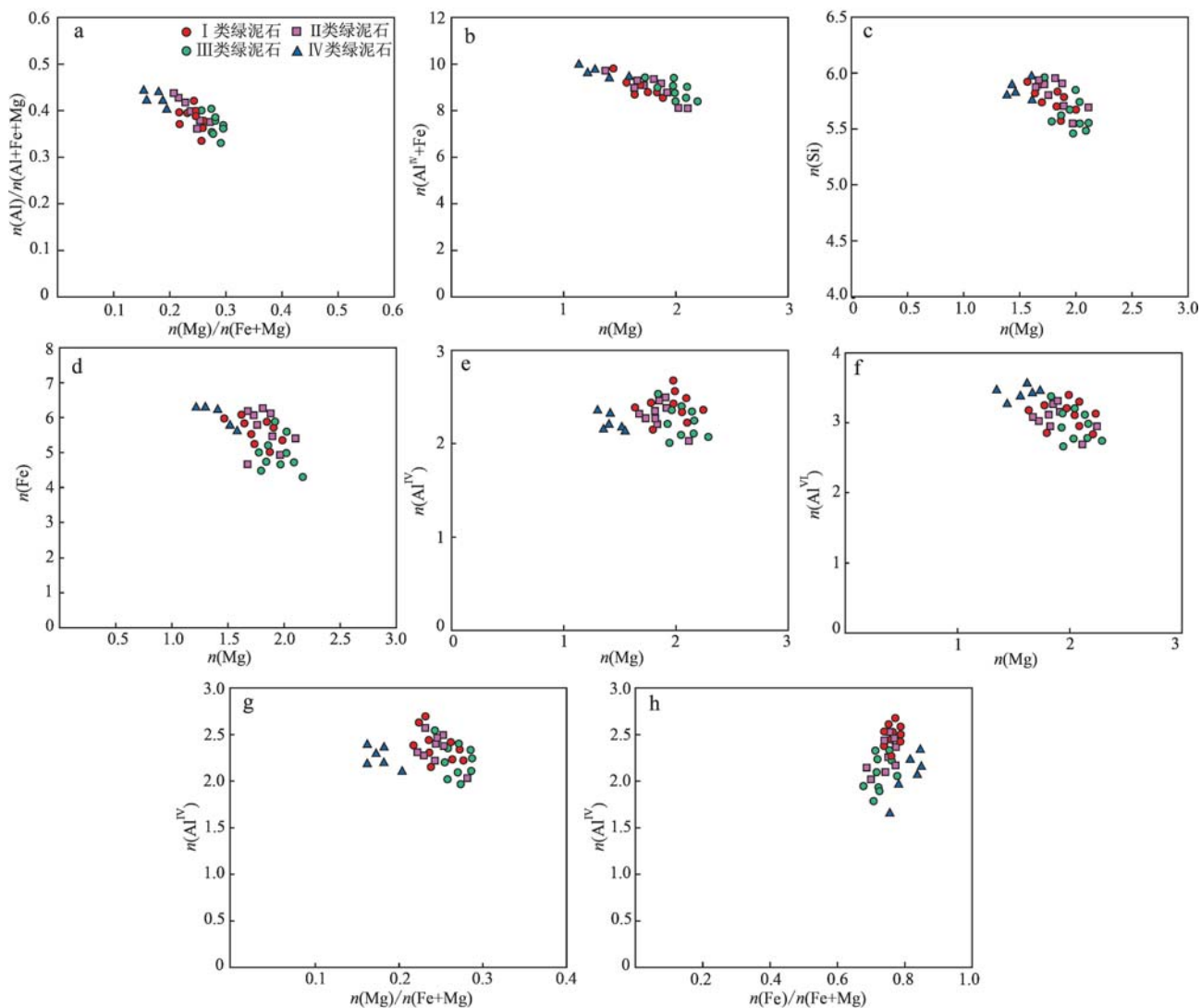


图5 向阳坪铀矿床绿泥石中主要阳离子间的相关关系图

Fig. 5 Correlation of main cations in chlorites from the Xiangyangping uranium deposit

温度最高, 变化范围为 240 ~ 265℃, 平均值为 257℃; IV类温度变化范围为 212 ~ 243℃, 平均值为 236℃。以上数据指示 4 类绿泥石均为中低温热液蚀变作用的产物(图 6), 与铀矿物关系密切的 III 型绿泥石的形成温度最高(均值 257℃), 但也仍处于中低温范围, 间接表明本矿床热液铀成矿条件也为中低温环境, 与石少华等(2011)和王正庆(2018)对区内成矿阶段石英中流体包裹体测温结果一致, 而铀成矿作用可能对 III 型绿泥石成分产生了一定的影响。此外, 向阳坪铀矿床中绿泥石主要为铁镁绿泥石, 相对富铁, 反映出相对还原的成矿条件, 而绿泥石广泛出现 Al^{IV} -Si、Fe-Mg 互换, 进一步指示成矿流体中 Fe、Mg、Al 元素含量较高。

5.4 绿泥石形成机制及其与铀成矿的关系

绿泥石化现象在热液蚀变带中广泛发育, 被认为是华南地区热液铀成矿的关键识别标志之一。根据前文所述向阳坪绿泥石化型铀矿石中, 绿泥石与铀矿物的共生组合关系以及岩相学结构构造特征, 可以判断 I 型绿泥石为矿前期热液流体对黑云母进行交代蚀变的产物, II、III 和 IV 型 3 类绿泥石均为矿床主成矿期热液流体发生充填、蚀变交代、黏土矿物吸附等作用的产物, 与沥青铀矿、铀钍石等铀矿物关系密切。前人研究将绿泥石成因总体概括为溶蚀-结晶和溶蚀-迁移-结晶两种(Laird, 1988; Zang and Fyfe, 1995; Bevins *et al.*, 1991; 张展适等, 2007; 吴德海等, 2018)。溶蚀-结晶通常发生于成矿作用之前,

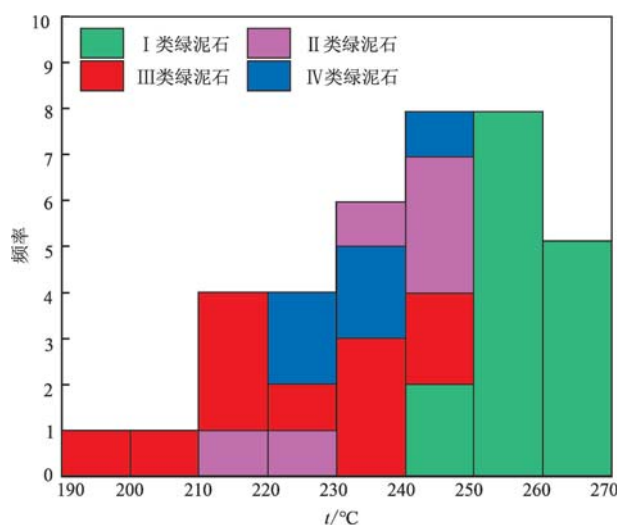


图6 向阳坪铀矿床绿泥石温度柱状图

Fig. 6 The histogram of formation temperatures for chlorites from the Xiangyangping uranium deposit

分布在矿体的上下盘,如I型绿泥石(图2a、2b),具体表现为绿泥石交代各类长石、黑云母等花岗岩主要造岩矿物,蚀变交代记录明显(图3a)。溶蚀-迁移-结晶则多发生于成矿期阶段,此种绿泥石与铀矿物密切共生(图2c、2d),呈细脉状沿各矿物裂隙生长(图2e、2f、3b),如II型、III型和IV型绿泥石。绿泥石化与铀成矿的关系主要表现在以下几个方面:

(1) 改变赋矿岩体物理化学性质。I型绿泥石化形成过程中,由于热液流体与岩石相互作用,改变了赋矿岩体的物理化学性质,使豆乍山和香草坪岩体花岗岩变得松散,孔隙度和渗透率都有所增加(图2c、2d),这为后续成矿期含矿热液提供了运移通道和有利沉积成矿的环境(章邦桐,1994;张展适等,2007;Wu *et al.*, 2019)。

(2) 指示铀成矿环境。II型、III型和IV型绿泥石与铀矿物紧密共生,形成条件与铀成矿相似,含铀流体在还原环境下,其体系平衡易遭受破坏,引起铀与对应的阴离子解离,从而以四价铀的形式沉淀,并被绿泥石等黏土矿物吸附。同时,绿泥石形成温度也可间接指示流体温度,说明华南花岗岩型铀矿化普遍发育中低温热液蚀变(章邦桐,1994;胡瑞忠等,2007;石少华等,2011;王正庆,2018)。

(3) 改变铀在岩石中的赋存状态。含铀流体沿豆乍山、香草坪岩体内的各类裂隙活动,热液对云母、长石等硅酸盐矿物作用,形成围岩蚀变,生成绿泥石。在此过程中,热液作用也对不易活动的四价

铀进行氧化,形成更易迁移的六价铀,为后续铀矿化确保了物质基础。

6 结论

(1) 向阳坪铀矿床中绿泥石可区分为黑云母蚀变型(I型)、裂隙充填型(II型)、铀矿物相关型(III型)和黏土矿物吸附铁镁质转变型(IV型)等4种。其中,I型绿泥石为矿前期形成,与铀成矿相关性稍弱,II型、III型和IV型绿泥石为主成矿期热液流体的产物,与铀矿化密切相关,而III型绿泥石可作为该地区铀成矿作用指示性矿物标志之一。

(2) 向阳坪铀矿床中绿泥石以铁镁绿泥石为主,部分为蠕绿泥石,少数为密绿泥石,均属于富铁绿泥石。

(3) 向阳坪铀矿床绿泥石温度变化范围为190~265℃,指示其为中低温热液蚀变作用的产物。

(4) 绿泥石化为铀成矿提供了所需的还原环境,使活化铀元素沉淀形成沥青铀矿等铀矿物。

References

- Battaglia S. 1999. Applying X-ray geothermometer diffraction to a 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 of Metamorphic Geology*, 9(6): 711~721.
- Bryndzia L T and Scott S D. 1987. The composition of chlorite as a function of sulfur and oxygen fugacity: An experimental study[J]. *American Journal of Science*, 287(1): 50~76.
- Cathelineau M. 1988. Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature[J]. *Clay Minerals*, 23(4): 471~485.
- Cathelineau M and Nieva D. 1985. A chlorite solid solution geothermometer the Los Azufres (Mexico) geothermal system[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 91(3): 235~244.
- Chen Qi, Gao Xiang, Tan Shuang, *et al.* 2020. Geochemical characteristics and indicative significance of hydrothermal vein in the Xiangyangping uranium ore deposit, middle segment of Miaoer Mountain, northern Guangxi[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 39(6): 795~807 (in Chinese with English abstract).
- Chen Qi, Tan Shuang, Wan Jianjun, *et al.* 2021. EPMA chemical U-Th-Pb dating of pitchblende in Xiangyangping uranium ore deposit, middle segment of Miaoershan and its geological significance[J]. *Journal*

- of East China University of Technology (Natural Science), 44(6): 519~526 (in Chinese with English abstract).
- Chen Qi, Xiao Jianjun, Fan Liting, *et al.* 2013. Geochemical characteristics of trace and rare earth elements in Xiangyangping uranium deposit of Guangxi[J]. Uranium Geology, 29(3): 153~161 (in Chinese with English abstract).
- Cuney M, Emetz A, Mercadier J, *et al.* 2012. Uranium deposits associated with Na-metasomatism from central Ukraine: A review of some of the major deposits and genetic constraints[J]. Ore Geology Reviews, 44: 82~106.
- De Caritat P, Hutcheon I and Walshe J L. 1993. Chlorite geothermometry: A review[J]. Clays and Clay Minerals, 41(2): 219~239.
- Deer W A, Howie R A and Iussman J. 1962. Rock-Forming Minerals: Sheet Silicates[M]. London: Longman, 270.
- Gould K, Pe-Piper G and Piper D J W. 2010. Relationship of diagenetic chlorite rims to depositional facies in Lower Cretaceous reservoir sandstones of the Scotian Basin[J]. Sedimentology, 57(2): 587~610.
- Grigsby J D. 2001. Origin and growth mechanism of authigenic chlorite in sandstones of the lower Vicksburg formation, South Texas[J]. Journal of Sedimentary Research, 71(1): 27~36.
- Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Peng Jiantang, *et al.* 2007. Some problems concerning relationship between Mesozoic-Cenozoic lithospheric extension and uranium metallogenesis in South China[J]. Mineral Deposits, 26(2): 139~152 (in Chinese with English abstract).
- Huang Hongye, Xiao Jianjun, Ouyang Pingning, *et al.* 2008. Geochemical characteristics statistical analysis-an example from the altered tectonic type uranium deposit in Xiangyangping, Guangxi Province[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 24(3): 211~216 (in Chinese with English abstract).
- Inoue A. 1995. Formation of clay minerals in hydrothermal environments [A]. Velde B. Origin and Mineralogy of Clays[C]. Berlin: Springer, 268~300.
- Laird J. 1988. Chlorites: Metamorphic petrology[A]. Bailey S W. Hydrous Phyllosilicates (Exclusive of Micas) [C]. Mineralogical Society of America, 405~453.
- Li Wuwei, Wang Gan, Chen Weifeng, *et al.* 2010. Geochemical and chronological characteristics of Xiangcaoping granite pluton in Miaoershan area[J]. Uranium Geology, 26(4): 215~227 (in Chinese with English abstract).
- Li Wuwei, Wang Gan, Xu Laisheng, *et al.* 2011. Ore-controlling pattern and mechanism of strike-slip fault in Shazijiang uranium deposit[J]. Uranium Geology, 27(3): 146~151 (in Chinese with English abstract).
- Nieto F. 1997. Chemical composition of metapelitic chlorites: X-ray diffraction and optical property approach[J]. European Journal of Mineralogy, 9(4): 829~842.
- Ouyang Pingning, Huang Manxiang, Liu Xinyang, *et al.* 2012. Bed fault characteristic of primary halos and prospecting significance in Xiangyangping Uranium Deposit[J]. Uranium Geology, 28(2): 78~83 (in Chinese with English abstract).
- Rausell-Colom J A, Wiewiora A and Matesanz E. 1991. Relation between composition and d_{001} for chlorite [J]. American Mineralogist, 76: 1373~1379.
- Shi Shaohua, Hu Ruizhong, Wen Hanjie, *et al.* 2011. A tentative discussion on fluid inclusions in quartz veins of Shazijiang uranium ore deposit, northern Guangxi[J]. Mineral Deposits, 30(1): 33~44 (in Chinese with English abstract).
- Tan Shuang, Chen Qi, Wan Jianjun, *et al.* 2021. Characteristics of uranium ore and uranium occurrence state from Xiangyangping uranium deposit, middle segment of Miaoershan [J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 44(6): 527~539 (in Chinese with English abstract).
- Tan Shuang, Liu Chengdong, Li Zhiwen, *et al.* 2017. Characteristics and geological significance of chlorite in Baishuizhai area, Xiashuang uranium ore[J]. Science Technology and Engineering, 17(14): 7~15 (in Chinese with English abstract).
- Tóth T, Horváth D and Tóth A. 2007. Thermal effects in the density fingering of the chlorite-tetrathionate reaction[J]. Chemical Physics Letters, 442(4-6): 289~292.
- Wang Zhengqing. 2018. Metallogenic Mechanism of Granite-related Uranium deposits in the Miaoershan Batholith, Guangxi Province [D]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology, 1~185 (in Chinese with English abstract).
- Wu Dehai. 2020. Geochemical Characteristics of Hydrothermal Alteration and Uranium Mineralization in Mianhuakeng Uranium Deposit, Northern Guangdong Province [D]. Nanchang: East China University of Technology, 1~141 (in Chinese with English abstract).
- Wu Dehai, Pan Jiayong, Xia Fei, *et al.* 2018. Characteristics and formation conditions of chlorite in the Shangjiao uranium deposit in the Southern Jiangxi Province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 32(4): 393~404 (in Chinese with English abstract).
- Wu D H, Pan J Y, Xia F, *et al.* 2019. The Mineral Chemistry of chlorites and its relationship with uranium mineralization from Huangsha uranium mining Area in the Middle Nanling Range, SE China[J]. Minerals, 9(3): 199. doi: <https://doi.org/10.3390/min9030199>.
- Wu Kunming, Li Dayan, Chen Qi, *et al.* 2016. Geological features of Xiangyangping uranium deposit in Guangxi[J]. Uranium Geology, 32(4): 224~229 (in Chinese with English abstract).
- Xia Fei, Meng Hua, Nie Fengjun, *et al.* 2016. Characteristics of chlorite from the Nalinggou uranium deposit in the Ordos Basin and its geolo-

- gical significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(12): 3 473~3 482 (in Chinese with English abstract).
- Xie X G, Byerly G R and Ferrell Jr R E. 1997. II b trioctahedral chlorite from the Barberton greenstone belt: Crystal structure and rock composition constraints with implications to geothermometry[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 126(3): 275~291.
- Xie Xiaohua, Chen Weifeng, Zhao Kuidong, *et al.* 2008. Geochemical characteristics and geochronology of the Douzhashan granite, north-eastern Guangxi Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1 302~1 312(in Chinese with English abstract).
- Zang W and Fyfe W S. 1995. Chloritization of the hydrothermally altered bedrock at the Igarape Bahia gold deposit, Carajas, Brazil[J]. *Mineral Deposita*, 30(1): 30~38.
- 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 Bangtong, Wu Junqi, Qiu Zhili, *et al.* 1990. On the relationship between hydrothermal alteration and uranium enrichment[J]. *Geological Review*, 36(3): 238~244(in Chinese with English abstract).
- 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 with English abstract).
- Zheng Qiaorong. 1983. Calculation of the Fe and Fe contents in silicate and Ti-Fe oxide minerals from EMPA data[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 3(1): 55~62(in Chinese with English abstract).
- Zhong Fujun, Pan Jiayong, Xu You, *et al.* 2017. Mineral chemistry of biotites and chlorites from Huangsha uranium mining area in the Middle Nangling Range: Constraints on petrogenesis and uranium mineralization[J]. *Geological Journal of China Universities*, 23(4): 575~590(in Chinese with English abstract).
- 1(1): 81~90.
- 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 等. 2007. 华南地区中生代以来岩石圈伸展及其与铀成矿关系研究的若干问题[J]. *矿床地质*, 26(2): 139~152.
- 黄宏业, 肖建军, 欧阳平宁, 等. 2008. 基于多元统计分析的微量元素地球化学特征分析——以广西资源县向阳坪地区构造蚀变岩型铀矿为例[J]. *地质找矿论丛*, 24(3): 211~216.
- 李妩巍, 王 敢, 陈卫峰, 等. 2010. 香草坪花岗岩体年代学和地球化学特征[J]. *铀矿地质*, 26(4): 215~227.
- 李妩巍, 王 敢, 许来生, 等. 2011. 沙子江铀矿床走滑构造控矿规律及控矿机制[J]. *铀矿地质*, 27(3): 146~151.
- 欧阳平宁, 黄满湘, 刘鑫扬, 等. 2012. 向阳坪铀矿床断裂构造原生晕特征及找矿意义[J]. *铀矿地质*, 28(2): 78~83.
- 石少华, 胡瑞忠, 温汉捷, 等. 2011. 桂北沙子江铀矿床流体包裹体初步研究[J]. *矿床地质*, 30(1): 33~44.
- 谭 双, 陈 琪, 万建军, 等. 2021. 苗儿山中段向阳坪铀矿床矿石特征及铀的赋存状态[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 44(6): 527~539.
- 谭 双, 刘成东, 李志文, 等. 2017. 下庄铀矿田白水寨地区绿泥石特征及其地质意义[J]. *科学技术与工程*, 17(14): 7~15.
- 王正庆. 2018. 广西苗儿山花岗岩型铀矿床成矿机制研究[D]. 北京: 核工业北京地质研究院.
- 吴德海. 2020. 粤北棉花坑铀矿床热液蚀变矿物地球化学特征与铀成矿作用研究[D]. 南昌: 东华理工大学.
- 吴德海, 潘家永, 夏 菲, 等. 2018. 赣南上寮铀矿床绿泥石特征与形成环境[J]. *矿物学报*, 32(4): 393~404.
- 吴昆明, 李大雁, 陈 琪, 等. 2016. 广西向阳坪铀矿床成矿地质特征[J]. *矿物学报*, 38(4): 224~229.
- 夏 菲, 孟 华, 聂逢君, 等. 2016. 鄂尔多斯盆地纳岭沟铀矿床绿泥石特征及地质意义[J]. *地质学报*, 90(12): 3 473~3 482.
- 谢晓华, 陈卫峰, 赵葵东, 等. 2008. 桂东北豆乍山花岗岩年代学与地球化学特征[J]. *岩石学报*, 24(6): 1 302~1 312.
- 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.
- 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.
- 章邦桐, 吴俊奇, 丘志力, 等. 1990. 论热液蚀变与铀成矿富集作用的关系[J]. *地质论评*, 36(3): 238~244.
- 郑巧荣. 1983. 由电子探针分析值计算 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} [J]. *矿物学报*, 3(1): 55~62.
- 钟福军, 潘家永, 许 幼, 等. 2017. 南岭中段黄沙铀矿区黑云母与绿泥石的矿物化学特征及其对成岩成矿的约束[J]. *高校地质学报*, 23(4): 575~590.

附中文参考文献

- 陈 琪, 高 翔, 谭 双, 等. 2020. 桂北苗儿山中段向阳坪铀矿床热液脉体地球化学特征及其指示意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 39(6): 795~807.
- 陈 琪, 谭 双, 万建军, 等. 2021. 苗儿山中段向阳坪铀矿床沥青铀矿 U-Th-Pb 化学定年及其地质意义[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 44(6): 519~526.
- 陈 琪, 肖建军, 范立亭, 等. 2013. 广西向阳坪铀矿床微量元素和稀土元素地球化学特征[J]. *铀矿地质*, 29(3): 153~161.
- 杜乐天. 1986. 碱交代作用地球化学原理[J]. *中国科学(B辑)*,