

粤北书楼丘矿床绿泥石成分特征及其指示意义

孙国权¹, 范洪海², 高永宝¹, 庞雅庆², 高飞², 薛春纪³, 范堡程¹

(1. 中国地质调查局 西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100; 2. 核工业北京地质研究院 铀资源勘查与评价技术重点实验室, 北京 100029; 3. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 绿泥石化是诸广南部长江岩体内书楼丘矿床中典型的成矿早期中低温热液蚀变类型。本文利用光学显微镜、电子探针和扫描电镜等手段对矿体外围水平蚀变带内绿泥石进行了综合研究, 根据绿泥石的岩相学特征和成因等, 将其划分为裂隙充填型绿泥石、黑云母蚀变型绿泥石、长石蚀变型绿泥石、白云母蚀变型绿泥石和球粒状绿泥石 5 种类型。这 5 种绿泥石结构类型相同, 均为三八面体富铁型绿泥石, 分别属于蠕绿泥石、铁镁绿泥石、鲕绿泥石 3 个种属。5 种类型的绿泥石可能形成于成矿早期同一期流体作用之中, 形成温度在 219~282°C 之间, 成矿系统的 $\log f_{O_2}$ 值为 -47.74~-43.69。综合区域上前人研究成果, 认为成矿早期流体是以幔源物质为主的壳幔混合流体, 其形成与区域上基性岩脉的侵入作用有关, 同时, 成矿早期流体具有强还原性, 为成矿系统提供了还原性化学障, 致使主成矿期流体中携带的 U^{6+} 被还原沉淀成矿。

关键词: 绿泥石; 地质特征; 地质温度计; 氧逸度; 书楼丘矿床

中图分类号: P578.962

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)05-1313-15

Composition characteristics and indicative significance of chlorites in the Shulouqiu deposit, northern Guangdong

SUN Guo-quan¹, FAN Hong-hai², GAO Yong-bao¹, PANG Ya-qing², GAO Fei², XUE Chun-ji³ and FAN Bao-cheng¹

(1. Xi'an Center of Mineral Resources Survey of China Geological Survey, Xi'an 710100, China; 2. CNNC Key Laboratory of Uranium Resource Exploration and Evaluation Technology, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Chloritization is a typical middle-low temperature hydrothermal alteration type of early ore-forming stage in Shulouqiu deposit of Changjiang rock mass in southern Zhuguang. In this paper, the chlorite in the horizontal alteration zone around the ore body are studied comprehensively by optical microscopy, electron probe and scanning electron microscopy. Based on the lithological characteristics and genesis of chlorite, they are divided into five types: fissure filling chlorite, biotite altered chlorite, feldspar altered chlorite, dolomite altered chlorite and spherical chlorite. The five types of chlorite are all trioctahedral iron-rich chlorite with the same structure type, belonging to three species: vermicular chlorite, ferromagnesian chlorite and uraninite chlorite. Then, the five types of chlorite may have formed in the same period of fluid action in the early ore-forming period, with the formation temperature

收稿日期: 2023-05-20; 接受日期: 2024-05-31; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中核集团集中研发项目(LTD1602); 中国地质调查局项目(ZD20220975)

作者简介: 孙国权(1991-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事矿产普查与勘探工作, E-mail: 1361473191@qq.com; 通讯作者: 范洪海(1963-), 男, 高级工程师(研究员级), 博士生导师, 主要从事岩石地球化学及铀多金属成矿理论和成矿预测等研究工作, E-mail: fhh270@263.net。

between 219~282°C and $\log f_{O_2}$ between -47.74~-43.69. Combined with previous research results in the region, the early ore-forming fluid may be a crust-mantle mixed fluid dominated by mantle-derived materials, with strong reducibility. Its formation is related to the intrusion of regional basic veins, which provides a reducing field for the mineralization system, resulting in the reduction and precipitation of U^{6+} in the ore-forming fluid.

Key words: chlorite; geological feature; geological thermometer; oxygen fugacity; Shulouqi deposit

Fund support: Centralized Research and Development Project of CNNC(LTD1602); Project of China Geological Survey(ZD20220975)

对于花岗岩型铀矿而言,成矿早期流体与围岩的水岩反应是成矿过程的重要组成部分,与铀成矿作用关系密切(张龙等, 2017; 张丽等, 2018)。绿泥石化是花岗岩型铀矿中典型的成矿早期流体水岩作用的产物,属于中低温区间标型矿物,它的矿物化学成分能在一定程度上反映其形成时系统的物理化学性质(Inoue *et al.*, 2009; Bourdelle *et al.*, 2013; Bourdelle & Cathelineau, 2015)。

诸广南部铀矿田内,各矿床矿体外围普遍存在成矿早期流体水岩作用形成的绿泥石化、水云母化、硅化等蚀变现象(沈渭洲等, 2011; 李丽荣等, 2021)。然而,区域上前人的研究成果多集中于成矿早期流体作用与铀的关系上,对成矿早期流体作用的研究却少有涉猎。这不仅严重阻碍了单个矿床成因机制的精细化解剖,也不利于矿田尺度成矿规律的总结。

书楼丘矿床位于华南桃山-诸广花岗岩型铀成矿带内,矿床的沥青铀矿原位微区 U-Pb 加权平均年龄为 71.3 ± 1.1 Ma(郑国栋等, 2021)。矿体外围具有明显的水平蚀变分带现象,成矿早期流体水岩作用形成的绿泥石化、硅化、水云母化等广泛分布于各蚀变分带之中(孙国权等, 2022)。本文在笔者前期研究成果的基础上,以书楼丘矿床蚀变矿物绿泥石为对象,利用光学显微镜、扫描电镜、电子探针等手段对其进行系统的综合研究。其次,结合区域上前人的研究成果,探讨绿泥石化、成矿早期流体作用与铀成矿的关系。

1 地质概况

桃山-诸广铀成矿带是我国最大的花岗岩型铀成矿带,带内产出有诸广南部、桃山、鹿井、下庄 4 个我国最大的花岗岩型铀矿田。书楼丘矿床位于诸广铀矿田东南部的长江岩体内,矿床南部与目前华南地区规模最大的棉花坑花岗岩型铀矿床相毗邻。

长江岩体内发育多组断裂,书楼丘矿床处于北北西向断裂、北东向棉花坑断裂和里周断裂、北西向油洞断裂的交汇部位,成矿条件十分优越(图 1)。其次,矿区主要由 NWW 向、NEE 向、NNE 向、近 EW 向 4 组压扭性断裂和 NNW、近 SN 向 2 组张扭性断裂组成。矿体产出于 NNW 向和近 SN 向的张扭性构造蚀变带内。

区内岩浆活动从加里东期、海西期、印支期到燕山期频繁侵入。印支期岩体以粗中粒斑状黑云母二长花岗岩和中粒斑状二云母花岗岩为主,以岩株、岩基形式广泛分布。燕山早期岩体以浅肉红色中粗粒似斑状黑云母钾长花岗岩、细粒黑云母花岗岩和中细粒二云母花岗岩为主,以岩基、岩株形式分布。其中,浅肉红色中粗粒似斑状黑云母钾长花岗岩为矿区的主要岩性和赋矿围岩。燕山晚期岩体以含石榴子石细粒二云母花岗岩、细不等粒黑云母花岗岩和煌斑岩为主,以岩株、岩脉、岩墙等形式广泛分布,规模小,数量大。

区域上存在多期、多阶段的流体作用,致使矿区内发育强烈的热液蚀变。蚀变类型从高温到中、低温均广泛分布,以中、低热液蚀变为主。矿床成矿早期蚀变主要为绢云母化、硅化、绿泥石化、水云母化等。成矿期蚀变主要为黄铁矿化、碳酸盐化、萤石化等。

2 样品的采集、鉴定及测试

笔者对 1、13、19 号等主含矿带内典型钻孔进行了系统编录,并以矿体为中心向两侧取得样品共计 56 件(图 2)。其中,岩相学鉴定于中国地质大学(北京)矿相学实验室完成,电子探针和扫描电镜测试地点为核工业北京地质研究院。电子探针分析仪型号为 JXA-8100,加速电压 20 kV,束流 1×10^{-8} A,电子束斑 2 μm ,出射角 40°,检出限 0.01%。分析方法为波谱分析,样品载体为薄片,执行标准为 GB/T15074-

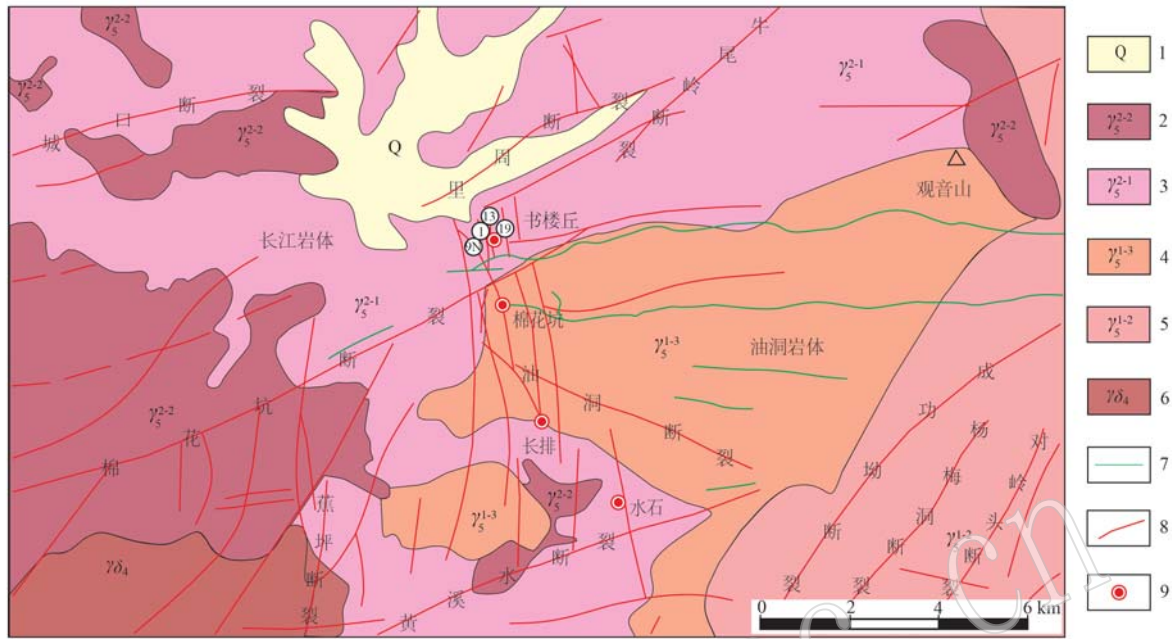


图 1 书楼丘矿床构造地质简图 [据郑国栋等 (2021) 修改]

Fig. 1 Tectonic and geologic sketch map of the Shulouqi deposit (modified after Zheng Guodong *et al.*, 2021)
 1—第四系; 2—燕山早期第 2 阶段花岗岩; 3—燕山早期第 1 阶段花岗岩; 4—印支期第 3 阶段花岗岩; 5—印支期第 2 阶段花岗岩;
 6—海西期第 2 阶段花岗闪长岩; 7—燕山晚期基性岩脉; 8—断裂; 9—铀矿床
 1—Quaternary; 2—granite of the second stage of early Yanshanian; 3—granite of the first stage of early Yanshanian; 4—granite of the third stage of Indo-Chinese; 5—granite of the second stage of Indo-Chinese; 6—granodiorite of the second stage of Hercynian; 7—basic rock vein of the late Yanshanian; 8—fault; 9—uranium deposit

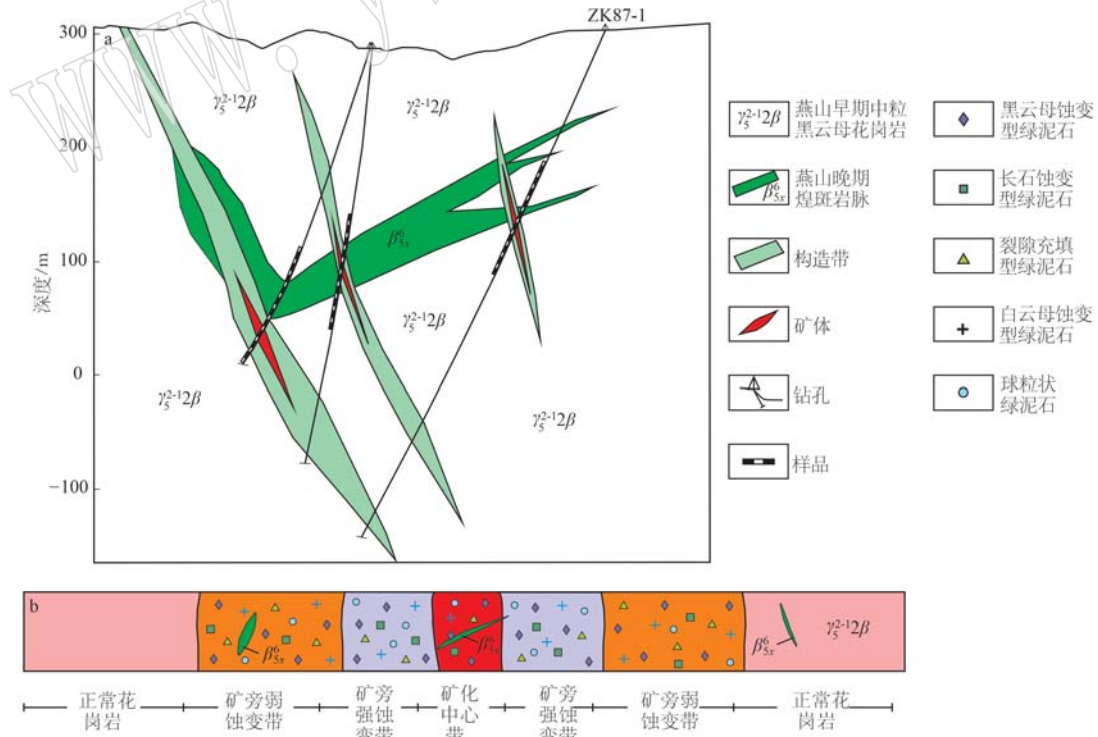


图 2 书楼丘矿床 87 勘探线采样位置示意图 [a, 据郑国栋等 (2021) 修改] 和水平蚀变分带内各类型绿泥石分布示意图 (b)

Fig. 2 Sampling position schematic diagram of 87 exploration line in Shulouqi deposit (a, modified after Zheng Guodong *et al.*, 2021) and distribution schematic diagram of various types of chlorite in horizontal alteration zones (b)

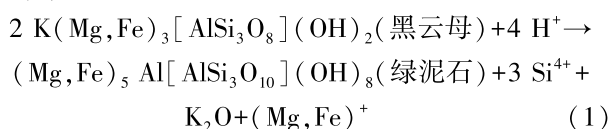
2008《电子探针定量分析方法通则》,修正方式为ZAF。标样为透长石(Si、Al、K)、钠长石(Na)、透辉石(Ca、Mg)、金红石(Ti)、石榴石(Fe)、蔷薇辉石(Mn)和氟磷灰石(P)。电子探针测试数据以W(Na₂O+K₂O+CaO)<0.5%作为判别绿泥石是否遭受混染的标准(Foster, 1962; Hillier and Velde, 1991),不符合标准的测点直接剔除。绿泥石的结构式和阳离子特征值采用以28个氧原子为基准的阴离子法计算,Fe³⁺和Fe²⁺的计算采用郑巧荣(1983)提出的电价差值法。绿泥石样品的电子探针成分分析结果列于表1。

3 绿泥石类型划分

本文以绿泥石岩相学鉴定特征为基础,结合蚀变前原矿物名称,将其划分为黑云母蚀变型绿泥石(I)、长石蚀变型绿泥石(II)、裂隙充填型绿泥石(III)、白云母蚀变型绿泥石(IV)、球粒状绿泥石(V)5种类型(图3)。因多次后期流体的改造作用,导致矿化中心部位早期绿泥石化被强烈交代,其发育程度明显低于外围各水平蚀变分带。总体上,5种类型绿泥石在矿体部位及其外围各蚀变分带内均有产出,但发育程度存在差异,具体分布特征见下文。各蚀变分带的地质、地球化学特征见孙国权等(2022)。

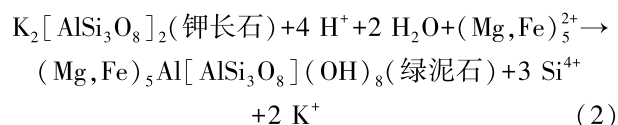
(I) 黑云母蚀变型绿泥石

主要发育类型,单偏光为墨绿色,正交偏光被其本色所掩盖,为流体交代原矿物黑云母形成。电子探针下可见绿泥石内部继承了原矿物黑云母裂隙中的金红石、磷灰石、锆石等副矿物。主要分布在矿旁强蚀变带和矿旁弱蚀变带内,大小在0.60 mm×0.30 mm~1.47 mm×0.88 mm之间,化学反应式见式(1)。



(II) 长石蚀变型绿泥石

不发育,单偏光为浅绿色,相对其他类型绿泥石颜色较淡,正交偏光下内部可见大量颗粒状集合体,为成矿早期流体沿碱性长石边缘和内部裂隙交代产物。主要分布在矿旁强蚀变带和矿旁弱蚀变带内,大小主要在3.38 mm×1.22 mm左右,化学反应式见式(2)。

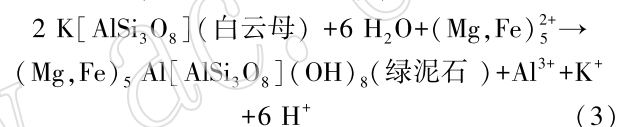


(III) 裂隙充填型绿泥石

发育程度仅次于黑云母蚀变型绿泥石,以微细长条状充填在长石的裂隙和机械双晶缝中。周围的长石一般只发生简单的泥化和高岭土化,为成矿早期流体交代花岗岩过程中的沉淀产物。主要分布在矿旁弱蚀变带内,大小在0.05 mm×2.20 mm~0.04 mm×1.80 mm之间。

(IV) 白云母蚀变型绿泥石

弱发育,常与水云母化、绢云母化等伴生,为成矿早期流体交代岩体自变质阶段形成的白云母所致。主要分布在矿旁弱蚀变带内,不规则状产出,大小不易测量,化学反应式见式(3)。



(V) 球粒状绿泥石

不发育,单偏光为绿色,多出于黏土化长石内。该类型绿泥石为早期流体强烈交代原矿物所致,因其颗粒细小,原矿物的种类目前难以确定,有待进一步研究。主要分布在矿旁强蚀变带内,大小在0.05 mm×0.07 mm~0.15 mm×0.07 mm之间。

4 地质温度计的选取

绿泥石地质温度计可分为成分温度计、结晶度温度计、面网间距温度计、热力学温度计、白云母-绿泥石温度计、绿泥石-碳酸盐温度计六大类型(Liu *et al.*, 2016)。结晶度温度计的使用需精确测定矿物的晶体结构、位错、离子位态分布等参数。该方法对使用者的专业知识背景要求高,计算过程繁琐,测试成本高,同时,层间阳离子Cr、Ti、Mn、V、Cu、Li等也会影响测试结果,导致计算精度降低,达不到预期目的。

目前,诸广地区模型成分端员热力学数据缺乏,镜下亦未发现5种类型绿泥石与石英的矿物共生组合,不符合使用热力学温度计的先决条件(Vidal *et al.*, 2001; Inoue *et al.*, 2009; Bourdelle *et al.*, 2013; Lanari *et al.*, 2014; Boudelle & Cathelineau, 2015)。其次,本矿床中白云母蚀变型绿泥石占比少,镜下并未观察到高岭石+绿泥石+碳酸盐的矿物

$w_n/\%$

表 1 各类型绿泥石电子探针成分分析结果和主要特征参数表
Table 1 Main content and characteristic parameters by electron probe of various chlorites

测点	Al ₂ O ₃	FeO*	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	CaO	SiO ₂	MnO	Cl	总量	Al ^{IV}	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Si ⁴⁺	Mn ²⁺	Al ^{VI}
1	17.93	33.87	0.10	7.03	-	0.33	0.04	28.22	0.98	-	88.50	2.24	5.63	1.31	2.14	0.01	5.76	0.17	2.07
2	17.02	34.91	0.04	7.05	0.08	0.07	0.06	26.96	1.11	-	87.30	2.18	6.22	0.75	2.27	0.01	5.82	0.20	2.15
3	19.13	32.05	-	7.22	0.12	0.07	0.15	27.57	1.03	-	87.34	2.35	5.35	1.30	2.21	0.03	5.65	0.18	2.27
4	17.63	34.75	0.03	7.44	0.06	0.19	0.07	27.53	1.03	0.02	88.75	2.23	6.00	0.86	2.33	0.02	5.77	0.18	2.13
5	17.51	33.71	0.04	8.25	0.08	0.09	0.09	27.06	1.07	0.02	87.92	2.22	5.94	0.66	2.63	0.02	5.78	0.19	2.18
6	17.91	35.91	-	6.56	0.06	0.13	0.05	26.57	1.23	-	88.42	2.31	6.36	0.71	2.10	0.01	5.69	0.22	2.22
7	19.12	36.51	-	5.61	0.08	-	-	24.17	1.60	-	87.09	2.55	6.85	0.26	1.88	0.00	5.45	0.31	2.52
8	18.43	35.22	-	6.60	0.07	0.09	0.05	25.93	1.13	-	87.52	2.42	6.26	0.73	2.12	0.01	5.58	0.21	2.26
9	18.29	34.98	0.03	5.68	0.13	0.07	0.06	25.06	1.45	-	85.75	2.41	6.46	0.60	1.89	0.01	5.59	0.27	2.40
10	19.59	36.09	-	5.95	0.13	-	0.06	25.35	1.66	-	88.83	2.50	6.50	0.47	1.93	0.01	5.50	0.31	2.52
11	19.14	35.90	0.02	5.56	0.21	-	0.06	26.25	1.19	0.02	88.35	2.40	6.31	0.81	1.77	0.01	5.60	0.21	2.41
12	18.25	34.33	0.03	7.16	0.19	0.22	0.11	27.27	1.08	-	88.64	2.28	5.92	0.85	2.24	0.02	5.72	0.19	2.23
13	18.71	34.35	0.11	6.99	0.09	0.39	0.13	27.41	0.97	0.04	89.19	2.34	5.83	0.98	2.15	0.03	5.66	0.17	2.22
14	19.85	34.59	-	7.39	0.08	-	0.02	25.47	0.98	-	88.38	2.54	6.15	0.53	2.36	0.00	5.46	0.18	2.49
15	20.32	33.08	0.07	7.15	0.23	0.16	0.09	25.44	0.99	0.04	87.57	2.56	5.84	0.65	2.28	0.02	5.44	0.18	2.56
16	20.09	34.68	0.03	7.10	0.08	0.12	0.04	25.41	1.09	-	88.64	2.55	6.16	0.53	2.27	0.01	5.45	0.20	2.52
17	17.27	33.87	0.02	8.51	0.07	0.25	0.10	27.79	0.95	0.02	88.85	2.18	5.85	0.77	2.66	0.02	5.82	0.17	2.09
18	18.74	31.36	-	7.55	-	0.13	0.11	27.06	0.78	-	85.73	2.38	5.30	1.35	2.34	0.02	5.62	0.14	2.21
19	16.98	34.75	-	7.82	-	0.09	0.16	26.81	0.87	-	87.48	2.20	6.21	0.64	2.52	0.04	5.80	0.16	2.12
20	18.09	33.95	0.02	7.69	0.07	0.07	0.11	26.81	0.96	-	87.77	2.30	5.95	0.77	2.44	0.03	5.70	0.17	2.24
21	17.45	34.10	0.02	7.46	0.09	-	0.09	25.24	1.01	-	85.46	2.32	6.38	0.37	2.50	0.02	5.68	0.19	2.31
平均	18.45	34.43	0.04	7.04	0.11	0.15	0.08	26.45	1.10	0.03	87.88	2.36	6.07	0.76	2.24	0.02	5.64	0.20	2.29
1	19.70	35.18	0.04	6.19	0.06	-	-	25.62	1.33	-	88.12	2.50	6.24	0.70	1.98	0.00	5.50	0.24	2.48
2	18.07	36.16	0.03	7.21	0.17	0.06	0.03	24.18	1.27	-	87.18	2.50	6.64	0.24	2.44	0.01	5.50	0.24	2.34
3	19.07	33.88	0.05	7.44	0.13	-	0.03	24.89	1.21	0.02	86.72	2.48	6.25	0.32	2.46	0.01	5.52	0.23	2.51
4	20.65	34.71	0.05	6.83	0.13	-	0.05	25.09	1.30	-	88.81	2.61	6.18	0.46	2.19	0.01	5.39	0.24	2.61
5	20.61	35.40	0.18	6.15	0.17	0.06	0.10	25.72	1.33	0.02	89.74	2.56	6.20	0.59	1.94	0.02	5.44	0.24	2.59
平均	19.62	35.07	0.07	6.76	0.13	0.06	0.05	25.10	1.29	0.02	88.17	2.53	6.30	0.46	2.20	0.01	5.47	0.24	2.51
1	21.08	34.49	-	5.11	0.25	0.16	0.03	24.16	1.66	0.03	86.97	2.72	6.24	0.64	1.67	0.01	5.28	0.31	2.72
2	20.01	32.64	-	6.83	0.10	0.08	0.04	24.53	1.16	-	85.39	2.61	5.92	0.68	2.24	0.01	5.39	0.22	2.57
3	21.46	33.73	0.02	5.64	0.18	-	0.03	24.79	1.43	-	87.28	2.71	5.92	0.84	1.79	0.01	5.29	0.26	2.69
4	21.40	34.75	0.07	5.29	0.05	0.20	0.06	24.38	1.36	-	87.56	2.77	6.14	0.81	1.69	0.01	5.23	0.25	2.63
5	21.43	34.15	0.05	4.76	0.05	0.09	0.04	24.47	1.32	-	86.36	2.75	6.01	1.02	1.52	0.01	5.25	0.24	2.67
6	21.81	35.55	0.04	3.83	0.12	0.13	0.06	23.85	1.66	0.03	87.08	2.82	6.36	0.84	1.24	0.01	5.18	0.31	2.76
7	21.50	35.81	-	3.55	0.14	0.07	0.04	23.72	2.05	-	86.88	2.80	6.48	0.77	1.16	0.01	5.20	0.38	2.76
8	20.95	31.91	0.07	7.22	0.15	0.07	0.02	25.62	1.09	0.01	87.11	2.61	5.51	0.92	2.26	0.00	5.39	0.19	2.58

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

续表 1
Continued Table 1

测点	Al ₂ O ₃	FeO*	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	CaO	SiO ₂	MnO	Cl	总量	Al ^{IV}	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Si ⁴⁺	Mn ²⁺	Al ^{VI}
9	21.12	32.36	0.02	6.44	0.09	0.03	0.05	25.89	0.91	0.02	86.93	2.62	5.49	1.19	1.99	0.01	5.38	0.16	2.55
10	20.53	32.98	0.04	5.29	0.21	-	0.07	25.22	1.37	0.02	85.73	2.60	5.79	1.07	1.69	0.02	5.40	0.25	2.59
11	20.65	33.95	0.12	4.58	0.07	0.02	-	24.83	1.67	0.01	85.90	2.65	6.00	1.05	1.47	0.00	5.35	0.30	2.60
平均	21.09	33.85	0.05	5.32	0.13	0.09	0.04	24.68	1.43	0.02	86.70	2.70	5.99	0.89	1.70	0.01	5.30	0.26	2.65
1	19.42	34.33	0.04	5.94	0.13	0.09	0.09	24.77	1.65	0.03	86.49	2.54	6.27	0.57	1.95	0.02	5.46	0.31	2.51
2	20.11	37.84	0.04	3.59	0.07	0.12	0.04	23.53	1.59	-	86.93	2.69	7.09	0.44	1.21	0.01	5.31	0.30	2.66
3	22.05	35.58	0.05	4.07	0.07	-	0.03	24.88	1.72	-	88.45	2.76	6.15	1.03	1.28	0.01	5.24	0.31	2.71
4	20.24	35.24	0.12	5.78	0.09	-	0.05	24.91	1.76	-	88.19	2.59	6.35	0.52	1.87	0.01	5.41	0.32	2.60
5	21.45	31.50	0.03	5.99	-	0.19	0.02	24.86	1.95	-	85.99	2.74	5.44	1.15	1.89	0.00	5.26	0.35	2.60
6	20.90	34.33	0.02	5.19	0.02	-	0.05	25.80	1.56	-	87.87	2.62	5.86	1.16	1.61	0.01	5.38	0.28	2.51
7	21.70	31.54	-	5.54	0.06	0.29	0.05	24.77	1.91	0.02	85.88	2.79	5.41	1.26	1.74	0.01	5.21	0.34	2.59
8	21.16	32.88	0.12	6.60	0.03	-	-	25.14	0.90	-	86.83	2.66	5.74	0.91	2.09	0.00	5.34	0.16	2.63
9	18.91	33.07	0.10	6.81	0.02	0.13	0.03	25.72	0.94	-	85.73	2.45	5.87	0.89	2.19	0.01	5.55	0.17	2.36
10	19.57	33.06	0.05	6.08	-	0.19	0.03	23.83	1.11	-	83.92	2.66	6.12	0.72	2.03	0.01	5.34	0.21	2.52
11	21.92	32.79	0.06	6.00	0.02	-	0.03	25.86	1.37	-	88.05	2.69	5.49	1.23	1.84	0.01	5.31	0.24	2.61
12	21.81	32.42	0.06	5.84	-	0.09	0.02	25.07	1.34	-	86.65	2.76	5.53	1.20	1.82	0.00	5.24	0.24	2.62
平均	20.77	33.72	0.06	5.62	0.06	0.16	0.04	24.93	1.48	0.03	86.86	2.66	5.94	0.92	1.79	0.01	5.34	0.27	2.58
1	21.10	33.23	0.38	2.72	0.06	0.14	0.04	26.84	1.19	0.08	85.78	2.57	5.40	2.01	0.82	0.01	5.43	0.20	2.47
2	20.34	38.04	0.04	1.77	-	-	0.02	24.85	1.06	-	86.12	2.64	6.72	1.34	0.57	0.00	5.36	0.19	2.54
3	20.58	32.88	-	6.31	0.03	0.02	0.03	25.55	1.53	0.01	86.94	2.61	5.69	1.03	1.98	0.01	5.39	0.27	2.51
4	20.05	32.40	0.03	5.26	0.02	0.08	0.06	25.22	1.50	0.02	84.64	2.61	5.65	1.30	1.68	0.01	5.39	0.27	2.45
5	20.03	33.72	-	5.27	0.02	0.03	0.04	25.26	1.33	-	85.70	2.58	5.92	1.12	1.69	0.01	5.42	0.24	2.48
6	21.14	33.88	0.04	5.49	-	0.09	0.04	25.28	1.38	-	87.34	2.68	5.84	1.08	1.72	0.01	5.32	0.25	2.56
平均	20.54	34.03	0.12	4.47	0.03	0.07	0.04	25.50	1.33	0.04	86.17	2.62	5.87	1.31	1.41	0.01	5.39	0.24	2.50

注: -表示低于仪器的检出限, FeO*表示全铁。

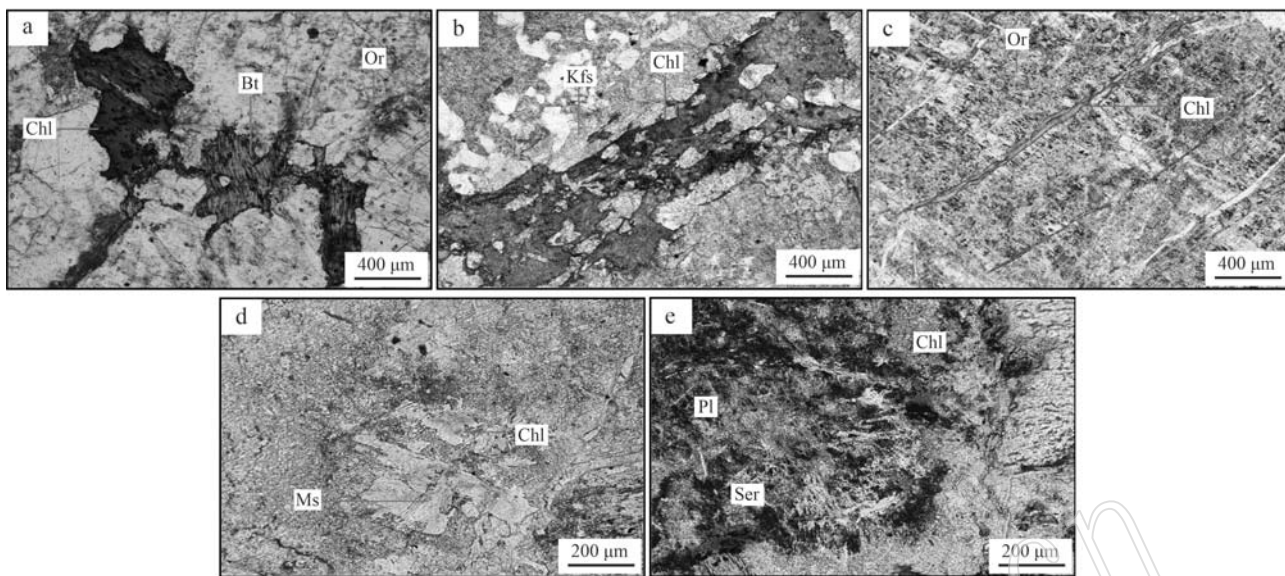


图 3 各类型绿泥石显微照片(正交偏光)

Fig. 3 Microphotographs of various types of chlorite(crossed polarized)

a—黑云母蚀变型绿泥石；b—长石蚀变型绿泥石；c—裂隙充填型绿泥石；d—白云母蚀变型绿泥石；e—球粒状绿泥石；
Kfs—钾长石；Chl—绿泥石；Bt—黑云母；Pl—斜长石；Or—正长石；Ms—白云母；Ser—绢云母

a—chlorites of altered biotite；b—chlorites of altered feldspar；c—fissure-filled chlorites；d—chlorites of altered muscovite；
e—globular chlorites；Kfs—potash feldspar；Chl—chlorite；Bt—biotite；Pl—plagioclase；Or—orthoclase；Ms—muscovite；Ser—sericite

共生组合,亦不符合白云母-绿泥石温度计和绿泥石-碳酸盐温度计的使用条件。

Jowett (1991)、Zang & Fyfe (1995) 等学者认为在使用成分温度计时必须考虑全岩和绿泥石内部 $Fe/(Fe+Mg)$ 值。换言之,绿泥石成分温度计中 Al^{IV} 不仅是温度的函数,还可能与全岩、蚀变前矿物化学成分有关。由图 4 可知,5 种类型绿泥石中 Al 与 $Fe/(Fe+Mg)$ 之间具有明显的正相关性。然而,全岩

与绿泥石的 $FeO/(FeO+MgO)$ 之间不存在相关性。同时,5 种类型绿泥石发育在富 Al 的绢云母、白云母、长石等矿物中,形成过程中均有 Al^{3+} 的释出,属于 Al 饱和型绿泥石。即使在极端富铁的泥质岩中,校正后的温度差值也只有 $19.1^{\circ}C$ (谭靖等, 2007)。故此,本文在选取绿泥石成分温度计时,只考虑绿泥石内部 $Fe/(Fe+Mg)$ 与 Al^{IV} 的校正问题。

综上所述,本文共选取4种目前广泛使用的绿

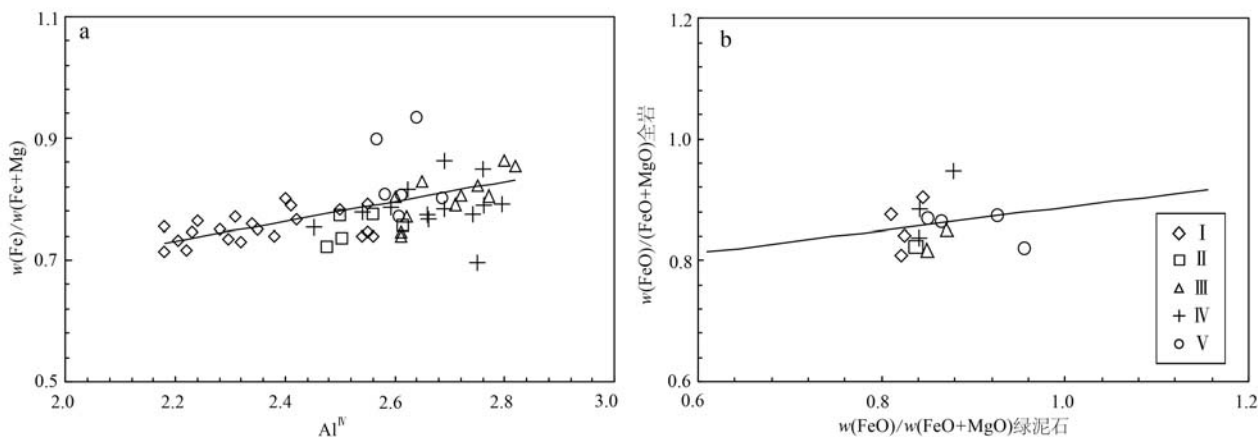


图 4 成分温度计校正相关性图解

Fig. 4 Correlation diagram of composition thermometer correction

泥石地质温度计,同时评价其在矿田中的适用性问题。4种地质温度计分别为:① Battaglia(1999)基于绿泥石结晶温度与(001)底面间距之间存在的线性关系提出的面网间距温度计,其中, d_{001} 面间距的确定采用 Nieto(1997)对 Rausell-Colom 等(1991)计算方法的修正公式。② 铝饱和情况下, Kranidiotis & Maclean(1987)、Xie 等(1997)、El-Sharkawy(2000)分别提出的绿泥石成分温度计。

5 讨论

5.1 绿泥石形成期次判定

Xie 等(1997)在研究 Barberton 绿岩带时,指出经受同期流体作用形成的三八面体绿泥石内部 Mg^{2+}

与主要阳离子之间存在着良好的线性关系。据此,可初步判断5种类型绿泥石是否为同期流体蚀变作用下的产物。由图5可知,除两个球粒状绿泥石测点外,其他4种类型绿泥石的 Mg^{2+} 与 Al^{IV} 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Al^{VI} 整体存在较好的负相关性,与 Si^{IV} 、 Mn^{2+} 整体存在较好的正相关性。因此,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、白云母蚀变型绿泥石可能形成于同一期流体水岩作用过程中。

结合下文中绿泥石的氧逸度计算结果,笔者认为球粒状绿泥石与其他类型绿泥石形成于同一期流体之中。部分测点相关性较差,原因为较强的流体交代作用致使部分球粒状绿泥石八面体内部 Fe^{3+} 强烈置换 Mg^{2+} ,造成 Fe^{3+} 含量明显高于其他4种类型绿泥石、 Mg^{2+} 明显低于其他4种类型绿泥石的特殊现象。

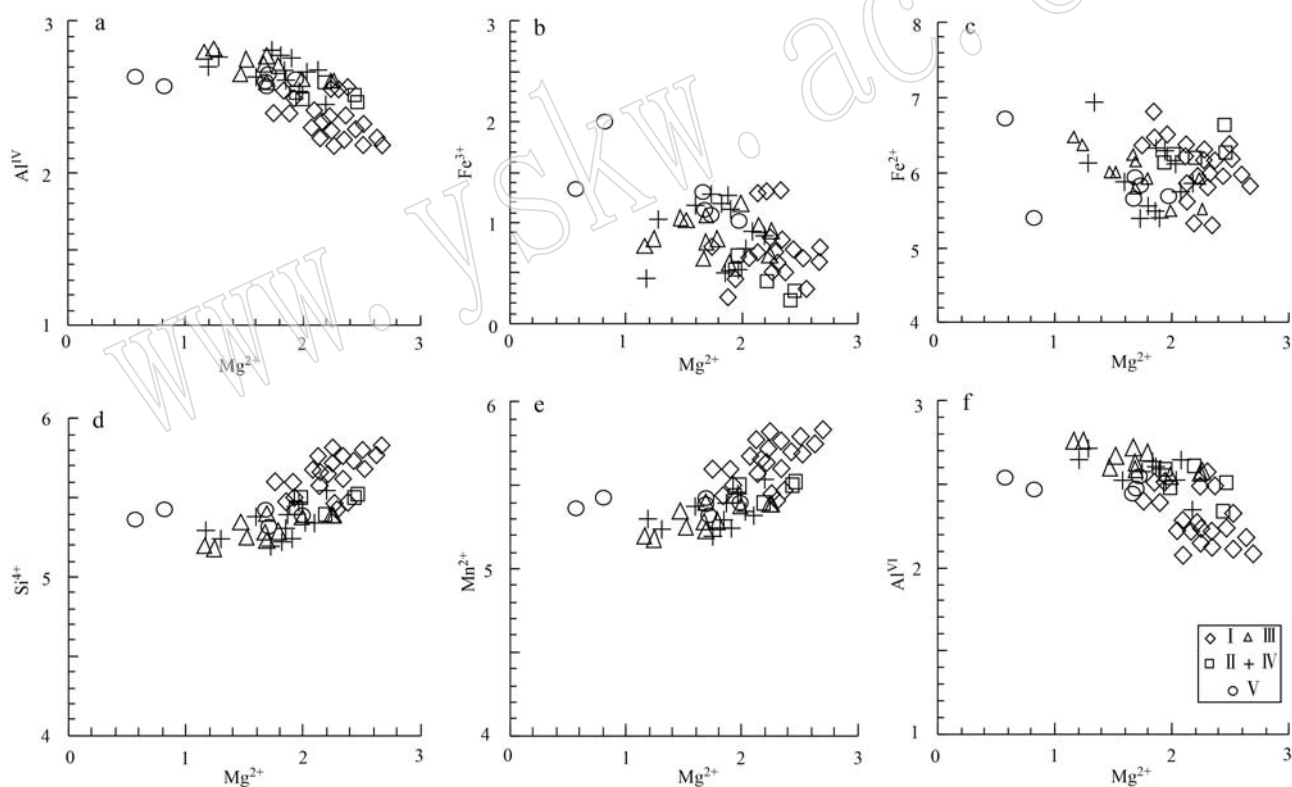


图5 绿泥石 Mg^{2+} 与其他主要阳离子相关性图解

Fig. 5 Diagram of the correlation between Mg^{2+} and other major cations of chlorites

5.2 绿泥石地质特征及对比

形态上,长石蚀变型绿泥石相对较大,裂隙充填型绿泥石和黑云母蚀变型绿泥石次之,白云母蚀变型绿泥石和球粒状绿泥石最小。发育程度上,黑云母蚀变型绿泥石的分布范围和发育程度最为广泛,

是书楼丘矿床绿泥石化主要类型;裂隙充填型绿泥石次之,白云母蚀变型绿泥石、长石蚀变型绿泥石和球粒状绿泥石占比少。空间上,黑云母蚀变型绿泥石、长石蚀变型绿泥石主要分布在矿旁强蚀变带和矿旁弱蚀变带中,裂隙充填型绿泥石和白云母蚀

变型绿泥石主要分布在矿旁弱蚀变带中,球粒状绿泥石主要分布在矿旁强蚀变带中。

α 诱发裂变径迹表明,黑云母蚀变型绿泥石不仅继承了黑云母的裂变径迹,并且吸附叠加有新生铀石等铀矿物(刘正义等, 2012; 赵友东等, 2016)。电子探针和扫描电镜也证实了绿泥石裂隙内部存在微脉状沥青铀矿。根据式(1)、(2)、(3),可知绿泥石化过程中从开放系统中消耗的离子为 H^+ , 释放入系统中的离子为 K^+ 、 Si^{4+} 、 Al^{3+} 、 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} , 这有利于增加主成矿期流体中 U^{6+} 的溶解度(Keppler & Wylle, 1990)。

5.3 绿泥石种属厘定

绿泥石的形成受温度、压力、酸碱度、水岩比等多种因素制约。随着系统物理化学环境的变化,晶体结构内部离子出现不同的替换关系,形成复杂的多型(Cathelineau & Nieva, 1985; Decaritat *et al.*,

1993; Schmidt & Livi, 1999)。前人对绿泥石的分类进行了大量研究,目前仍然没有一种能对其结构和成分同时进行完整表征的分类方案。基于此,本文采用目前应用较广泛的 Deer 等(1962)基于 Fe^{2+}/R^{2+} 和 Si^{IV} 对应点位置的成分分类图解、Wiewióra & Weiss(1990)既考虑绿泥石化学成分又考虑矿物结构的分类图解以及 Zane & Weiss(1998)限定绿泥石结构类型和八面体占位主导阳离子的三角分类图解这3种分类方案,对书楼丘矿床5种类型绿泥石种属进行综合表征。

由图6a可知,黑云母蚀变型绿泥石部分属于蠕绿泥石种属,部分属于铁镁绿泥石种属。长石蚀变型绿泥石、裂隙充填型绿泥石、白云母蚀变型绿泥石均属于蠕绿泥石种属。球粒状绿泥石主要属于蠕绿泥石种属,部分属于鲕绿泥石种属。由图6b可知,5种类型绿泥石均属于三八面体-三八面体的2:1层

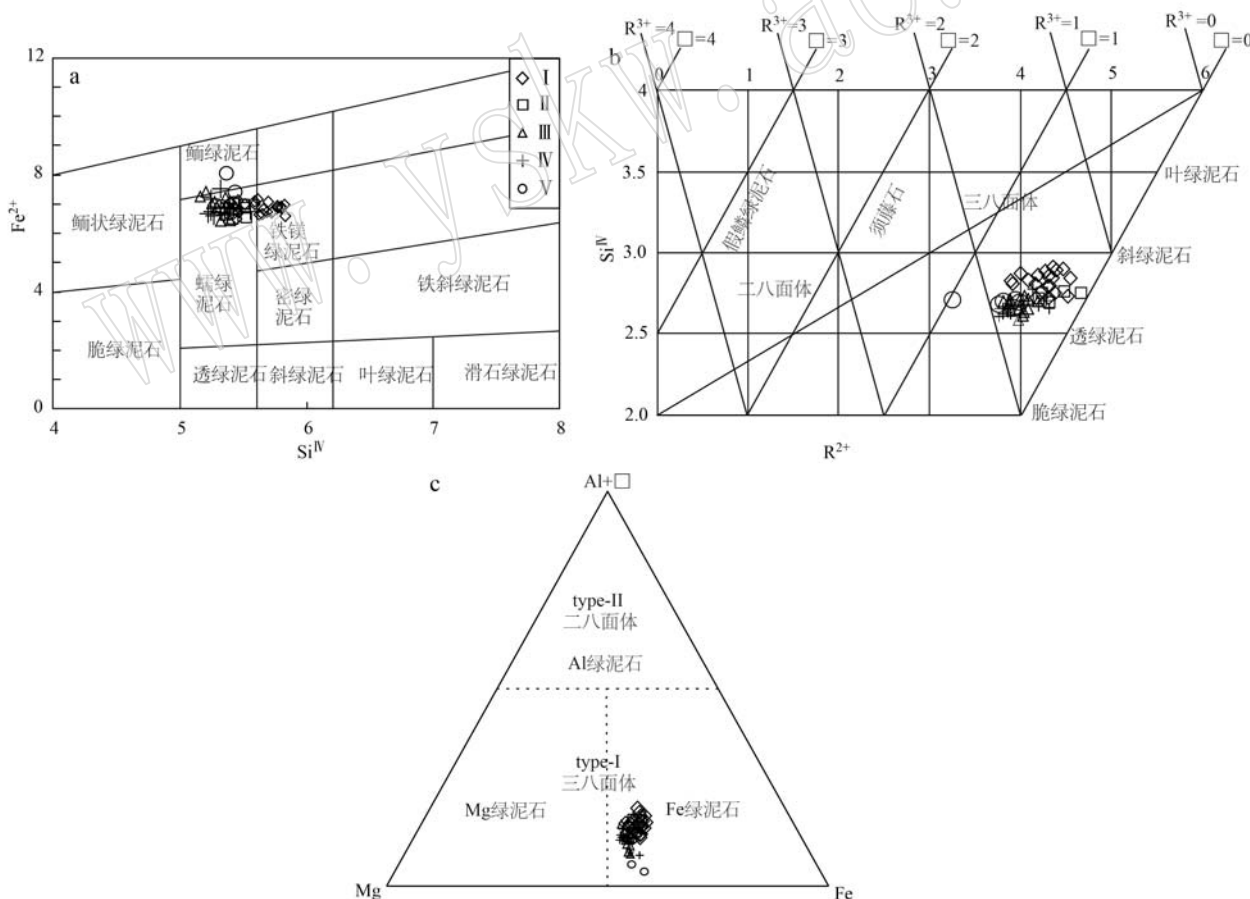


图6 各类型绿泥石分类图解

Fig. 6 Classification diagram of chlorites of various genesis

a— $Fe^{2+}-Si^{IV}$ 分类图解(Deer *et al.*, 1962); b— $Si^{IV}-R^{2+}$ 分类图解(Wiewióra and Weiss, 1990); c— $Al+\square-Mg-Fe$ 三角图解(Zane & Weiss, 1998)
 a— $Fe^{2+}-Si^{IV}$ diagram (Deer *et al.*, 1962); b— $Si^{IV}-R^{2+}$ diagram (Wiewióra and Weiss, 1990); c— $Al+\square-Mg-Fe$ diagram (Zane & Weiss, 1998)

状结构类型,八面体内部6次配位的3价阳离子数在1~2之间,晶格空位在0~1之间。由图6c可知,5种类型绿泥石结构上均属于三八面体Type-I型绿泥石,八面体内部2价阳离子中 Fe^{2+} 占据主导地位,属于富铁型绿泥石。

标型矿物的元素含量变化直接反映了其形成时的地质环境。对于书楼丘矿床而言,5种类型绿泥石经历了相同的流体作用,且空间分布位置相近,围岩岩性一致。故此,所处的地球化学场相同,对其形成影响最大的因素为温度和原矿物的类型,在二者的共同作用下造就了各类型绿泥石之间的种属差异,下文中绿泥石温度的计算结果也印证了该点。

5.4 温度计算及数据分析

书楼丘矿床中,成矿早期与绿泥石化伴生的蚀变有硅化、水云母化等等。目前,尚未有公开发表的关于成矿早期石英流体包裹体的测温数据。基于绿泥石化属于中低温矿物共生组合的地质事实,4种地质温度计计算结果的准确性主要通过与其毗邻的棉花坑矿床成矿早期石英流体包裹体测温数据200~300℃(张敏等,2009)和220~340℃(刘佳林等,2015)进行对比验证。

由表2可知,Kranidiolis & Maclean(1987)成分温度计的计算结果高于流体包裹体的测温数据,也与绿泥石属于中低温矿物的地质事实不符。Battaglia(1999)面网间距温度计的计算结果较低,5种类型绿泥石的形成温度基本相同与其实际发育程度不匹配。Xie等(1997)成分温度计的计算结果远远低于流体包裹体的测温数据。El-Sharkawy(2000)成分温度计计算结果与流体包裹体测温数据对应较好,黑云母蚀变型绿泥石的形成温度区间最为广泛,与岩矿鉴定的发育程度相一致。

其次,El-Sharkawy(2000)成分温度计的计算结果与棉花坑矿床成矿早期蚀变绿泥石 Chl_1 (长石蚀变型)、 Chl_2 (黑云母蚀变型)、 Chl_4 (黏土矿物转变型)的形成温度相一致(吴德海,2020)。但是,裂隙充填型绿泥石的形成温度明显高于棉花坑矿床同类型绿泥石(Chl_3),这表明书楼丘矿床成矿早期流体的形成温度总体高于棉花坑矿床。

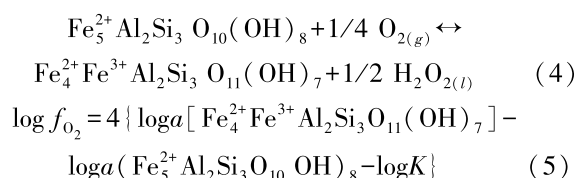
综上所述,El-Sharkawy(2000)成分温度计适用于书楼丘矿床绿泥石形成温度的计算。黑云母蚀变型绿泥石的形成温度为219~260℃,长石蚀变型绿泥石的形成温度为252~265℃,裂隙充填型绿泥石的形成温度为261~282℃,白云母蚀变型绿泥石的

形成温度为248~282℃,球粒状绿泥石的形成温度为253~270℃。

结合矿床流体包裹体测温数据(赵宇霆等,2021),可知系统温度的总体变化过程为:由成矿早期的中低温演变为成矿期的中高温,再降低为成矿后期的中低温,与下文早期高温幔源流体的不断加入导致成矿系统温度升高,后期转变为以大气降水为主的壳源流体作用的演变过程相对应。其次,主成矿期流体温度的升高也有利于铀酰络合物溶解度的增加(Tournssat *et al.*, 2018; Kalintsev *et al.*, 2019)。

5.5 成矿系统氧逸度估算

Walshe(1986)结合The Supercr 热力学数据库和前人的研究成果,提出了绿泥石的六组分固溶体热力学模型。在给定条件下,该模型可以利用绿泥石的电子探针数据估算其形成的温度和系统氧逸度、硫逸度。该方法在加拿大Rocky Mountains 断褶带、比利时东部Variscan 断褶带、美国The Salton Sea 地热系统、中国西藏朱诺斑岩型铜矿以及澳大利亚的The Jabiluka 铀矿床等地区均得到了有效的验证和应用(Schroyen & Muchez, 2000; Vandeginste *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2020; Mohanty & Mishra, 2023; Li *et al.*, 2024)。其中,计算氧逸度的反应式、公式如下:



上文计算的本区各类型绿泥石形成温度均低于300℃;矿区成矿早期广泛发育的灰白色、烟灰色微晶石英脉和灰色细晶石英脉与绿泥石化伴生;利用棉花坑矿床成矿期流体包裹体数据计算出矿田内成矿系统压力约为0.10~0.11 GPa(张闯等,2016),这3点满足式(4)、式(5)的使用条件,因此可以用于本区绿泥石的氧逸度计算,公式中 $\log K$ 的选取见表3,相关介绍见张伟等(2014)。

由表3可知,5种类型绿泥石的氧逸度计算结果基本相同。 $\log f_{\text{O}_2}$ 在-47.74~-43.69之间,平均值为-45.51,远远低于对应温度下磁铁矿(Mt)-赤铁矿(Mh)矿物对的氧化还原缓冲线(Bastrakov *et al.*, 2010),表明成矿早期系统不具备氧化岩体中四价铀源的能力。

表 2 地质温度计计算结果表
Table 2 Geological thermometer calculation result

温度参数	面网间距温度计		成分温度计		
	Battaglia (1999)	Kranidiotis & Maclean(1987)	Xie <i>et al.</i> (1997)	El-Sharkawy (2000)	
黑云母蚀变型绿泥石	区间	184~216	302~347	99~166	219~260
	平均值	197	324	127	238
	数据点(个)		21		
长石蚀变型绿泥石	区间	206~213	335~350	140~169	252~265
	平均值	209	342	155	256
	数据点(个)		5		
裂隙充填型绿泥石	区间	206~227	350~380	143~174	261~282
	平均值	216	363	161	271
	数据点(个)		11		
白云母蚀变型绿泥石	区间	200~226	334~374	135~180	248~282
	平均值	213	359	160	268
	数据点(个)		12		
球粒状绿泥石	区间	202~220	351~367	96~160	253~270
	平均值	210	357	134	261
	数据点(个)		6		

表 3 氧逸度计算结果表
Table 3 Oxygen fugacity calculation result

	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	白云母蚀变型绿泥石	球粒状绿泥石
T/K	492.15~533.15	525.15~538.15	535.15~555.15	521.15~555.15	526.15~543.15
$\log K$	11.58	11.11	10.73	10.81	10.99
数据点/个	21	5	11	12	6
$\log f_{O_2}$	-47.66~ -44.35 (平均-45.71)	-47.74~ -45.77 (平均-46.64)	-45.93~ -44.63 (平均-45.31)	-46.80~ -44.50 (平均-45.30)	-44.94~ -43.69 (平均-44.62)

高飞等(2014)通过黑云母计算长江岩体赋矿花岗岩结晶时系统的 $\log f_{O_2}$ 为-17~-15,结合本文计算的绿泥石形成时成矿系统的氧逸度,可知书楼丘矿床成矿早期流体的 $\log f_{O_2}$ 远低于-47.74~-43.69。故此,随着早期成矿系统的温度降低,5类型绿泥石依次形成。然而,成矿早期系统的氧逸度保持不变,仍表现出强还原性。

5.6 早期流体作用与铀成矿

研究表明,花岗岩型铀矿中成矿期流体氧逸度较高,其中铀元素主要以6价的形式与 CO_3^{2-} 、 Cl^- 、 F^- 等形成铀酰络合物的形式迁移。成矿系统的氧化、还原环境变化直接控制着铀元素的迁移和沉淀过程(凌洪飞,2011;李延河等,2016;王大钊等,2022)。书楼丘矿床主成矿期流体主要来自以大气降水为主的壳源流体和携有矿化剂 ΣCO_2 的幔源流体(卢小亮等,2015;庞雅庆等,2019;刘文泉等,2022),二者与富铀花岗岩持续发生水岩反应,将岩体内的 U^{4+} 活化为 U^{6+} ,最终形成携有大量 U^{6+} 的较高氧逸度的

成矿流体。

区域上呈面状广泛分布的绿泥石化、水云母化等蚀变,表明早期流体与赋矿花岗岩之间发生了强烈的水岩交代作用,致使赋矿的围岩系统变为强还原环境。当携有大量 U^{6+} 的成矿流体运移到矿区 NE、NNW 向的张性储矿断裂中,系统压力骤降,铀酰络合物发生解体。此时,早期流体作用为赋矿系统提供的还原性化学障促使 U^{6+} 重新被还原为 U^{4+} 沉淀成矿。

长江岩体内铀矿床的形成时代与诸广地区北东向断裂带、断陷盆地的强烈拉张时期(80~60 Ma)同步,矿床的形成受控于中生代岩石圈伸展作用,与成矿相关的 ΣCO_2 幔源矿化剂与区域性北东向断裂带的拉张作用有关(钟福军等,2019;范洪海等,2023)。矿田内流体包裹体和 C、H、O 同位素的研究,也表明早期流体富含大量的 Ca、K、Na 等碱土金属元素,气相成分富含 H_2 ,为含有深源地幔物质的深循环流体(赵宇霆等,2021)。与此同时,矿田内

存在的燕山晚期多次基性岩脉活动,与铀成矿具有时空耦合性,甚至在区域上形成一类“交点型”铀矿(朱卫平, 2022; 庞雅庆等, 2023)。据此判断,成矿早期流体为以幔源流体为主的壳幔混合流体,其形成与区域上基性岩脉的侵入作用有关。

综上所述,绿泥石化为成矿提供了微储矿空间,一定程度也增强了成矿热流体的携铀能力。与此同时,早期流体强烈的水岩作用为系统提供的还原性化学障是铀沉淀再富集的关键因素,致使主成矿流体中 U^{6+} 被还原成矿。其次,区域上早期流体提供的面状分布的还原环境在后期的保矿阶段也起到了积极的作用。

6 结论

(1) 书楼丘矿床蚀变绿泥石存在裂隙充填型绿泥石、黑云母蚀变型绿泥石、长石蚀变型绿泥石、白云母蚀变型绿泥石和球粒状绿泥石 5 种类型。

(2) 黑云母蚀变型绿泥石为矿床绿泥石化的主要类型,5 种类型绿泥石均为三八面体富铁型,结构类型相同,分别属于蠕绿泥石、铁镁绿泥石、鲕绿泥石 3 种种属。

(3) El-Sharkawy (2000) 成分温度计适用于书楼丘矿床绿泥石形成温度的计算,5 种类型绿泥石的形成温度在 219~282℃ 之间,成矿系统的 $\log f_{O_2}$ 在 -47.74~-43.69 之间。

(4) 成矿早期流体是以幔源物质为主的壳幔混合流体,其形成与区域上基性岩脉的侵入作用有关。其次,成矿早期流体具有强还原性,为成矿系统提供了还原性化学障,致使后期流体中携带的 6 价铀被还原沉淀成矿。

致谢 本文野外工作得到了核工业 290 研究所同仁们的大力支持,室内实验室光薄片鉴定工作得到了核工业北京地质研究院分析测试研究所范光老师的帮助,感谢期刊编辑老师和审稿专家对本文提出的修改意见。

References

Battaglia S. 1999. Applying X-ray geothermometer diffraction to a chlorite [J]. *Clays and Clay Minerals*, 47(1): 54~63.

Bastrakov E N, Jaireth S and Mernagh T P. 2010. Solubility of Uranium in Hydrothermal Fluids at 25~300℃: Implications for the Formation of Uranium Deposits[M]. Canberra: Geoscience Australia Record, 1~91.

Bourdelle F and Cathelineau M. 2015. Low-temperature chlorite geothermometry: A graphical representation based on a T-R²⁺-Si diagram [J]. *European Journal of Mineralogy*, 27(5): 617~626.

Bourdelle F, Parra T, Chopin C, *et al.* 2013. A new chlorite geothermometer for diagenetic to low-grade metamorphic conditions[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 165(4): 723~735.

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.

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 Jussman J. 1962. *Rock-Forming Minerals: Sheet Silicates*[M]. London: Longman, 270.

El-Sharkawy M F. 2000. Talc mineralization of ultramafic affinity in the Eastern Desert of Egypt [J]. *Mineralium Deposita*, 35(4): 346~363.

Foster H J. 1962. Interpretation of the composition and a classification of the chlorites [C]//Geological Survey Professional Paper, 414A: 33.

Fan Honghai, Pang Yaqing, He Debao, *et al.* 2023. Metallogenic process and prediction of granite-related uranium deposits in South China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 44(5): 887~896 (in Chinese with English abstract).

Gao Fei, Pang Yaqing, Lin Jingrong, *et al.* 2014. Mineral composition of biotites in granites of the Zhuguang-Mianhuakeng uranium deposit and its petrogenetic and metallogenic significance[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(3): 384~388 (in Chinese with English abstract).

Hillier S and Velde B. 1991. Octahedral occupancy and the chemical composition of diagenetic (low-temperature) chlorites [J]. *Clay Minerals*, 26(2): 149~168.

Inoue A, Meunier A, Patrier-Mas P, *et al.* 2009. Application of chemical geothermometry to low-temperature trioctahedral chlorites [J]. *Clays and Clay Minerals*, 57(3): 371~382.

Jowett E C. 1991. Fitting iron and magnesium into the hydrothermal chlorite geothermometer [C]// GAC/MAC/SEG Joint Annual Meeting, Toronto: Program with Abstracts 16, A62.

Kalintsev A, Migdisov A, Xu H W, *et al.* 2019. Uranyl speciation in sulfate-bearing hydrothermal solutions up to 250℃ [J]. *Geochimica et*

- Cosmochimica Acta, 267: 75~91.
- Kranidiotis P and MacLean W H. 1987. Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec[J]. Economic Geology, 82(7): 1 898~1 911.
- Keppeler H and Wyllie P J. 1990. Role of fluids in transport and fractionation of uranium and thorium in magmatic processes[J]. Nature, 348: 531~533.
- Lanari P, Wagner T and Vidal O. 2014. A thermodynamic model for dioctahedral chlorite from experimental and natural data in the system MgO-FeO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O: Applications to *P-T* sections and geothermometry[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 167(2): 968.
- Li Lirong, Wang Zhengqi and Xu Deru. 2021. Mineral assemblage characteristics of the Mianhuakeng uranium deposit in northern Guangdong Province and its significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 40(3): 513~524(in Chinese with English abstract).
- Li Yanhe, Duan Chao, Zhao Yue, *et al.* 2016. The role of oxidizing reducing barrier in mineralization of hydrothermal uranium ore[J]. Acta Geologica Sinica, 90(2): 201~218 (in Chinese with English abstract).
- Ling Hongfei. 2011. Origin of hydrothermal fluids of granite-type uranium deposits: Constraints from redox condition[J]. Geological Review, 57(2): 193~206(in Chinese with English abstract).
- Liu Jialin, Cai Yuqi, Xu Hao, *et al.* 2015. Comparative study of the fluid inclusion homogenization temperature of Mianhuakeng and Changpai regions in Southern Zhuguang Uranium[C]//China Geological Society 2015 Academic Annual Conference Papers Abstract Compilation, 340~342(in Chinese with English abstract).
- Liu Wenquan, Liu Bin, Luo Qiang, *et al.* 2022. In-situ trace element and sulfur isotope of pyrite constrain ore genesis in Shulouqiu uranium deposit, North Guangdong[J]. Earth Science, 47(1): 178~191(in Chinese with English abstract).
- Liu Y P, Zhang S Y and Zhang H F. 2016. Advances on mineral genesis of chlorite: A review[J]. Advances in Geosciences, 6(3): 264~282.
- Liu Zhengyi, Zhang Yuyan and Li Xiaoguang. 2012. Alternation effect on the solution of uranium in granite type uranium deposit and its significance for ore exploring[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 35(3): 216~222 (in Chinese).
- Lu Xiaoliang, Zhu Mingqiang and Wu Tie. 2015. Study on the stable isotope composition and hydrothermal fluids origin of uranium deposits in southern Zhuguangshan pluton[J]. Uranium Geology, 31(2): 65~72, 88 (in Chinese with English abstract).
- Li Faqiao, Tang Juxing, Song Y, *et al.* 2024. Major elements geochemistry of chlorite in different ore deposits and its genesis and exploration significance: A case study from Naruo porphyry Cu deposit in Duolong ore district, Tibet[J]. Front. Earth Sci, 12: 1378820.
- Mohanty S P and Mishra P K. 2023. Greenalite-Chamosite composition, geothermometry and oxygen fugacity variations in pisolitic ironstone and carbonates of the Chilpi Group: Implication on Paleoproterozoic seawater chemistry[J]. Physics and Chemistry of Minerals, 50(4): 120.
- Nieto F. 1997. Chemical composition of metapelitic chlorites: X-ray diffraction and optical property approach[J]. European Journal of Mineralogy, 9(4): 829~842.
- Pang Yaqing, Fan Honghai, Gao Fei, *et al.* 2019. Helium and argon isotopic compositions of fluid inclusions and tracing to the source of ore-forming fluids for the southern Zhuguang uranium ore field in northern Guangdong Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(9): 2 765~2 773(in Chinese with English abstract).
- Pang Yaqing, Gao Fei, Meng Xiaoqing, *et al.* 2023. Geochronological and geochemical characteristics and geological significances of mafic dykes from Changjiang uranium ore field in northern Guangdong[J]. Uranium Geology, 39(2): 251~264(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: 1 373~1 379.
- Schmidt D and Livi K J T. 1999. HRTEM and SAED investigations of polytypism, stacking disorder, crystal growth, and vacancies in chlorites from subgreenschist facies outcrops[J]. American Mineralogist, 84(1~2): 160~170.
- Schroyen K and Muechez P. 2000. Evolution of metamorphic fluids at the Variscan fold-and-thrust belt in eastern Belgium[J]. Sedimentary Geology, 131(3): 163~180.
- Shen Weizhou, Liu Lili, Yao Wei, *et al.* 2011. Geochemical characteristics and causes of wall rock alteration in the No. 302 uranium deposit, northern Guangdong[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 30(1): 71~82(in Chinese with English abstract).
- Sun Guoquan, Fan Honghai, Gao Yongbao, *et al.* 2022. Study on characteristics of wall rock alteration and fluid mineralization in Shulouqiu deposit, northern Guangdong[J]. Mineral Deposits, 41(2): 345~358(in Chinese with English abstract).
- Tan Jing and Liu Rong. 2007. The necessity of Fe/(Fe+Mg) adjustment

- on the compositional geothermometer of low temperature chlorite[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, (2): 173~178 (in Chinese with English abstract).
- Tournassat C, Tinnacher R M, Grangeon S, *et al.* 2018. Modeling uranium(VI) adsorption onto montmorillonite under varying carbonate concentrations: A surface complexation model accounting for the spillover effect on surface potential[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 220: 291~308.
- Walshe J L. 1986. A six-component chlorite solid solution model and the conditions of chlorite formation in hydrothermal and geothermal systems[J]. *Economic Geology*, 81(3): 681~703.
- Wang Dazhao, Leng Chengbiao, Qin Chaojian, *et al.* 2022. Geochemical characteristics and mineralization of uranium [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 46(2): 282~302 (in Chinese with English abstract).
- Wiewióra A and Weiss Z. 1990. Crystallochemical classifications of phyllosilicates based on the unified system of projection of chemical composition: II. The chlorite group[J]. *Clay Minerals*, 25(1): 83~92.
- Wu Dehai. 2020. Geochemical Characteristics of Hydrothermal Altered Minerals and Uranium Mineralization in Mianhuakeng Uranium Deposit, Northern Guangdong Province[D]. Fuzhou: East China Institute of Technology (in Chinese with English abstract).
- Vidal O. 2001. A thermodynamic model for Fe-Mg aluminous chlorite using data from phase equilibrium experiments and natural pelitic assemblages in the 100 to 600°C, 1 to 25 kb range[J]. *American Journal of Science*, 301(6): 557~592.
- Vandeginste V, Swennen R, Gleeson S A, *et al.* 2005. Zebra dolomitization as a result of focused fluid flow in the Rocky Mountains Fold and Thrust Belt, Canada[J]. *Sedimentology*, 52(5): 1 067~1 095.
- Xie X G, Byerly G R and Ferrell Jr R E. 1997. Ilb 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.
- Zane A and Weiss Z. 1998. A procedure for classifying rock-forming chlorites based on microprobe data[J]. *Rendiconti Lincei*, 9(1): 51~56.
- Zang W and Fyfe W S. 1995. Chloritization of the hydrothermally altered bedrock at the Igarapé Bahia gold deposit, Carajás, Brazil[J]. *Mineralium Deposita*, 30(1): 30~38.
- Zhang Chuang, Cai Yuqi, Xu Hao, *et al.* 2016. Mineralization mechanism of 302 uranium deposit, North Guangdong Province: Evidence from fluid inclusions[J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 39(2): 156~164 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Li, Sun Liqiang, Chen Weifeng, *et al.* 2018. Study on chlorites and uranium-source minerals of Uranium-ore-bearing Changjiang granite in southern Zhuguang composite[J]. *Geological Journal of China Universities*, 24(1): 13~32 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Long, Chen Zhenyu, Tian Zejin, *et al.* 2017. Chemical composition of biotite and chlorite in the uranium-bearing and barren granites, northern Guangdong Province, South China: Implications for uranium mineralization[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(5): 62~75 (in Chinese).
- Zhang Min and Ou Guangxi. 2009. Study on geological and fluid inclusions of 302 uranium deposit[C]//The 12th Academic Annual Conference of China Mineral Rock Geochemistry, 188 (in Chinese with English abstract).
- Zhang S, Xiao B, Long X, *et al.* 2020. Chlorite as an exploration indicator for concealed skarn mineralization: perspective from the Tonglushan Cu-Au-Fe skarn deposit, Eastern China[J]. *Ore Geol. Rev.*, 126, 103778.
- Zhang Wei, Zhang Shouting, Cao, Huaweng, *et al.* 2014. Characteristics of chlorite minerals from Xiaolonghe tin deposit in West Yunnan, China and their geological implications[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 41(3): 318~328 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Youdong, Wu Junqi, Ling Hongfei, *et al.* 2016. Mineral chemistry of biotite and chlorite in western part of Fucheng granite, southern Jiangxi Province: Implications for uranium mineralization[J]. *Mineral Deposits*, 35(1): 153~168 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yuting. 2021. Study on Ore-Forming Fluid Action of Granite-Type Uranium Deposits in the Yangtze River Area of Southern Guangdong [D]. Beijing: Beijing Institute of Geology of Nuclear Industry (in Chinese with English abstract).
- Zheng Guodong, Luo Qiang, Liu Wenquan, *et al.* 2021. In-situ U-Pb age and elemental characteristics of pitchblende in Shulouqiu uranium deposit and its geological significance[J]. *Earth Science*, 46(6): 2 172~2 187 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Qiaorong. 1983. Calculation of the Fe³⁺ and Fe²⁺ contents in silicate and Ti-Fe Oxide minerals from EMPA data[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1: 55~82 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Weiping. 2022. Chronological study advances of the granites and uranium mineralization in the Changjiang uranium ore-field [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 46(6): 1 327~1 337 (in Chinese with English abstract).

- Zhong Fujun, Yan Jie, Xia Fei, *et al.* 2019. In-situ U-Pb isotope geochronology of uraninite for Changjiang granite-type uranium ore field in northern Guangdong, China; Implications for uranium mineralization [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9): 2 727~2 744 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 范洪海, 庞雅庆, 何德宝, 等. 2023. 华南花岗岩型铀矿成矿作用及成矿预测[J]. *地球学报*, 44(5): 887~896.
- 高飞, 庞雅庆, 林锦荣, 等. 2014. 诸广棉花坑铀矿床花岗岩中黑云母成分特征及其成矿意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 33(3): 384~388.
- 李丽荣, 王正其, 许德如, 等. 2021. 粤北棉花坑铀矿床矿物共生组合特征及其意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 40(3): 513~524.
- 李延河, 段超, 赵悦, 等. 2016. 氧化还原障在热液铀矿成矿中的作用[J]. *地质学报*, 90(2): 201~218.
- 凌洪飞. 2011. 论花岗岩型铀矿床热液来源——来自氧逸度条件的制约[J]. *地质论评*, 57(2): 193~206.
- 刘佳林, 蔡煜琦, 徐浩, 等. 2015. 诸广南部棉花坑及长排地区流体包裹体均一温度对比研究[C]//中国地质学会2015年学术年会论文摘要汇编, 340~342.
- 刘文泉, 刘斌, 罗强, 等. 2022. 粤北书楼丘铀矿床黄铁矿原位微量元素、硫同位素组成及矿床成因指示[J]. *地球科学*, 47(1): 178~191.
- 刘正义, 张玉燕, 李晓光. 2012. 花岗岩型铀矿床中矿前期蚀变对铀活化溶解的实验研究及其找矿意义[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 35(3): 216~222.
- 卢小亮, 祝民强, 邬铁. 2015. 诸广岩体南部铀矿区稳定同位素组成及矿床成因分析[J]. *铀矿地质*, 31(2): 65~72, 88.
- 庞雅庆, 范洪海, 高飞, 等. 2019. 粤北诸广南部铀矿田流体包裹体的氩同位素组成及成矿流体来源示踪[J]. *岩石学报*, 35(9): 2 765~2 773.
- 庞雅庆, 高飞, 孟晓庆, 等. 2023. 粤北长江铀矿田基性岩脉年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *铀矿地质*, 39(2): 251~264.
- 沈渭洲, 刘莉莉, 姚薇, 等. 2011. 粤北302铀矿床围岩蚀变的地球化学特征和成因研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 30(1): 71~82.
- 孙国权, 范洪海, 高永宝, 等. 2022. 粤北书楼丘矿床围岩蚀变特征与流体成矿作用[J]. *矿床地质*, 41(2): 345~358.
- 谭靖, 刘嵘. 2007. 低温绿泥石成分温度计 Fe/(Fe+Mg) 校正的必要性问题[J]. *矿物学报*, (2): 173~178.
- 王大钊, 冷成彪, 秦朝建, 等. 2022. 铀的地球化学性质与成矿作用[J]. *大地构造与成矿学*, 46(2): 282~302.
- 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]. 抚州: 东华理工大学.
- 张闯, 蔡煜琦, 徐浩, 等. 2016. 粤北302铀矿床成矿机制探讨——来自流体包裹体的证据[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 39(2): 156~164.
- 张丽, 孙立强, 陈卫锋, 等. 2018. 诸广南部产铀花岗岩长江岩体中的绿泥石和铀源矿物研究[J]. *高校地质学报*, 24(1): 13~32.
- 张龙, 陈振宇, 田泽瑾, 等. 2017. 粤北产铀与不产铀花岗岩中黑云母和绿泥石矿物化学特征及其与铀成矿的关系[J]. *地学前缘*, 24(5): 62~75.
- 张敏, 欧光习. 2009. 302铀矿床地质与流体包裹体研究[C]. 中国矿物岩石地球化学学会第12届学术年会论文集, 188.
- 赵友东, 吴俊奇, 凌洪飞, 等. 2016. 赣南富城岩体黑云母及其蚀变产物绿泥石的矿物化学研究——对铀成矿的指示意义[J]. *矿床地质*, 35(1): 153~168.
- 赵宇霆. 2021. 诸广南长江地区花岗岩型铀矿成矿流体作用研究[D]. 北京: 核工业北京地质研究院.
- 郑国栋, 罗强, 刘文泉, 等. 2021. 粤北书楼丘铀矿床沥青铀矿原位 U-Pb 年龄和元素特征及其地质意义[J]. *地球科学*, 46(6): 2 172~2 187.
- 郑巧荣. 1983. 由电子探针分析值计算 Fe³⁺ 和 Fe²⁺ [J]. *矿物学报*, 1: 55~82.
- 朱卫平. 2022. 长江铀矿田花岗岩与铀成矿年代学研究进展[J]. *物探与化探*, 46(6): 1 327~1 337.
- 钟福军, 严杰, 夏菲, 等. 2019. 粤北长江花岗岩型铀矿田沥青铀矿原位 U-Pb 年代学研究及其地质意义[J]. *岩石学报*, 35(9): 2 727~2 744.