

桂北摩天岭含铀花岗岩体岩石地球化学特征

邹明亮, 舒孝敬, 范立亭, 梁永东

核工业总公司 230 研究所, 长沙 410011

摘要: 钾交代及硅质交代花岗岩为摩天岭地区最重要的富铀岩石。根据薄片镜下显微鉴定及铀矿石产出特征, 将岩石划分为花岗岩、弱蚀变花岗岩、钾交代花岗岩和硅质交代花岗岩 4 种类型。通过剖析不同类型岩石中常量元素、大离子亲石元素(LILE)、高场强元素(HFSE)及稀土元素(REE)地球化学特征指出, 花岗岩具有明显的低 K/Rb、低 Ba/Rb 和高 Rb/Sr 值特征, 判定岩体具有含铀潜质。弱蚀变花岗岩主要表现为黑云母绿泥石化和白云母化, 而此过程为 Rb、Pb、U 丢失而流体中相对富集的过程。铀矿物主要赋存于钾交代及硅质交代花岗岩中, 虽然赋铀岩石存在明显差异, 但两者均表现出 K/Ba 和 Rb/Sr 值降低而 Ba/Rb 值增高、相对富集重稀土元素以及两者之间的高场强元素及稀土元素含量表现出共轭消长等特征, 表明成矿流体组分主要来自花岗岩, 不同类型铀矿石可能为同一铀成矿流体不同成矿期的产物。

关键词: 流体-岩石相互作用; 次生黑云母; 大离子亲石元素; 铀成矿作用; 摩天岭花岗岩体

中图分类号: P588.12⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2011)04-0415-08

Petrography and Geochemistry of Uranium-Bearing Granite Mass in the Motianling Area, Northern Guangxi

ZOU Ming-liang, SHU Xiao-jing, FAN Li-ting, LIANG Yong-dong

Research Institute NO. 230, CNNC, Changsha, Hunan 410011, China

Abstract: Potash and kiesel metasomatic granite are the most important uranium-rich types of rock in motianling area. The rock have been divided into four distinct types just as granite, poor-alteration granite, potash and kiesel metasomatic granite based on thin-section microscopic analysis and uranium mineral occurrence characteristics. This study analyse the geochemical behavior of major element, large-ion lithophile elements(LILE), high field strength element(HFSE) and rare earth elemen(REE) in different types of rock, indicate that there was low K/Rb, low Ba/Rb and high Rb/Sr values characteristics in granite, judged the mass own uranium bearing potentiality. Poor-alteration granite was shown blotite chloritization and(or) muscovitization mainly, accompanied with Rb, Pb and U element lossing and fluid enrichment relatively. Uranium mineral was consisted in potash and kiesel metasomatic granite majority, although the rock contained uranium mineral was difference obviously, both shown the values of K/Ba and Rb/Sr decrease and Ba/Rb increase, heavy rare earth elemen(HREE) enrichment relatively, HFSE and REE shown conjugate decrease and increas characteristices between them. It is manifested that the composition of mineralizing fluid was originated with granite, the different uranium mineral was formed in different metallizing phase with the same mineralizing fluid probability.

Key words: fluid-rock interaction; secondary blotite; large-ion lithophile elements; uranium mineralise; Motianling granite mass

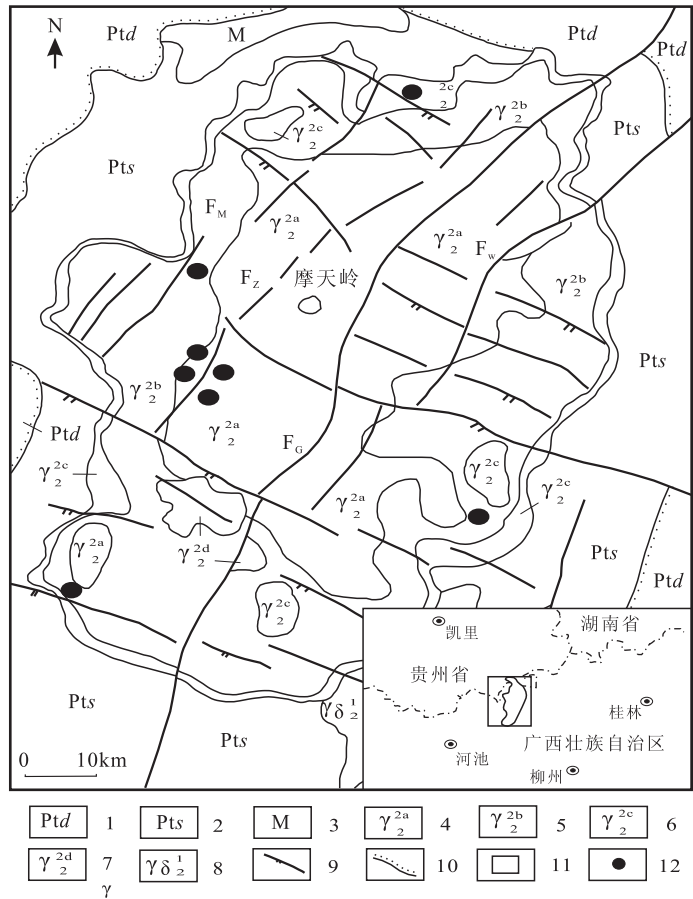
摩天岭岩体是华南最老的含铀花岗岩, 矿岩时差大、成矿多阶段性的特点历来受到关注。一些新近提出的理论为深入了解岩体地球化学特征提供了可借鉴的方法。其中, 大离子亲石元素对确定与花

岗岩有关元素的迁移和流体-岩石相互作用发挥了一定的作用^[1], 高场强元素和稀土元素为不活动性元素, 即对变质作用、交代蚀变作用惰性的元素, 一直是成岩、成矿流体来源的判别依据。其中, Nex 等^[2]

通过对纳米比亚 Damaran 造山带中南部碰撞期后岩浆作用过程中的大离子亲石元素、高场强元素与铀成矿关系的讨论,认为铀富集主要由于原始的岩浆受全新世大气水作用重新分配形成,而不是受热流体改造;Sen 等^[3]研究认为元素比值可以在确定花岗岩类型以及解释成岩历史方面提供准确的信息,可以作为不同类型花岗岩中铀矿勘查的评论依据;张展适等^[4]通过对贵东花岗杂岩体的稀土元素特征研究认为帽峰岩体的稀土总量及配分模式的改变是由于地幔流体对稀土元素具有很强的溶解和迁移能力所导致,因而铀的活化与地幔流体有关;张国玉等^[5]通过对相山、下庄铀矿田的围岩及矿石中稀土元素特征研究表明造成矿石中稀土元素特征不同的主要原因是围岩蚀变的差异性所导致;陈灿^[6]指出稀土元素的研究不但有助于阐明产铀岩体(岩石)的成因,而且可以有效地追溯铀的来源。张展适等^[7]从岩石蚀变、不同介质中稀土元素的四分组效应等方面讨论了诸广-下庄铀矿集区内与铀成矿有关的水-岩相互作用的地质地球化学特征,揭示铀来源于壳源。从岩石学特征探讨不同岩石类型中常量元素、大离子亲石元素、高场强元素及稀土元素含量的变化,期望通过深入了解与铀成矿有关的元素迁移和富集规律,建立相关的地球化学判别模式。

1 地质背景

摩天岭岩体位于江南台隆西南缘的三防穹状复式背斜核部,为一多阶段复式侵入体,主体年龄约为 825 Ma,属雪峰期产物,是成熟度高的大陆硅铝质岩石的部分熔融产物^[8],也是华南最老的含铀花岗岩。围岩为元古代四堡群和丹洲群岛弧式复理石建造和细碧角斑岩建造的绿片岩相沉积变质岩,与岩体呈突变接触关系。岩浆岩主要为中-细粒黑云母花岗岩和细粒含斑黑云母花岗岩(晚阶段侵入体)。区内断裂主要为北北东和北西向(图 1),北北东向为主要控矿断裂,麻木岭(F_M)、梓山坪(F_Z)、高武(F_G)和乌指山(F_W)4 条近平行排列的北北东向硅化断裂带及其次级断裂蚀变带控制了所有花岗岩型铀矿床(点)的分布。岩体的热液活动有加里东期碱性热液活动和喜马拉雅期硅质酸性热液活动。与矿化有关的围岩蚀变主要有硅化、绿泥石化、伊利石化(水云母化)、胶状、粒状黄铁矿化和赤铁矿化等。两期铀成矿时代分属海西期和



1. 丹洲群;2. 四堡群;3. 雪峰期碱长花岗岩斑岩;4. 内部相;5. 过渡相;6. 边缘相;7. 晚阶段侵入体;8. 四堡期花岗闪长岩;9. 断裂;10. 不整合地质界线;11. 研究区;12. 采样点
1. Danzhou group; 2. Sibao group; 3. alkali feldspar-granite porphyry of Xuefeng stage; 4. internal phase; 5. transition phase; 6. fringe phase; 7. intrusive mass of late phase; 8. granodiorite of Sibao phase; 9. fault; 10. geological limitation line of unconformity; 11. region of interest; 12. sample point

图 1 桂北摩天岭地区地质略图

Fig. 1 Schematic geological map of the Motianling area, northern Guangxi

喜马拉雅期,具有矿岩时差大、成矿多阶段性的特征。

2 岩石类型划分

根据野外观察和室内鉴定,本区的花岗岩可分为 4 类(表 1)。

(1)花岗岩(AO):主要为中-细粒黑云母钾长(二长)花岗岩,部分细粒花岗岩中含石英和(或)钾长石斑晶,大小 3~6 mm。石英含量 26%~29%,以条纹长石和斜长石为主,条纹长石含量 8%~36%,大部分大于 20%,斜长石最高含量可达 36%;微斜长石次之(平均含量 12%)。黑云母含量均在 5%以上,未见明显蚀变。

表 1 桂北摩天岭地区花岗岩交代蚀变分类方案

Table 1 Classification scheme for the metasomatic alteration granite in the Motianling area, northern Guangxi

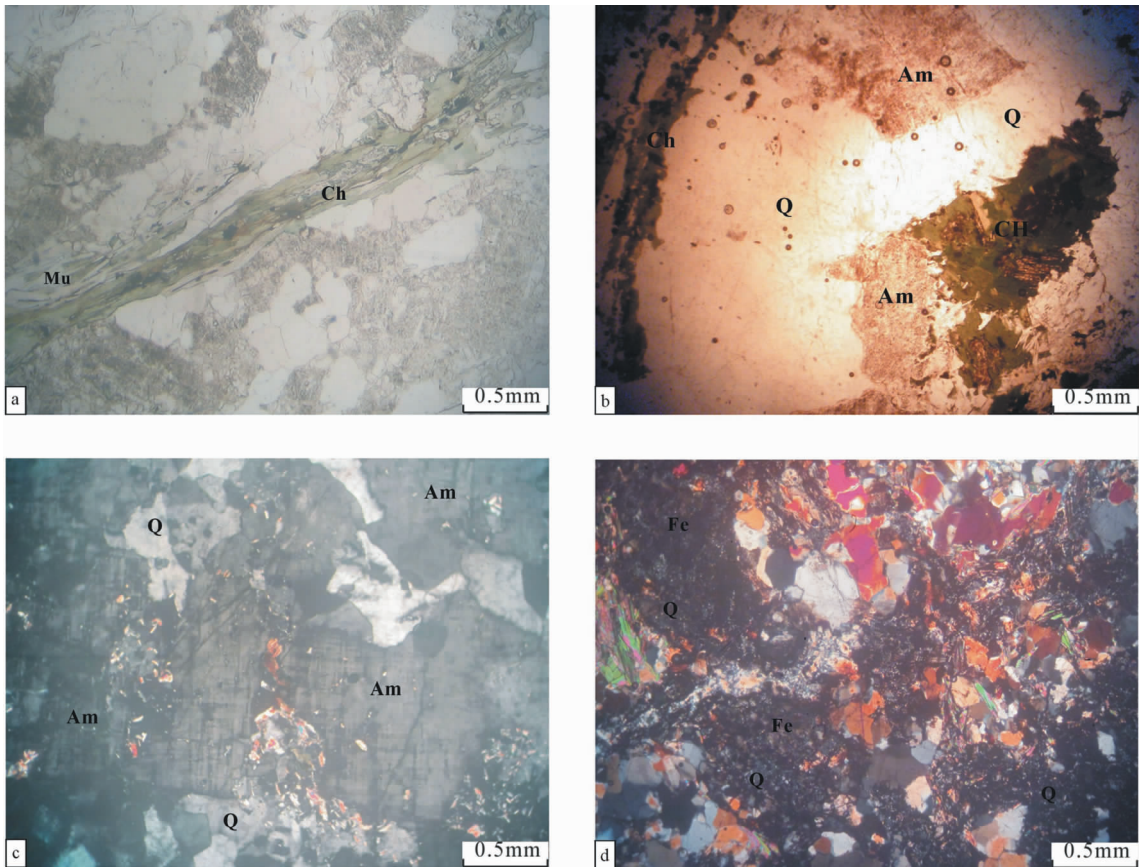
花岗岩原始结构保存完整(A),非铀矿化		花岗岩原始结构保存不完整(B),铀矿化	
未蚀变(O)	弱蚀变(A)	强烈蚀变(A)	
		钾交代(K)	硅质交代(S)
黑云母保存完整,花岗岩原始结构完整,未见明显的蚀变	黑云母绿泥石化、白云母化、赤铁矿化和弱硅化等,花岗岩原始结构完整	石英和斜长石含量明显减少,微斜长石含量大幅增加,有大量次生铀矿物	微晶石英交代长石,呈长石假象,残余细晶石英颗粒、铁质伴生有微晶石英

(2)弱蚀变花岗岩(AA):条纹长石含量增加,最高可达到45%,斜长石和微斜长石含量明显减

少,微斜长石大多在10%以下,黑云母绿泥石化和白云母化(图2A),偶见赤铁矿化。

(3)钾交代花岗岩(BAK):石英、斜长石和条纹长石含量减少,微斜长石含量急剧增加。石英含量为16%~22%,平均为20%。斜长石和条纹长石含量接近于0,微斜长石含量最高可达63%,平均含30.75%。镜下见次生黑云母分布于后期充填的硅质细脉与微斜长石接触部位和硅质细脉中(图2B,C)。不同程度的蚀变使绿泥石和白云母大幅度增加(绿泥石最高可达30%)。具赤铁矿化。

(4)硅质交代花岗岩(BAS):主要表现为微晶石英交代长石,呈长石假象,残余有细晶石英颗粒,石英含量为75%~87%。铁质与微晶石英伴生,呈混浊状(图2D)。野外用FD-3025定向辐射仪鉴定产



A. 弱蚀变花岗岩,黑云母绿泥石化(Ch)和白云母化(Mu),样品号074-1,单偏光;B. 次生黑云母及绿泥石化,黑云母分布于后期硅质细脉(Q)与微斜长石(Am)接触部位与硅质细脉中,样品号425y-19,单偏光;C. 钾交代花岗岩中充填的硅质细脉和次生黑云母,样品号098-3,正交偏光;D. 硅质交代花岗岩,见有残余石英颗粒,微晶石英充填于残存的石英粒间,呈长石假象,与铁质(Fe)伴生,样品号128-4,正交偏光

A. Poor-alteration granite, biotite was chloritization(Ch) and muscovitization(Mu), sample number 074-1, plainlight; B. Secondary biotite and chloritization, biotite was distributed in contact place between late kiesel slender vein(Q) and kalifeldspar or kiesel slender vein, sample number 425y-19, plainlight; C. Kiesel slender vein and biotite was filled into potash metasomatic granite, sample number 098-3, crossed polars; D. Kiesel metasomatic granite, residual quartz grain, micrite quartz was filled into residual quartz grain, present as feldspar pseudomorph, accompanied with ferruginous(Fe), sample number 128-4, crossed polars

图 2 弱蚀变花岗岩及产铀岩镜下显微特征

Fig. 2 The microscope characteristics of the poor-alteration granite and the uraniumiferous rock

铀岩石主要为钾交代和硅质交代花岗岩,见铜铀云母和钙铀云母等次生铀矿物。

3 地球化学特征

3.1 分析方法

在薄片观察基础上挑选具代表性样品于玛瑙钵中粉碎至 200 目。样品测试由核工业 230 研究所分析测试中心完成。其中 Si、Al、Fe(包括了 FeO 和 Fe₂O₃)采用滴定法,检测限为 0.1%,误差 2%;

K₂O、Na₂O 用 6400A 型火焰光度计-原子吸收光度法测定,检测限为 0.01%;Th 由 UV-2102PC 光度计测定;常量 U 通过滴定法完成,微量 U 由紫外脉冲荧光微量 U 分析仪测定,标准偏差少于 5%;Mg、Ca 及其他元素含量由 Finnigan_MAT 公司制造的 Elment 高分辨率电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)分析,检测限低于 0.5×10^{-9} ,相对标准偏差小于 5%。分析结果见表 2。

表 2 桂北摩天岭地区岩石元素含量分析结果

Table 2 Analytical result of the element contents in rocks of the Motianling area, Northern Guangxi

编 号	421y-13	009-1	074-3	147-1	177-1	116-1	087-2	074-1	421y-3	421y-1	310y-10	098-3	425y-19	176-2	128-4	128-3
类 型	AO	AO	AO	AO	AA	AA	AA	AA	AA	AA	BAK	BAK	BAK	BAK	BAS	BAS
SiO ₂	76.04	73.63	75.69	75.96	75.57	75.04	76.61	76.16	74.89	74.62	58.72	67.6	75.18	56.14	75.84	83.8
Al ₂ O ₃	12.36	13.48	12.66	11.88	13.12	12.75	11.96	12.8	12.49	12.93	10.79	16.88	12.35	15.06	11.16	8.93
K ₂ O	4.61	5.25	5.04	5.79	5.15	5.14	6.28	4.13	4.81	5.17	3.29	7.62	5.15	5.96	2.52	1.89
Na ₂ O	2.99	3.39	2.51	1.88	2.08	2.15	1.96	3	2.5	3	0.64	0.14	2.5	0.13	0.07	0.06
MgO	0.38	0.14	0.13	0.16	0.19	0.24	0.25	0.34	0.64	0.55	4.57	0.81	0.48	7.52	0.27	0.19
CaO	0.25	0.41	0.55	0.31	0.29	0.25	0.22	0.29	0.36	0.35	4.22	0.34	0.29	1.15	0.18	0.11
Fe ₂ O ₃	0.53	0.58	0.43	0.81	0.84	0.64	0.2	0.87	0.7	0.57	0.47	1.52	0.45	3.33	4.89	1.32
FeO	2.19	2.24	1.22	1.24	2.08	1.91	1.23	1.01	2.96	1.58	6.91	0.91	1.68	3.69	0.36	0.3
Rb	314	420	418	303	373	396	311	337	282	360	255	629	299	390	231	170
Sr	10.1	12.8	9.18	21.5	16.9	19.9	31	13.7	15.7	23.4	40.3	34	14.9	33.5	21.9	13.3
Ba	42.1	25.2	89.1	59.9	22.4	60.4	115	61.7	87.3	129	70.1	362	92.2	83.8	79.9	73.7
Pb	16.5	29.9	29.3	35.7	31.3	27.2	33.9	13	34.7	18.7	31.4	44.2	226	13.7	229	73.5
Th	11.5	11.1	14.2	14.3	14.1	13.7	12.6	15.1	11.8	11.9	10	21.5	10.7	20.7	13.4	7.86
U	12.9	4.63	9	17.2	5.46	6.87	15.5	8.28	10.8	13.1	92.6	70.9	3368	65	415	2669
Zr	117	133	152	135	151	153	103	176	124	128	111	216	116	196	138	80.7
Hf	5.11	5.1	5.1	4.26	5.32	5.54	3.34	6.58	4.72	4.33	4.1	6.34	4.1	6.32	5.35	2.76
Ta	2.16	2.13	1.9	0.84	1.83	1.9	1.15	2.68	1.58	1.64	0.91	1.76	1.57	2.79	1.86	1.46
Nb	8.69	9.31	10	7.72	9.91	9.74	6.62	13.9	8.36	8.21	5.86	15.9	8.91	12.5	8.85	5.81
La	8.85	8.63	11.4	11.2	11.3	4.4	9.21	9.25	14.9	11.5	6.07	20.6	18.9	17	13.5	5.31
Ce	20.6	21.5	27.2	24.7	24.3	24.9	21	21.5	31.8	28.3	13.1	35.2	45.7	40.8	30.9	12.5
Pr	2.43	2.49	3.23	2.9	2.86	1.29	2.45	2.72	3.73	3.16	1.54	4.68	5.6	5.09	3.23	1.4
Nd	8.85	9.04	12	10.8	10.4	4.85	8.95	10.1	13.2	11.5	5.79	17.4	21	19.4	11.5	5.16
Sm	2.56	2.76	3.7	3.05	3.05	1.7	2.6	3.13	3.39	3.21	1.8	4.07	6.38	6.6	3.27	1.54
Eu	0.11	0.09	0.08	0.17	0.09	0.11	0.16	0.09	0.27	0.23	0.17	0.39	0.77	0.41	0.14	0.08
Gd	2.5	3	4.02	3.08	3.72	2.53	2.99	3.52	3.45	3.63	2.23	4.45	6.98	8.98	3.12	1.79
Tb	0.59	0.78	1.03	0.8	0.92	0.8	0.75	0.96	0.77	0.88	0.57	1.03	1.72	2.36	0.68	0.47
Dy	4.14	5.54	7.36	5.52	6.72	6.19	5.45	6.75	5.36	6	4.07	7.29	11.8	17	4.68	3.21
Ho	0.78	1.09	1.42	1.1	1.37	1.26	1.11	1.27	1.03	1.13	0.79	1.4	2.08	3.2	0.86	0.57
Er	2.48	3.56	4.47	3.29	4.23	3.75	3.43	3.97	3.18	3.35	2.39	4.41	6.05	9.36	2.55	1.68
Tm	0.41	0.62	0.76	0.53	0.68	0.58	0.57	0.66	0.51	0.54	0.38	0.68	0.95	1.39	0.4	0.27
Yb	2.83	4.24	4.97	3.29	4.58	3.57	3.65	4.47	3.24	3.38	2.75	4.33	5.81	8.43	2.75	1.74
Lu	0.4	0.62	0.72	0.49	0.65	0.5	0.5	0.61	0.46	0.47	0.38	0.61	0.75	1.11	0.37	0.25
Y	24.8	31.9	42.7	31.4	40.3	37.3	32.4	37.7	32.3	34.8	22.8	42.2	67.5	101	26.8	18.3
K/Rb	60.64	51.63	49.80	78.93	57.03	53.61	83.41	50.62	70.45	59.27	53.32	50.06	71.17	63.12	44.98	46.04
Rb/Sr	31.09	32.81	45.53	14.09	22.07	19.90	10.03	24.60	17.96	15.38	6.33	18.50	20.07	11.64	10.55	12.78
Ba/Rb	0.13	0.06	0.21	0.20	0.06	0.15	0.37	0.18	0.31	0.36	0.27	0.58	0.31	0.21	0.35	0.43
Zr/Hf	22.90	26.08	29.80	31.69	28.38	27.62	30.84	26.75	26.27	29.56	27.07	34.07	28.29	31.01	25.79	29.24
TE ₁₋₃	1.02	1.06	1.04	1.01	1	1.34	1.01	1.05	0.99	1.04	1.01	0.93	1.05	1.05	1.01	1.07
ΣREE	57.53	63.96	82.36	70.92	74.87	56.43	62.82	69.00	85.29	77.28	42.03	106.54	134.49	141.13	77.95	35.97

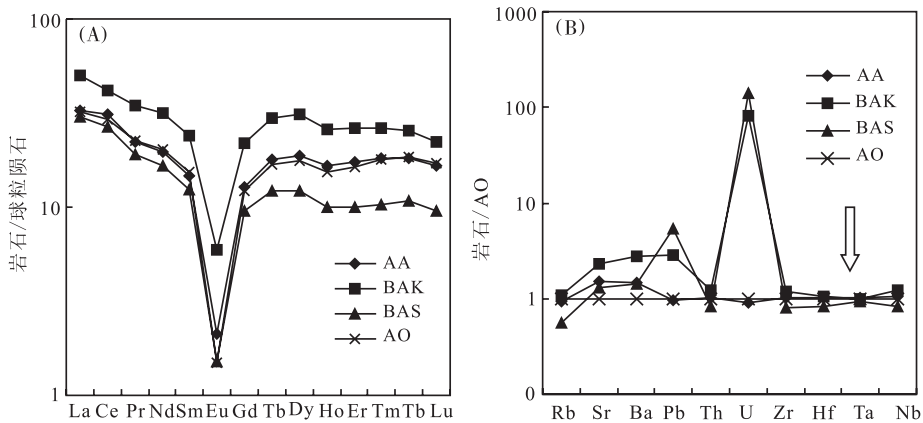
注:常量元素单位为%,痕量元素单位为 $\times 10^{-6}$;所用的球粒陨石值据文献[9];TE₁₋₃计算公式据文献[10]

3.2 总体特征

区内花岗岩中、SiO₂ 平均含量为 75.33% (73.63%~76.04%), K₂O 平均为 5.17% (4.61~5.79%), Na₂O 平均为 2.69% (1.88%~3.39%), CaO 平均为 0.38% (表 2); 均接近前人分析结果 (平均含量分别为 75.233%、5.01%、2.58% 和 0.23%^[13])。MgO 含量最高为 0.38%, Fe₂O₃ 和 FeO 含量分别为 0.58% 和 1.72%, 比值为 0.34。大离子亲石元素 (LILE) 以 Rb、Sr、Ba、Pb、Th 和 U 为例, 算术平均值分别为 363.75、13.40、54.08、27.85、12.78 和 10.93 × 10⁻⁶。高场强元素 (HFSE) 讨论了 Zr、Hf、Ta 和 Nb, 平均含量分别为 134.25、4.89、1.76 和 8.93 × 10⁻⁶ (表 2)。稀土元素球粒陨石标准化图呈现为右倾 V 型 (图 3A), 具较低的 ΣREE 值, 平均为 68.69 × 10⁻⁶, 与前人分析结果吻合^[11]。代表四分组效应强弱程度 (TE_{1,3}) 量化值为 1.01~1.05, 平均为 1.03。结合 Nb/Ta 和 Zr/Hf 值, 表明本区花岗岩为低度低共熔的高演化花岗岩^[10]。

弱蚀变花岗岩中 SiO₂、K₂O、Na₂O、CaO 含量和 Fe₂O₃ 和 FeO 含量比值均接近于花岗岩。钾交代花岗岩中的 SiO₂ 平均含量为 64.41%, Na₂O 含量为 0.85%, 明显低于花岗岩, K₂O 含量高于花岗岩 (为 5.51%)。CaO 明显偏高, 平均可达到 1.5%

(其中样品 310y-10 中以方解石形式出现), MgO 最高可达 7.52%, Fe₂O₃/FeO 值为 0.43, 均高于花岗岩。硅质交代花岗岩有最高的 SiO₂ 含量, K₂O、Na₂O 和 CaO 明显低于花岗岩, Fe₂O₃/FeO 平均值为 8.99, 明显富 Fe₂O₃。LILE 和 HFSE 含量变化表现为硅质交代花岗岩中的 Rb 含量明显低于花岗岩, 其他岩石类型样品中未见明显变化 (图 3B); Sr 和 Ba 均有不同程度的增加, 以钾交代花岗岩的增幅最大, 与花岗岩的比值分别为 2.29 和 2.81, Pb 含量除弱蚀变花岗岩外均有不同程度的增高。Th 含量变化相对较小, 其中硅质交代花岗岩中含量低于花岗岩, 与花岗岩比值为 0.83, 弱蚀变花岗岩中的 U 含量低于花岗岩, 强烈蚀变花岗岩中的 U 含量为 65~3368 × 10⁻⁶; 表明蚀变和铀的成矿是矿物中 Sr、Ba 富集的过程, 黑云母的绿泥石化和白云母化是 Rb、Pb、U 丢失 (而流体中富集) 的过程。HFSE 含量均接近花岗岩, 钾交代和硅质交代花岗岩中的 HFSE 含量呈共轭消长关系 (图 3B 箭头所示)。钾交代花岗岩的 ΣREE 值较高, 硅质交代花岗岩最低 (为 56.96 × 10⁻⁶, 图 3A)。四分组效应的量化值 TE_{1,3} 定量分析表明, 钾交代花岗岩相对较低, 平均值为 1.01, 硅质交代花岗岩和弱蚀变花岗岩高于花岗岩 (TE_{1,3} 值为 1.03), 分别为 1.04 和 1.07, 相对变化较小。



A. REE 球粒陨石标准化配分模式; B. 样品中 LILE 和 HFSE 含量与花岗岩比值

A. Chondrite-normalized REE patterns; B. Ratio values of the LILE and HFSE content between sample and granite

图 3 不同岩石类型中 REE 标准化分布及微量元素含量比值图

Fig. 3 Content ratio of trace element and normalized REE patterns in the different types of rock

3.3 LILE 元素含量相关性研究

K₂O 与 Rb 具较好的正相关性 (图 4A), 表明 Rb+ 更多地以类质同像的形式取代 K⁺ 进入到矿物晶格中。可以看出硅质交代花岗岩有最低的 K₂O 和 Rb 含量, 这与石英晶体结构不利于 K⁺、Rb⁺ 的进入有关。LILE 元素比值一直是流体-岩石相互

作用的重要参考判别值^[1], 表明研究区产铀岩体具明显的 LLH (即低 K/Rb、低 Ba/Rb 和高 Rb/Sr 值^[3, 12]) 特征, 同时相对花岗岩表现出 K/Ba 和 Rb/Sr 值降低而 Ba/Rb 值增高的趋势 (图 4B, C, D)。同一地区岩石样品配对分析表明, 钾交代花岗岩的 K/Ba 值明显较低, 散点均投在等值线的右下角, 而

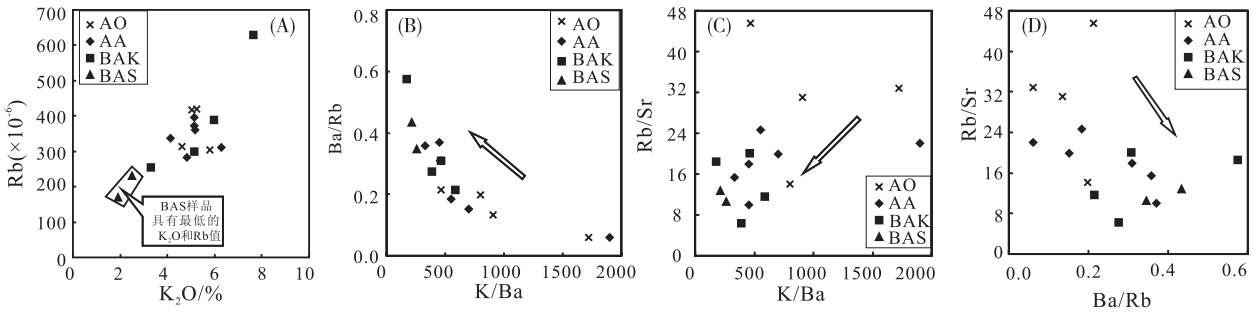
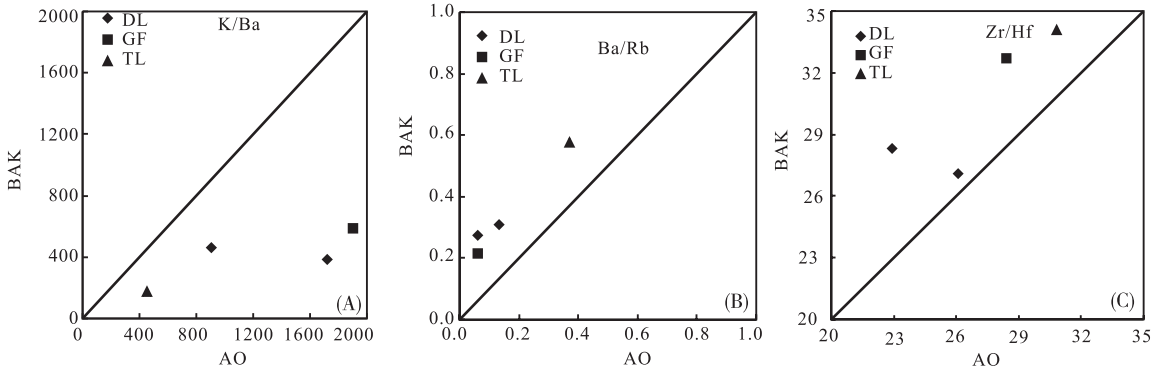


图 4 不同岩石类型中常、微量元素含量及其比值散点图

Fig. 4 Scatter diagram of the major-trace element contents and ratios in the different types of rock



A. K/Ba; B. Ba/Rb; C. Zr/Hf; DL,GF,TL,SJW 为采样点代号, 下同

A. K/Ba; B. Ba/Rb; C. Zr/Hf; Sample point code as DL,GF,TL,SJW, the same later

图 5 花岗岩与钾交代花岗岩中微量元素含量比值配对分布特征

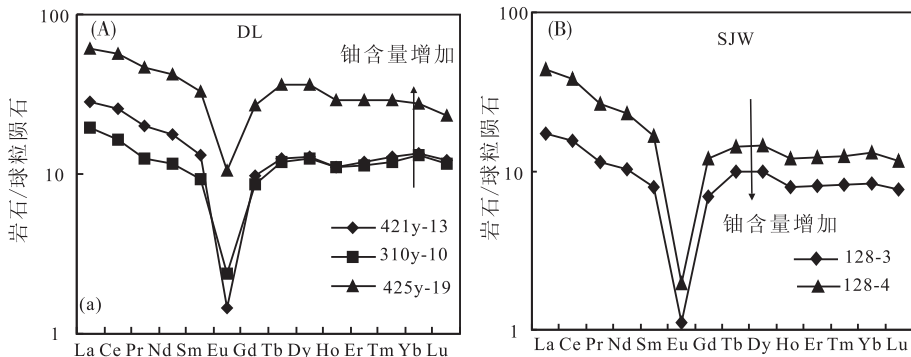
Fig. 5 Match patterns of trace element content ratio in granite and in potash metasomatic granite

Ba/Rb 值则投在等值线的左上角(图 5A,B)。表明钾交代和硅质交代花岗岩铀矿化的增强伴随 K/Ba、Rb/Sr 值的减少和 Ba/Rb 值的增高。

3.4 HFSE 和 REE 含量配对分析

通常将分配系数非常低的 HFSE 和 REE 作为成矿过程的指示剂。Zr 和 Hf(对应类似的 Nb 和 Ta)的价态、离子半径、分配系数等在各矿物中相近,在同类岩石中有相似的比值和变化趋势。从钾

交代花岗岩与花岗岩中 Zr/Hf 值投点图中可见,尽管 HFSE 中的单元素含量变化特征不明显(图 3B),但钾交代花岗岩中的 Zr/Hf 值明显高于花岗岩,均投在等值线的左上角(图 5C),因而钾交代花岗岩有相对较高的 Zr/Hf 和 Nb/Ta 值。REE 在成矿-蚀变过程中虽有一定的活动性,但作为一组元素,在成矿-蚀变阶段之间总体表现为稀土元素球粒陨石标准模式平行增长,同时富铀花岗岩有相对较高的



A. DL 地区花岗岩与钾交代花岗岩; B. SJW 地区硅质交代花岗岩

A. granite vs potash metasomatism granite in DL area; B. kiesel metasomatic granite in SJW area

图 6 不同岩石类型中 REE 标准化曲线分布特征

Fig. 6 The distribution characteristics of the REE normalized curves in the different types of rock

HREE/LREE 值, 标准化曲线大致呈近对称 V 型(图 6A, B; 表 2), 区别于花岗岩的右倾 V 型, 且钾交代花岗岩随铀含量的增加 Σ REE 也相应增高(图 6A), 而硅质交代花岗岩则恰好相反(图 6B), 与钾交代花岗岩中 Σ REE 值呈现共轭消长特征。

4 讨 论

主要的产铀岩石分为为钾交代花岗岩和硅质交代花岗岩。前者的 MgO 与 U 含量有一定的正相关性, 表明铀矿化与次生黑云母(进一步蚀变为绿泥石)有一定联系^[13, 14], 同时其中充填硅质细脉, 表明存在不同期流体作用的叠加。明显的 LLH 特征(表 2)表现为低 K/Ba、高 Ba/Rb 和高 Zr/Hf 值(相对于花岗岩; 图 5A, B, C), 其中低 K/Ba 和高 Ba/Rb 值可能与成矿流体有高 Ba 浓度, 以及 Ba 在其中的高分配系数有关^[15], Ba/Sr 值的增高同样表明分馏作用使其 Ba 含量的增高量超过了 Sr^[3]。HFSE 含量均接近于花岗岩, 以及稀土元素与花岗岩间的平行增减特征, 表明成矿流体中的组分主要来自花岗岩, 铀源岩与花岗岩之间有着本质联系; 弱蚀变花岗岩中 U 含量降低(图 3B), 而流体中富集, Zr/Hf 值增高可能与含 Zr 的新生矿物有关。REE 四分组效应强弱量化值(TE1, 3)与花岗岩类似, 与上述成矿流体中的元素主要来自花岗岩的结论相吻合。 Σ REE 值与 U 含量具正相关性, 稀土配分模式图表现出大致平行增长的趋势(图 3A, 图 6A), 表明随铀成矿流体—岩石相互作用的 REE 递增与 U 呈同步富集。后者的 SiO₂ 明显较高(最高可达 83.8%, 且主要为石英), Fe₂O₃/FeO 值也高(为 8.99%); 而微晶石英与赤铁矿的伴生为产铀硅质交代花岗岩所特有。随着岩石中硅质的增高、LILE 中 Rb、Th、HFSE 和 REE 含量均低于花岗岩, 与石英结构不利于这些元素的进入有关^[16], Σ REE 值与 U 含量具负相关性和低 Th 含量, 表明铀更多地与铁质的富集有关。它与钾交代花岗岩中 HFSE 和 REE 含量呈共轭消长特征, 表明它们的铀矿物可能为同一铀成矿流体的不同成矿期产物, TE1, 3 值与花岗岩和钾交代花岗岩类似, 也证实两者铀成矿流体性质的相似性。

5 结 论

(1) 产铀钾交代花岗岩表现出强钾长石化、强绿泥石化及弱赤铁矿化等特征, U 含量与次生黑云母关系密切。产铀硅化花岗岩的主要特征是微晶石英与赤铁矿伴生, 铀更多地与铁质富集有关。

(2) 钾交代花岗岩的 K/Ba 值低于花岗岩, Ba/Rb 和 Zr/Hf 值明显高于花岗岩, U 含量与 Σ REE 值具正相关性。硅质交代花岗岩的 Rb 和 Th 含量和 HFSE、 Σ REE 值均低于花岗岩; 铀矿化愈强, Σ REE 值愈低。两者均具 LLH 特征, 表现为随铀矿化强度的增强, K/Ba、Rb/Sr 值减少和 Ba/Rb 值增高的趋势, 并相对富集 HREE。

(3) 钾交代和硅质交代花岗岩的 HFSE 含量及 REE 配分模式与花岗岩类似, 表明成矿流体的组分主要来自花岗岩。两者的 HFSE 和 REE 含量呈共轭消长特征表明铀矿物可能为同一铀成矿流体的不同成矿期产物。

(4) 钾交代和硅质交代花岗岩成矿的时差大。两种交代作用叠加的花岗岩中 U 含量急剧增加, 伴随断裂的开启, 多期成矿流体的叠加更有利于铀的富集。LLH 特征、K/Ba、Rb/Sr 值减小和 Ba/Rb 值增高可作为产铀花岗岩的地球化学判据。

参考文献 (References):

- [1] Plant J A, Simpson P R, Smith B, Windley B F. Uranium ore deposits-Products of the radioactive Earth[A]. Burns P C, Finch R. Uranium: Mineralogy, geochemistry and the environment. Reviews in Mineralogy[C]. Mineral. Soci. Am., 1999, 38: 255—319.
- [2] Nex P A, Kinnaird J A, Oliver G J. Petrology, geochemistry and uranium mineralisation of post-collisional magmatism around Goanikontes, southern Central Zone, Damaran orogen, Namibia[J]. African Earth Sci., 2001, 33: 481—502.
- [3] Sen J, Ranganath N, Rathaiah Y V, Sen D B, Kak S N. Petrography and geochemistry of uranium mineralised precambrian granitic-pegmatitic rocks of mawlait, west khasi hills district, Meghalaya[J]. J. Geol. Soc. India, 2009, 74: 639—645.
- [4] 张展适, 华仁民, 刘晓东, 邓平, 吴烈勤. 贵东花岗岩杂岩体的稀土元素特征及与铀成矿关系[J]. 中国稀土学报, 2005, 23(6): 749—756.
Zhang Zhanshi, Hua Renmin, Liu Xiaodong, Deng Ping, Wu Lieqin. Geochemical characteristics of rare earth elements of Guidong granitic complex and their relationship with uranium mineralization[J]. J. Chinese Rare. Earth Soc., 2005, 23(6): 749—756. (in Chinese with English abstract)
- [5] 张国玉, 王正其, 梁良. 相山、下庄铀矿田稀土元素特征对比[J]. 矿物岩石, 2006, 26(1): 64—68.
Zhang Guoyu, Wang Zhengqi, Liang Liang. Correlation of REE features between Xiangshan and Xiaozhuang uranium ore fields[J]. J. Miner. Petr., 2006, 26(1): 64—68. (in Chinese with English abstract)
- [6] 陈灿. 热液铀成矿作用中稀土元素地球化学研究综述[J]. 华南铀矿地质, 1999, 16(1—2): 20—27.
Chen Can. Geochemistry of rare earth elements (REE) in hy-

- drothermal uranium mineralizing process[J]. *Uranium Geol. South China*, 1999, 16(1—2): 20—27. (in Chinese)
- [7] 张展适, 华仁民, 邓平, 朱捌, 吴烈勤, 张彦春, 谭正中, 尹征平. 诸广-下庄铀矿集区成矿过程中水岩作用的地质地球化学特征[J]. *地球化学*, 2005, 34(5): 483—494.
- Zhang Zhanshi, Hua Renmin, Deng Ping, Zhu Ba, Wu Lieqin, Zhang Yanchun, Tan Zhengzhong, Yin Zhengping. Geological and geochemical characteristics of water-rock interaction in the processes of uranium mineralization in Zhuguang-Xia Zhuang uranium ore-concentrated district[J]. *Geochimica*, 2005, 34(5): 483—494. (in Chinese with English abstract)
- [8] 陈毓川, 毛景文. 桂北地区矿床成矿系列和成矿历史演化轨迹[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- Chen Yuchuan, Mao Jinwen. Metallogenic series and history evolutionary trajectory of deposit in northern Guangxi[M]. Beijing: Geol. Pub. House, 1995. (in Chinese)
- [9] Henderson P. Rare earth element geochemistry[M]. Elsev. Sci. Pub. B V, 1984.
- [10] Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1999, 63(3/4): 489—508.
- [11] 梁国宝. 桂北地区摩天岭复式花岗岩体地球化学特征及其与成矿的关系[J]. *桂林工学院学报*, 2008, 28(1): 8—14.
- Liang Guobao. Geochemical characteristics of the Motianling composite granitoid and mineralization in North Guangxi[J]. *J. Guilin Univ. Technol.*, 2008, 28(1): 8—14. (in Chinese with English abstract)
- [12] Viswanathan S. Critical element ratio maps of granitic and migmatitic areas (CERMOGAMA): A supplement to radiometric and magnetic maps (ASTRAMA). Workshop on 'High Sensitivity Airborne Radiometric and Magnetic Surveys' AMD[Z]. Hyderabad, 1993: 1—7.
- [13] 张诚, 金景福. 红石泉铀矿床黑云母与晶质铀矿同步富集作用探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 1989, 8(3): 242—250.
- Zhang Cheng, Jin Jingfu. A tentative discussion on the synchronous enrichment of biotite and uranium in the Hongshiquan uranium deposit[J]. *Acta Petrol. Miner.*, 1989, 8(3): 242—250. (in Chinese with English abstract)
- [14] 刘正义, 刘红旭. 花岗岩铀成矿作用的模拟实验[J]. *地学前缘*, 2009, 16(1): 99—113.
- Liu Zhengyi, Liu Hongxu. The simulation test of granite uranium mineralization[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(1): 99—113. (in Chinese with English abstract)
- [15] 陈晋阳, 郑海飞, 曾贻善. 微量元素在幔源矿物与热液之间分配系数的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(2): 224—229.
- Chen Jinyang, Zheng Haifei, Zeng Yishan. Progress of trace elements' partitioning coefficient between mantle minerals and aqueous fluid[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 19(2): 224—229. (in Chinese with English abstract)
- [16] 赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- Zhao Zhenhua. Principles of trace element geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1997. (in Chinese)



(上接第 389 页)

- [35] 赵珂. 云南深大断裂 CO₂ 释放规律研究[D]. 重庆: 西南师范大学, 2005.
- Zhao Ke. The study of CO₂ degassed from deep faults Yunnan [D]. Chongqing: Southwestern China Normal University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [36] 赵珂, 姜光辉, 杨琰, 刘德深, 刘玉, 王丽丽. 滇东主要断裂带温泉 CO₂ 成因浅析[J]. *地球与环境*, 2005, 33(2): 11—15.
- Zhao Ke, Jiang Guanghui, Yang Yan, Liu Deishen, Liu Yu, Wang Lili. Brief analysis of the reasons of CO₂ degassing from hot springs on main faults within the east of Yunnan [J]. *Earth and Environment*, 2005, 33(2): 11—15. (in Chinese with English abstract)
- [37] 沈立成, 袁道先, 丁梯平, 李延河, 乐国良, 林玉石. 中国西南地区 CO₂ 释放点的 He 同位素分布不均一性及大地构造成因[J]. *地质学报*, 2007, 81(4): 465—478.
- Shen Licheng, Yuan Daoxian, Ding Tiping, Li Yanhe, Le Guoliang, Lin Yushi. Distributing inhomogeneity of helium isotope of CO₂ degasification point and its geotectogenesis in southwest China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(4): 465—478. (in Chinese with English abstract)
- [38] 侯增谦, 李振清. 印度大陆俯冲前缘的可能位置: 来自藏南和藏东活动热泉气体 He 同位素约束[J]. *地质学报*, 2004, 78(4): 482—493.
- Hou Zengqian, Li Zhenqing. Possible location for underthrusting front of the Indus continent: Constraints from helium isotope of the geothermal gas in southern Tibet and eastern Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(4): 482—493. (in Chinese with English abstract)
- [39] 李振清, 侯增谦, 聂凤军, 孟祥金. 藏南上地壳低速高导层的性质与分布: 来自热水流体活动的证据[J]. *地质学报*, 2005, 79(1): 68—77.
- Li Zhenqing, Hou Zengqian, Nie Fengjun, Meng Xiangjin. Characteristic and distribution of the partial melting layers in the upper crust: Evidence from active hydrothermal fluid in the south Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(1): 68—77. (in Chinese with English abstract)
- [40] Du J G, Cheng W Z, Zhang Y L, Jie C L, Guan Z J, Liu W, Bai L P. Helium and carbon isotopic compositions of thermal springs in the earthquake zone of Sichuan, southwestern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 26(5): 533—539.