

贵东岩体黑云母成分特征及其对铀成矿的制约

陈佑伟^{1,2}, 毕献武¹, 胡瑞忠¹, 朱维光¹, 胥磊落^{1,2}, 董少花^{1,2}

1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049

摘要: 鲁溪岩体和下庄岩体为粤北贵东复式岩体的重要组成部分, 两岩体构造背景相同, 空间上紧密共生, 时间上近乎同时生成, 但鲁溪岩体不成矿, 而下庄岩体赋存着大量铀矿床。这种差异的原因探究对深刻揭示花岗岩型铀矿床成矿机制具有重要的意义。对鲁溪岩体和下庄岩体中黑云母的电子探针、穆斯鲍尔谱和 ICP-MS 分析表明, 两岩体黑云母的主量元素具有富铁贫挥发分的特点; 微量元素特征类似, 具明显的负铕异常; 相对于鲁溪岩体, 下庄岩体的演化程度和挥发性组分 F 含量较高, 而温度和氧逸度较低。从鲁溪岩体到下庄岩体, 由于演化程度升高, F 含量增高, 温度和氧逸度降低, 使铀在花岗岩中的丰度升高, 赋存方式由不利于成矿的类质同像替换演变为有利于成矿的晶质铀矿形式存在, 这是鲁溪岩体不成矿而下庄岩体有大量铀矿床的主要原因。

关键词: 黑云母; 矿物化学; 铀丰度; 铀赋存形式

中图分类号: P618.14 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2010)04-0355-09

The Geochemical Characteristics of Biotites and their Constraints on Uranium Mineralization in Guidong Pluton

CHEN You-wei^{1,2}, BI Xian-wu¹, HU Rui-zhong¹,
ZHU Wei-guang¹, XU Lei-luo^{1,2}, DONG Shao-hua^{1,2}

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The Luxi granite and the Xiazhuang granite are important parts of the Gui-dong composite pluton in the northern Guangdong province. They have the same tectonic setting, similar spatial association and similar age. However, many uranium deposites are formed in Xiazhuang granite while none is found in the Luxi granite. A detail study on this difference is significant for understanding the metallogenic mechanism of granite-type uranium deposit. Biotite contains a lot of geochemical information about the magmatic crystallization. The results of the electron microprobe, Mössbauer spectroscopy and ICP-MS analyses of biotites collected from Luxi and Xiazhuang granites indicated that these biotites have similar major element contents, rich in Fe but poor in volatile constituents, and have similar trace element contents, strong negative Eu anomalies. The biotites of Xiazhuang granite are distinguished from those of the Luxi granite by higher evolution degree, more F content, lower temperature and lower oxygen fugacity. The evolution degree and F content increase and the temperature and oxygen fugacity decrease from Luxi granite to Xiazhuang granite may cause that the uranium content increases and that the existing state of uranium changes from isomorphism to uraninite, a mineralization unfavorable condition to a mineralization favorable condition. It is the main reason for that there are many uranium deposites in Xiazhuang granite while none is in the Luxi granite.

Key words: biotite; mineral chemistry; uranium content; existing state of uranium

收稿日期: 2010-03-29 收到, 2010-05-04 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40673042, 40634020)

第一作者简介: 陈佑伟(1983—), 男, 博士生, 地球化学专业. E-mail: chenyouwei1983@163.com.

黑云母是花岗岩中广泛分布的主要暗色造岩矿物,它保存了岩石结晶阶段大量的地球化学信息,研究花岗岩中黑云母的化学成分特征对研究岩浆起源、岩石成因及构造环境、成岩物理化学条件、后期热液作用及成矿元素的富集都有重要的意义^[1~4]。

南岭粤北地区是中国花岗岩型铀矿重要产区,这里分布着最大的花岗岩型铀矿田—下庄铀矿田。自20世纪50年代发现该矿田以来,许多学者对其作了大量的研究^[5~14],取得了许多重要的认识。其中有关花岗岩与铀成矿关系的研究表明,铀成矿与花岗岩浆分异流体无关,花岗岩为下庄铀矿田铀成矿提供铀源^[5, 7, 9, 14]。下庄铀矿田由希望、335和377等多个铀矿床组成,它们均位于贵东复式花岗岩体的东部。贵东复式花岗岩体东部由鲁溪岩体、下庄岩体、帽峰岩体和笋洞岩体组成。研究表明^[15],鲁溪岩体(239±5 Ma)和下庄岩体(235.8±7.6 Ma)均为印支期花岗岩,其中下庄岩体为下庄铀矿田主要赋铀花岗岩体,而与其共生的鲁溪岩体为非产铀岩体。两个岩体的构造背景和时代相同,空间上密切共生,而矿化特征却有明显的差异,其原

因何在?这一问题的回答对深刻揭示花岗岩型铀矿床成矿机制有着重要意义。

本文从鲁溪岩体和下庄岩体的黑云母矿物化学特征入手,结合前人的研究成果,探讨两岩体成岩物理化学条件差异及其对铀成矿的制约机制。

1 地质背景和岩石学特征

贵东岩体位于广东省北部,是南岭地区三条东西向岩浆岩带之一的大东山—贵东—五里亭岩浆岩带的重要组成部分;大地构造上位于华夏古陆闽、赣、粤后加里东隆起与湘、桂、粤北海西—印支凹陷的交汇部位(图1)。岩体侵入寒武系—奥陶系浅变质砂岩、板岩和含炭板岩,以及泥盆系—石炭系砂岩和碳酸盐岩中。该岩体为鲁溪、下庄、帽峰、笋洞、隘子和司前等岩体组成的复式岩体,出露面积约1000 km²,大致呈东西向展布,东部为下庄岩体、笋洞岩体、帽峰岩体和鲁溪岩体,西部为隘子岩体和司前岩体(图1)。其中下庄岩体、帽峰岩体和笋洞岩体与铀矿床关系较为密切。前人认为贵东岩体是由主体和补体组成的燕山期花岗岩^[9, 10],但近年来的研究表明它是由印支—燕山期多次岩浆侵入而成的复式岩体^[15],其中鲁溪、下庄和帽峰三岩体的成岩年龄分别为(239±5)Ma(单颗粒锆石 LA-ICP-MS)、(235.8±7.6)Ma(单颗粒锆石 LA-ICP-MS)和(219.6±0.9)Ma(单颗粒锆石 U-Pb 同位素稀释法),属于印支期;笋洞岩体的成岩年龄为(189.1±0.7)Ma(单颗粒锆石 U-Pb 同位素稀释法),属燕山早期;司前岩体和隘子岩体的单颗粒锆石 LA-ICP-MS 成岩年龄分别为(160.1±6.1)Ma和(151±11)Ma,为燕山中期。

鲁溪岩体和下庄岩体均属印支期岩体,前者成岩时间稍早,空间上密切共生,均产于印支碰撞后的后碰撞拉张环境^[15, 16],岩体内均分布有幔源基性脉岩^[5, 16]。

野外和室内研究表明,鲁溪岩体为粗粒巨斑状黑云母花岗岩,斑状结构,主要矿物为长石、石英和黑云母。副矿物有角闪石、磁铁矿、原生褐帘石和电气石等。钾长石均为透长石,斜长石为中长石,An=34~39,钾长石多为微斜长石,格子双晶发育,大颗粒柱状自形晶,含量约25%。

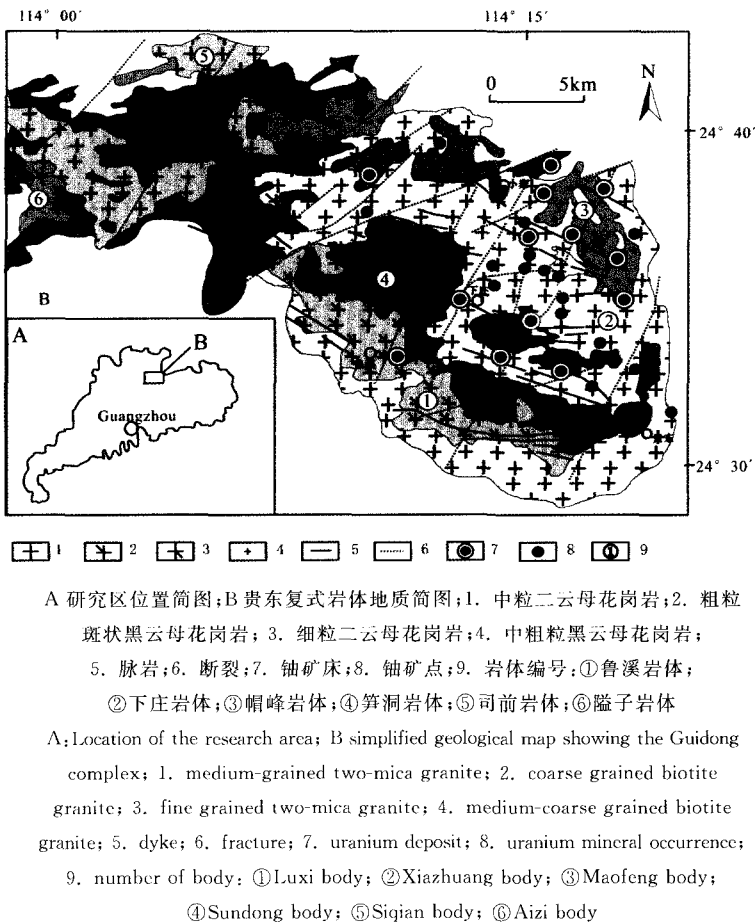


图1 贵东复式岩体地质简图

Fig. 1 Geological map showing the Guidong complex

斜长石聚片双晶发育,见环带构造,含量约 25%;石英为大颗粒自形晶,多具波状消光,含量为 30%;黑云母多浅黄绿色—褐色,片状,大颗粒自形晶,晶面扭曲,常交代钾长石,含量约 15%。下庄岩体为中粒—中粗粒二云母花岗岩,灰白色和淡灰红色,似斑状结构。主要矿物为长石、石英、黑云母和白云母。副矿物有锆石、石榴子石、榍石、独居石、磁铁矿和钛铁矿等。钾长石均为透长石,斜长石为钠长石, $An=1\sim 4$,钾长石为条纹长石和微斜长石,板状他形,含量约为 35%;斜长石为板状他形,含量约 15%,石英多为他形小颗粒,含量约 30%;白云母多为原生,片状,含量约 5%,黑云母大多呈褐色—深褐色,片状和鳞片状,多色性强,解理完全,内部和边缘常伴生有小颗粒石英,含量约 8%。

2 样品及分析方法

本次研究的黑云母样品选自鲁溪岩体和下庄岩体新鲜花岗岩。黑云母的主量元素分析用日本岛津公司生产的 EPMA-1600 型电子探针测定(工作电压 25 kV,束流 10.0 nA,束斑为 10.0 μm ,检出限 0.002%);微量元素用 ICP-MS 测定(精度高于 5%)。两项分析工作均在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。黑云母的穆斯鲍尔谱分析在日本东京大学广域科学系实验室由郑国东完成:样品封装在无铁的铝铜合金专用圆柱柱内(内径 16 mm,厚 1 mm),在 Austin Science S-600 型测定仪上测试(恒温 293K,伽马线源为 1.11GBq⁵⁷Co/Rh)。波谱辨别和铁的化学种类定量在计算机上进行^[18,19]。

3 黑云母的穆斯鲍尔谱特征

由于矿物中的 Fe^{3+} 对四面体中的 Si^{4+} 过于敏感,应用电子探针分析结果估算 $\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+})$ 值强烈受 Si^{4+} 、 Al^{3+} 等四面体配位阳离子的制约^[20], SiO_2 的分析精度直接影响到 Fe^{3+} 的计算值。用穆斯鲍尔谱可较准确地测定黑云母中的 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 。两岩体花岗岩黑云母的穆斯鲍尔谱图(图 2)基本相似。研究表明,黑云母的穆斯鲍尔谱由强、弱两对不对称的双峰组成^[21]。前人对双峰进行了分类^[22],即 Fe^{2+} 的外、内双峰分别对应 M2、M1 位置,且 Fe^{2+} M2 位的四极分裂值(QS)大于 M1; Fe^{3+} 的外、内双峰分别对应 M1、M2 位置, Fe^{3+} M1 位的四极分裂值大于 Fe^{3+} 的 M2 位。因此,两岩体的黑云母的四极分裂值及其 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 的 M1、M2 的占位如表 1。从表中可以看出鲁溪黑云

母的 $\text{Fe}^{2+}(\text{M2})/\text{Fe}^{2+}(\text{M1})$ 为 2.73 和 1.76,下庄黑云母的 $\text{Fe}^{2+}(\text{M2})/\text{Fe}^{2+}(\text{M1})$ 为 5.68 和 2.98,说明 Fe^{2+} 在 M2 位置上有序,反映从早期鲁溪花岗岩体(239 \pm 5 Ma)到稍晚期的下庄花岗岩体(235.8 \pm 7.6 Ma),黑云母的有序度降低。所有样品 Fe^{2+} 的最大 $\text{QS}<3.00$ mm/s,说明两岩体的黑云母以三八面体为主,偶见二八面体型^[21]。

表 1 黑云母的穆斯鲍尔谱分析结果

Table 1 Mössbauer parameters of biotite

样品号	铁种类	相对含量 (%)	IS/mm $\cdot \text{s}^{-1}$	QS/mm $\cdot \text{s}^{-1}$	LW/mm $\cdot \text{s}^{-1}$	$\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+})$
LX-2	(M1) Fe^{3+}	13.28	0.263	1.00	0.320	0.389
	(M2) Fe^{3+}	25.57	-0.055	0.36	0.320	
	(M1) Fe^{2+}	22.14	1.128	2.37	0.320	
	(M2) Fe^{2+}	39.00	1.220	2.76	0.320	
LX-3	(M1) Fe^{3+}	9.10	0.279	1.00	0.320	0.31
	(M2) Fe^{3+}	21.94	0.003	0.41	0.320	
	(M1) Fe^{2+}	18.48	0.98	2.34	0.320	
	(M2) Fe^{2+}	50.47	1.174	2.50	0.320	
XZ-2	(M1) Fe^{3+}	16.32	0.301	0.76	0.305	0.373
	(M2) Fe^{3+}	20.98	-0.071	0.30	0.305	
	(M1) Fe^{2+}	9.38	1.020	2.20	0.305	
	(M2) Fe^{2+}	53.32	1.129	2.63	0.305	
XZ-4	(M1) Fe^{3+}	11.21	0.347	0.89	0.319	0.379
	(M2) Fe^{3+}	26.68	-0.063	0.34	0.319	
	(M1) Fe^{2+}	15.60	1.050	2.29	0.319	
	(M2) Fe^{2+}	46.52	1.132	2.64	0.319	

注:LX 为鲁溪岩体,XZ 为下庄岩体,下同

4 主量元素特征

下庄和鲁溪岩体黑云母的主量元素含量由表 2 可见,两岩体黑云母的主量元素有如下特征:

(1)下庄岩体黑云母的 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$ 为 0.51~0.58,鲁溪岩体黑云母的 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$ 为 0.4~0.45,二者黑云母的 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$ 都比较均一,表明黑云母均未受到后期流体的改造^[23]。因此其成分特征能代表岩浆结晶时黑云母的成分特征。

两岩体黑云母均具有富铁的特征,鲁溪岩体黑云母全铁含量(TFeO)为 20.01~21.86, $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$ 为 0.40~0.45,下庄岩体黑云母的 TFeO 为 20.54~24.35, $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$ 为 0.51~0.58,下庄岩体黑云母的铁含量相对较高。鲁溪岩体黑云母的 MgO 为 9.49%~10.34%,含镁系数($\text{Mg}^\#$)为 0.45%~0.47%;而下庄岩体黑云母的 MgO 为 6.07%~6.87%,含镁系数($\text{Mg}^\#$)为 0.31%~0.37%,在 $\text{Mg}-(\text{Al}^{\text{VI}} + \text{Fe}^{3+} + \text{Ti})-(\text{Fe}^{2+}$

表 2 鲁溪和下庄花岗岩黑云母电子探针成分
Table 2 Electron microprobe analyses of biotites from the Luxi and Xianzhuang granite

编号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO ^y	MnO	MgO	CaO	N ₂ O	K ₂ O	F	Cl	Total	FeO _a	Fe ₂ O _{3a}	Fe ²⁺ /(Fe ²⁺ +Mg)	Fe ³⁺ /(Fe ²⁺ +Fe ³⁺)	Mg [#]	%
lx-2-2-a	37.49	1.49	15.92	0.23	20.59	0.57	10.01	0.00	0.08	9.23	0.00	0.02	95.61	12.08	8.51	0.40	0.389	0.60	
lx-2-2-b	36.08	1.36	15.48	0.50	20.97	0.70	10.17	0.00	0.16	8.85	0.00	0.02	94.27	12.31	8.66	0.40	0.389	0.60	
lx-2-2-c	36.86	1.60	15.88	0.20	21.20	0.70	10.42	0.00	0.11	9.12	0.00	0.02	96.11	12.44	8.76	0.40	0.389	0.60	
lx-2-3-a	37.95	2.37	15.14	0.30	21.36	0.72	9.90	0.00	0.08	9.31	0.00	0.02	97.14	12.53	8.82	0.42	0.389	0.58	
lx-2-3-b	38.36	2.32	15.09	0.11	21.58	0.62	9.90	0.00	0.05	9.17	0.00	0.03	97.23	12.66	8.91	0.42	0.389	0.58	
lx-2-3-c	37.72	2.07	15.35	0.20	21.35	0.62	9.68	0.00	0.06	9.28	0.00	0.06	96.39	12.53	8.82	0.42	0.389	0.58	
lx-2-4-a	38.04	1.58	15.46	0.14	20.89	0.63	10.25	0.00	0.06	9.26	0.00	0.02	96.33	12.26	8.63	0.40	0.389	0.60	
lx-2-4-b	38.20	2.18	14.40	0.07	21.86	0.66	10.09	0.00	0.10	9.20	0.00	0.02	96.78	12.83	9.03	0.42	0.389	0.58	
lx-2-4-c	38.57	2.18	15.31	0.20	21.39	0.67	9.85	0.00	0.05	9.35	0.00	0.03	97.59	12.55	8.83	0.42	0.389	0.58	
lx-2-8-a	36.88	2.08	14.68	0.14	21.56	0.64	9.99	0.00	0.03	9.28	0.00	0.02	95.29	12.65	8.91	0.42	0.389	0.58	
lx-2-8-b	38.53	1.99	15.86	0.06	21.62	0.64	10.34	0.00	0.04	9.66	0.00	0.00	98.74	12.69	8.93	0.41	0.389	0.59	
lx-2-8-c	37.52	2.00	15.21	0.15	21.69	0.65	9.97	0.00	0.13	9.11	0.00	0.02	96.46	12.73	8.96	0.42	0.389	0.58	
lx-3-6-a	38.18	1.64	16.48	0.12	20.85	0.54	9.92	0.00	0.05	9.51	0.00	0.00	97.26	14.09	6.75	0.44	0.31	0.56	
lx-3-6-b	37.41	1.45	16.67	0.31	21.24	0.48	10.18	0.00	0.07	9.03	0.00	0.01	96.84	14.36	6.88	0.44	0.31	0.56	
lx-3-6-c	37.73	1.49	16.72	0.13	20.53	0.58	9.49	0.00	0.07	9.40	0.00	0.01	96.14	13.88	6.65	0.45	0.31	0.55	
lx-3-6-a	36.67	1.52	16.59	0.12	20.10	0.53	9.57	0.00	0.07	9.22	0.00	0.00	94.38	13.59	6.51	0.44	0.31	0.56	
lx-3-6-b	36.24	1.63	16.71	0.05	20.54	0.58	9.92	0.00	0.07	9.56	0.00	0.01	95.30	13.88	6.65	0.44	0.31	0.56	
lx-3-6-c	36.40	1.54	17.11	0.19	21.01	0.55	9.75	0.00	0.08	9.43	0.00	0.00	96.05	14.20	6.81	0.45	0.31	0.55	
xz-2-3-a	37.48	1.87	17.41	0.17	24.35	1.23	6.07	0.00	0.09	9.28	0.30	0.00	98.24	14.82	9.52	0.48	0.373	0.42	
xz-2-3-b	35.79	1.94	16.62	0.28	24.00	1.23	6.21	0.00	0.10	8.50	0.00	0.01	94.69	14.61	9.39	0.57	0.373	0.43	
xz-4-2-b	36.99	2.50	17.09	0.15	21.06	0.86	6.21	0.00	0.05	9.41	0.00	0.00	94.33	12.70	8.37	0.53	0.379	0.47	
xz-4-2-c	38.20	2.43	17.37	0.15	21.34	0.82	6.31	0.00	0.03	9.31	0.26	0.00	96.24	12.87	8.48	0.53	0.379	0.47	
xz-4-2-d	37.37	2.04	16.88	0.16	20.54	0.77	6.39	0.00	0.05	9.27	0.14	0.01	93.61	12.38	8.16	0.52	0.379	0.48	
xz-4-2-e	37.91	2.25	17.40	0.12	20.99	0.84	6.27	0.00	0.04	9.41	0.45	0.00	95.69	12.66	8.34	0.53	0.379	0.47	
xz-4-4-a	37.50	2.10	16.81	0.23	21.65	0.80	6.68	0.00	0.01	8.97	0.07	0.01	94.82	13.05	8.60	0.52	0.379	0.48	
xz-4-4-b	37.88	2.06	17.25	0.10	21.62	0.80	6.87	0.00	0.03	9.23	0.19	0.00	96.02	13.03	8.59	0.52	0.379	0.48	
xz-4-4-c	37.70	2.09	17.07	0.20	21.06	0.77	6.84	0.00	0.01	9.10	0.41	0.00	95.26	12.70	8.37	0.51	0.379	0.49	
xz-4-4-d	36.58	2.62	16.80	0.28	21.11	0.78	6.45	0.00	0.06	8.75	0.37	0.00	93.79	12.73	8.38	0.53	0.379	0.47	

Mg[#] = Mg/(Fe+Mg); Fe³⁺/(Fe³⁺+Fe²⁺)为穆斯鲍尔谱分析数据; FeO(wt%) = wt%FeO^T/[1.08×(Fe³⁺/Fe²⁺)+1]+Fe₂O₃(wt%) = wt%TFeO-wt%FeO

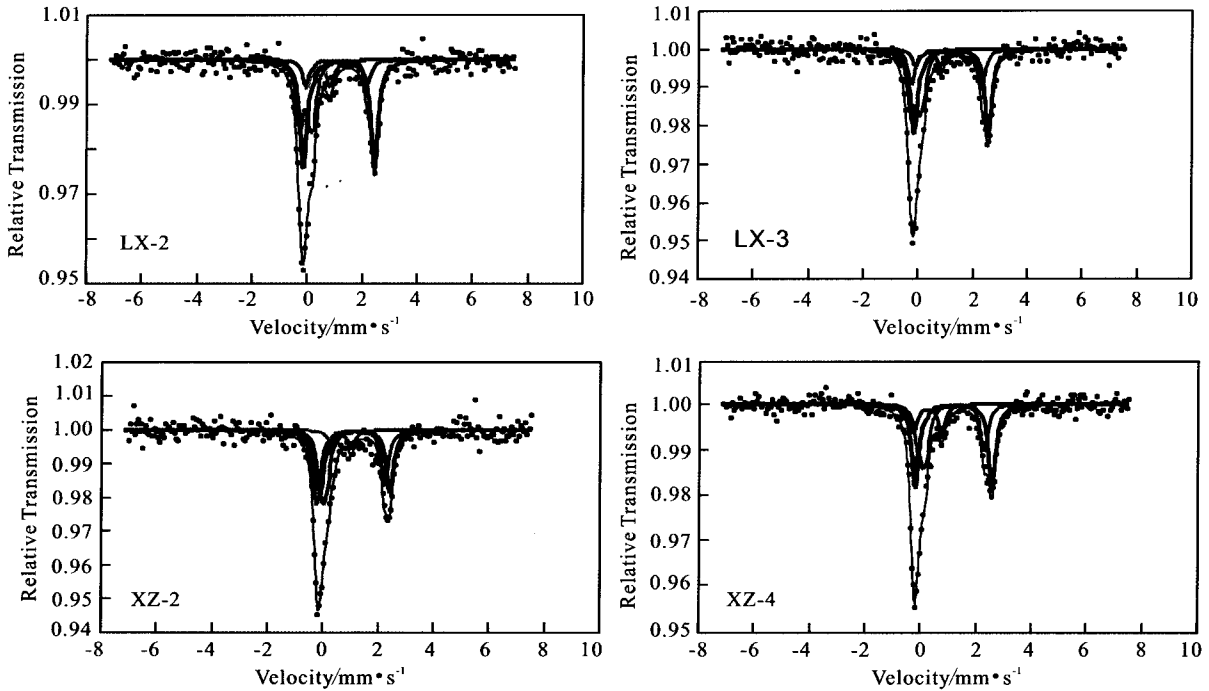


图 2 黑云母的穆斯鲍尔谱图

Fig. 2 Mössbauer spectroscopy graphs of biotite

+Mn) 三角图解(图 3)上,两岩体黑云母均位于铁质黑云母区,但鲁溪岩体黑云母更靠近镁质黑云母区,而下庄岩体黑云母更靠近铁叶云母区,相对于鲁溪岩体黑云母具富钛、富铝、富锰的特点。

(2)两岩体黑云母挥发分(F、Cl)含量较低。鲁溪岩体黑云母的基本不含挥发性组分 F,其含量接近于 0,Cl 含量也较低(0~0.06);下庄岩体黑云母的 F 含量也不高(0~0.45),Cl 含量更低(0~0.01)。黑云母的 F、Cl 低含量说明氟氯流体作用对高温黑云母的形成作用不明显,也暗示岩体形成时流体中的 F 和 Cl 含量也很低。

5 稀土元素和微量元素

表 3 列出了鲁溪和下庄花岗岩中黑云母的五个样品的微量元素数据。

为了便于对比,我们将文献[25]中对应的两个花岗岩的全岩微量元素数据与本次研究得到的黑云母数据结合起来,讨论其稀土元素和微量元素特征。从稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(图 4)上可见,两岩体黑云母稀土元素特征与其对应花岗岩的稀土元素特征相似,均强烈富集轻稀土,表现为右倾轻稀土富集型,具明显的负铕异常。

两岩体黑云母的微量元素蛛网图与对应花岗岩的微量元素蛛网图也十分相似(图 5), 相对于原始

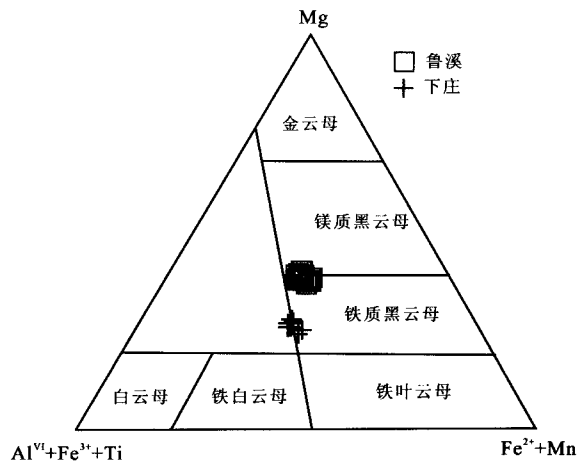


图 3 黑云母的 Mg-(Al^{VI}+Fe³⁺+Ti)-(Fe²⁺+Mn)图解^[24]
Fig. 3 Mg-(Al^{VI}+Fe³⁺+Ti)-(Fe²⁺+Mn) diagram of biotite^[24]

地幔两岩体均富集 Rb、Li 等,贫 Ba、U、Sr、Cr、Ni 等;下庄岩体黑云母在蛛网图上表现为比鲁溪岩体富的更富,贫的更贫,表明两岩体具有一定的演化顺承关系。相对于与之对应的花岗岩,两岩体黑云母均富集 Rb、Ba、Nb 和过渡族元素(Sc、V、Co、Ni、Cr),而更贫 Th、U、Pb、Sr、Hf、Zr、Y,这些微量元素的富集和亏损特征与前人研究的不同类型花岗岩中黑云母的研究结果相似^[28,29],说明黑云母是花岗质熔体中 Rb、Ba、Nb 和过渡族元素(Sc、V、Co、Ni、Cr)的主要载体。而黑云母相对于岩体花岗岩贫 U,说明黑云母不是 U 的主要载体。

表 3 鲁溪和下庄花岗岩黑云母微量元素 ICP-MS 分析结果

Table 3 ICP-MS analyses of trace element concentration of biotite from Luxi and Xiazhuang granite $\times 10^{-6}$

编号	LX-1	LX-2	LX-3	XZ-2	XZ-4	编号	LX-1	LX-2	LX-3	XZ-2	XZ-4
Li	1090	942	874	2270	4440	Ba	548	640	532	328	461
Be	1.940	2.125	3.207	5.926	5.834	La	18.3	11.4	58.4	17.5	12.1
Sc	66	72.8	48.1	75.2	63.2	Ce	36.3	21.2	95.9	36.4	24.2
V	286	391	312	260	273	Pr	4.16	2.3	11.4	4.27	2.8
Cr	90.7	60.4	68.1	77.7	88.7	Nd	14.5	7.57	36.6	14.9	9.59
Co	70.6	75.1	88.6	63.2	59.6	Sm	2.81	1.13	5.18	3.49	1.89
Ni	50.8	58.7	64.2	47	50.1	Eu	0.266	0.098	0.439	0.215	0.151
Cu	16	55	16.1	20.1	19	Gd	2.285	0.892	3.548	2.937	1.378
Zn	477	366	409	721	506	Tb	0.36	0.117	0.45	0.595	0.217
Ga	73.2	58.2	51.2	102	82.8	Dy	2.02	0.58	1.98	3.66	1.15
Ge	3.45	3.4	2.41	7.32	6.67	Ho	0.411	0.122	0.415	0.744	0.218
As	2.625	1.728	5.883	1.448	0.154	Er	1.12	0.361	1.08	2.08	0.559
Rb	1150	968	466	1670	1960	Tm	0.159	0.0395	0.129	0.316	0.0735
Sr	24.6	8.94	71.3	81.3	84	Yb	1.01	0.257	0.839	2.03	0.457
Y	21.1	6.06	19.7	36.4	10.7	Lu	0.131	0.034	0.112	0.268	0.068
Zr	94.6	10.8	44.7	63.5	36.5	Hf	1.3	0.147	0.671	1.01	0.573
Nb	108	34.8	40	116	108	Ta	5.258	0.623	0.732	6.518	6.667
Mo	1.222	2.183	15.330	8.646	8.401	W	4.17	0.834	2.54	2.97	5.46
Ag	1.85	0.651	0.705	2.2	1.98	Tl	2.652	2.187	1.224	4.399	4.391
Cd	0.88	0.204	0.242	2.73	2.39	Pb	5.451	6.592	11.465	25.353	16.339
In	0.227	0.107	0.0728	0.537	0.425	Bi	0.163	0.11	0.186	1.44	1.18
Sn	33.806	9.342	8.890	101.161	92.516	Th	8.21	3.15	10.8	11.5	6.22
Sb	0.179	0.102	0.608	3.493	1.401	U	0.925	0.578	0.85	1.4	0.557
Cs	69.4	65.7	28.5	218	559	Σ REE	83.831	46.101	216.471	89.405	54.851

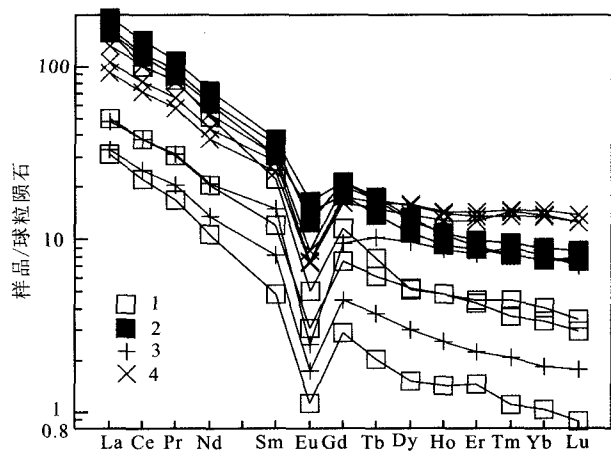
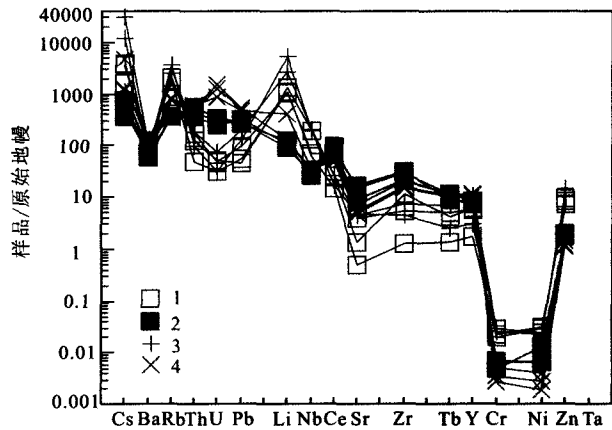


图 4 黑云母及其全岩的稀土元素球粒陨石标准化分布型式图
Fig. 4 Chondrite normalized diagram for biotite and whole rock



图例同图 4; 原始地幔值据文献 [27]
Symbols as for Fig. 4; primitive mantle after ref. [27]
图 5 黑云母及其全岩的原始地幔蛛网图
Fig. 5 Spider diagram for biotite and whole rock

6 讨 论

(1) 黑云母成分对成岩的指示意义: 从来岩浆演化特征看, 花岗岩中黑云母的成分可作为岩浆分异演化程度的指示剂。研究表明, 花岗质岩浆中的 Rb、Ba 主要以类质同象形式赋存在黑云母和钾长

石中^[28], Rb 主要与 K 发生类质同象置换, 其含量随着花岗质岩浆的分异演化程度的增高而变大, 而 Ba 既可与 K 置换, 又可与 Ca 置换, 在岩浆演化早期, 黑云母是 Ba 的主要载体, 而到了岩浆演化晚期, Ba 则主要赋存在钾长石中, 随着岩浆演化程度的增高, 黑云母中 Ba 含量不断减少, 而 Rb/Ba 不断增大。将黑云母的成分投影在 Rb-Ba 图解(图 6)上, 可以看出两岩体花岗岩均位于中等程度分异演化区, 且下庄花岗岩分异演化程度相对较高。结合黑云母微

量元素特征和前人年代学研究结果,可以认为下庄花岗岩与鲁溪花岗岩存在演化关系,这与本人前期工作所得的“鲁溪岩体和下庄岩体是同一岩浆源先后结果晶分异而来”认识是一致的^[25]。

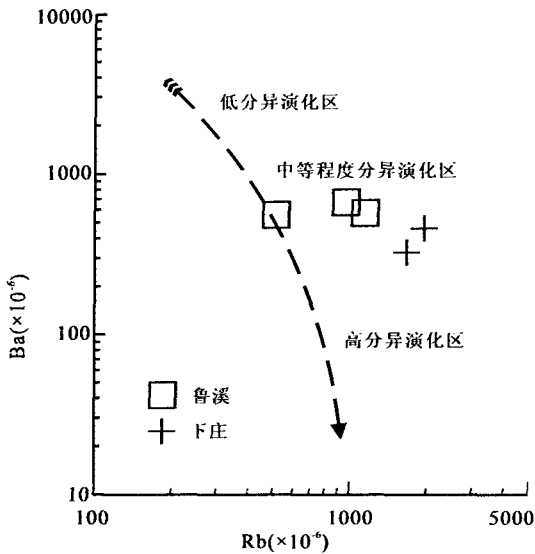


图6 黑云母的 Rb-Ba 图解

Fig. 6 Rb-Ba diagram of biotite

从成岩物理化学条件看,氧逸度是研究岩浆演化过程中物理化学条件的一个重要参数。通过与磁铁矿和钾长石共生的黑云母 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 原子百分含量的研究^[1],估算了岩浆的氧逸度。从岩体黑云母的 Fe^{3+} - Fe^{2+} - Mg 图解(图7)可以看出,两岩体花岗岩中的样品点均落在 Fe_2O_3 - Fe_3O_4 (HM) 缓冲线附近。据 $\log f_{O_2}$ - T 温度图解^[1],也可以估算岩浆的氧逸度。我们用黑云母穆斯堡尔谱结果结合黑云母的电子探针结果计算 $Fe/(Fe+Mg)$,用岩体的锆石饱和温度计求得成岩温度 T 来估算氧逸度(图8),结果显示鲁溪岩体的全岩锆石饱和温度为 $803 \pm 15^\circ C$, $\log f_{O_2}$ 为 $-12 \sim -11.5$;下庄岩体的全岩锆石饱和温度为 $760 \pm 20^\circ C$, $\log f_{O_2}$ - t 为 $-14.5 \sim$

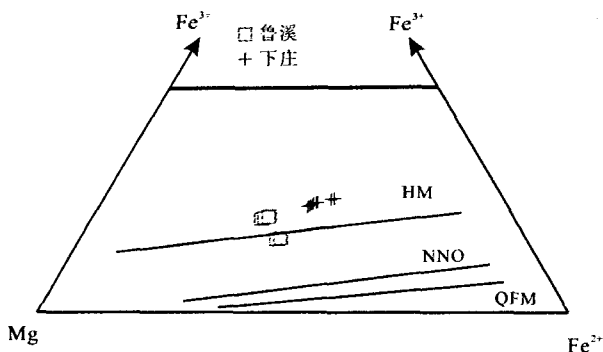
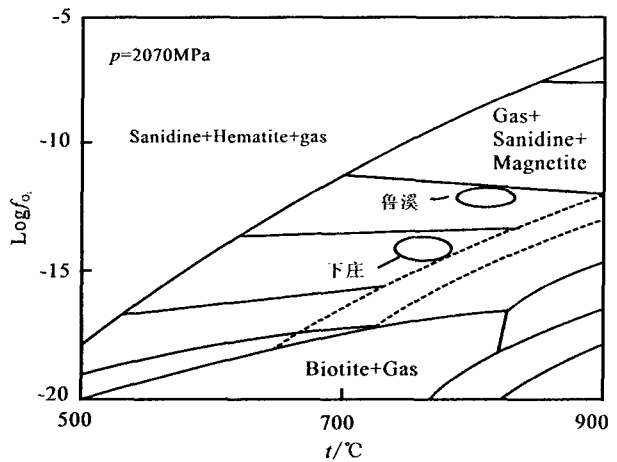


图7 黑云母的 Fe^{3+} - Fe^{2+} - Mg 图解

Fig. 7 Fe^{3+} - Fe^{2+} - Mg diagram of biotite



温度数据来源于文献[25];底图据文献[1]

Temperature after ref. [25]; base chart after ref. [1]

图8 黑云母的 $\log f_{O_2}$ - t 图解

Fig. 8 $\log f_{O_2}$ - t diagram of biotite

-15.5 ;表明鲁溪岩体的结晶温度和氧逸度均高于下庄岩体。由此可见,从鲁溪岩体到下庄岩体,岩浆的结晶温度和氧逸度逐步降低。

(2)黑云母成分对成矿的启示:高温岩浆中铀主要以 F 的络合物形式存在。F 不但对亲石元素有极大的亲和力,并在深部高温高压条件下能取代硅酸盐熔体中硅氧四面体中的桥氧,从而产生游离氧 (O^{2-}),使残余熔体富含氧,有利于铀在岩浆中活化聚集。研究表明,富 F 熔体中铀的流体/熔体分配系数仅为 $(3 \sim 4) \times 10^{-2}$ ^[30,31],因此 U 强烈地倾向于富集在富 F 的熔体中。

花岗岩岩浆中挥发分 F 除进入磷灰石等矿物中外,主要富集在黑云母中,因此黑云母的 F 含量相对大小能反映花岗岩 F 含量的相对大小^[32]。下庄岩体黑云母 F 含量为 $0 \sim 0.45$,而鲁溪岩体黑云母的 F 含量为 0。因此,前者相对于后者更富挥发分 F。同时,岩浆中 F 的流体/熔体分配系数为 $0.2 \sim 1.0$ ^[33,34],因此同一演化序列中,相对分异演化程度高的下庄岩体比鲁溪岩体的 F 含量高。

研究表明,随着花岗质岩浆演化程度增高、温度和氧逸度降低以及 F 的富集,铀丰度有增长的趋势。

铀在岩浆中以具有较强的亲氧性的四价铀形式存在,并与亲石元素结合,形成氧化物、硅酸盐和磷酸盐等。随着岩浆的分异演化,熔体中的铀不断富集, U^{4+} 首先与半径和电负性与之相近的离子(如 Th^{4+} 、 Ce^{4+} 、 Y^{4+} 等)进行类质同象置换,与游离氧 O^{2-} 结合形成一系列含铀的富 REE 副矿物(独居石、钍石、锆石和褐帘石等),副矿物的增多导致铀分散,不利于铀集中进入热液成矿。随着岩浆的进一

步演化,温度和氧逸度的降低,岩浆的还原性增强,类质同象的程度降低。不断富集的F取代硅酸盐熔体中的硅氧四面体中的桥氧,产生大量游离氧,不断富集的铀满足富含REE的副矿物的需求之后,剩余的铀与游离氧 O^{-2} 结合,以活性铀形式存在的晶质铀矿析出,利于后期热液成矿^[35~37]。因此鲁溪岩体铀丰度较低,且铀以类质同象形式存在于副矿物中,不利于成矿,而具高铀丰度的下庄岩体的铀大部分以铀晶铀矿形式存在,有利于后期热液成矿。

7 结 论

(1)鲁溪和下庄两岩体的黑云母均具富铁贫挥发分的特征,且前者相对于后者富镁、贫铁和氟;两岩体存在演化关系。

(2)从鲁溪岩体到下庄岩体,由于演化程度升高,F含量增高,温度和氧逸度降低,使岩浆的还原性增强,类质同象的程度降低,游离氧增多,使花岗岩中铀的丰度升高,形成晶质铀矿的可能性大为增大,这就是鲁溪岩体不成矿而下庄成为铀矿床的主要原因。

参考文献 (References):

- [1] Wones D, Eugster H. Stability of biotite: experiment, theory and application [J]. *Am. Mineral*, 1965, 50(9): 1228—1273.
- [2] Lalonde A, Bernard P. Composition and color of biotite from granites; two useful properties in characterization of plutonic suites from the Hepburn internal zone of Wopmay Orogen, Northwest Territories [J]. *Canadian Mineralogist*, 1993, 31(1): 203—217.
- [3] Abdel-Rahman A. Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline and peraluminous magmas [J]. *Petrol*, 1994, 35(2): 525—541.
- [4] Finch A, Parsons I, Mingard S. Biotites as indicators of fluorine fugacities in fluids associated with alkaline magmatism, South Greenland [J]. *Petrol*, 1995, 36: 1701—1728.
- [5] 胡瑞忠. XW 铀矿床成矿机理[J]. 成都地质学院学报, 1989, 16(3): 1—9.
Hu Ruizhong. Mineralizing mechanism of XW uranium deposit [J]. *Chengdu College of Geology*, 1989, 16(003): 1—9. (in Chinese with English abstract)
- [6] 胡瑞忠, 金景福. 上升热液浸取成矿过程中铀的迁移沉淀机制探讨: 以希望铀矿床为例[J]. 地质论评, 1990, 36(004): 317—325.
Hu Ruizhong, Jin Jingfu. Mechanism of the migration and deposition of uranium in ascending hydrothermal solutions—evidence from the Xiwang uranium deposit [J]. *Geological Review*, 1990, 36(4): 317—325 (in Chinese with English abstract)
- [7] 金景福, 胡瑞忠. XW 铀矿床成矿物理化学条件[J]. 成都地质学院学报, 1990, 17(3): 1—9.
Jin Jingfu, Hu Ruizhong. Physicochemical conditions of mineralization of XW uranium deposit [J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, 1990, 17(3): 1—9. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张成江. 贵东岩体花岗岩中晶质铀矿的特征及其找矿意义[J]. 成都地质学院学报, 1990, 17(3): 10—17.
Zhang Chengjiang. The features of uraninite in Guidong granite complex and its significance to search for uranium deposit [J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, 1990, 17(003): 10—17. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张成江. 贵东岩体花岗岩的成因类型及成矿专属性探讨[J]. 铀矿地质, 1991, 7(004): 223—234.
Zhang Chengjiang. Discussion on the genetic type and metallogenetic specialization for Guidong granite massif [J]. *Uranium Geology*, 1991, 7(004): 223—234. (in Chinese with English abstract)
- [10] 林锦荣. 论贵东岩体东西部花岗岩岩石学特征和铀[J]. 铀矿地质, 1992, 8(2): 93—99.
Lin Jinrong. On the difference of petrological characteristics and conditions for uranium metallogenesis between the eastern and western Guidong granite massif [J]. *Uranium Geology*, 1992, 8(2): 93—99. (in Chinese with English abstract)
- [11] 凌洪飞, 沈渭洲, 邓平, 蒋少涌, 高剑峰, 叶海敏, 濮巍, 谭正中. 粤北笋洞花岗岩的形成时代, 地球化学特征与成因[J]. 岩石学报, 2004, 20(003): 413—424.
Ling Hongfei, Shen Weizhou, Deng Ping, Jiang Shaoyong, Gao Jianfeng, Ye Haimin, Pu Wei, Tan Zhengzhong. Age, geochemistry and petrogenesis of the Sundong granite, northern Guangdong province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(003): 413—424. (in Chinese with English abstract)
- [12] 凌洪飞, 沈渭洲, 邓平, 蒋少涌, 姜耀辉, 邱检生, 黄国龙, 叶海敏, 谭正中. 粤北帽峰花岗岩体地球化学特征及成因研究[J]. 岩石学报, 2005, 21(003): 677—687.
Ling Hongfei, Shen Weizhou, Deng Ping, Jiang Shaoyong, Jiang Yaohui, Qiu Jiansheng, Huang Guolong, Ye Haimin, Tan Zhengzhong. Study of geochemistry and petrogenesis of the Maofeng granite, northern Guangdong Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(3): 677—687. (in Chinese with English abstract)
- [13] 吴烈勤, 黄国龙, 沈渭洲, 凌洪飞, 叶海敏, 刘汝洲, 邹志文. 粤北下庄花岗岩地球化学特征与成因研究[J]. 铀矿地质, 2005, 21(2): 65—71.
Wu Lieqin, Huang Guolong, Shen Weizhou, Ling Hongfei, Ye Haimin, Liu Ruzhou, Zou Zhiwen. Study on geochemical characteristics and genesis of Xiashuang granite, northern Guangdong [J]. *Uranium Geology*, 2005, 21(2): 65—71. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张展透, 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, 26(3): 749—749.
Zhang Zhanshi, Hua Renmin, Liu Xiaodong, Deng Ping, Wu Lieqin. Geochemical characteristics or rare earth elements of

- Guidong granitic complex and their relationship with uranium mineralization [J]. Chinese Rare Earth Society, 2005, 26 (3): 749-749. (in Chinese with English abstract)
- [15] Xu Xisheng, Deng Ping, Reilly S Y O, Griffin W L, Zhou Xinmin, Tan Zhengzhong. Single zircon LA-ICPMS U-Pb dating of Guidong complex (SE China) and its petrogenetic significance [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(17): 1892-1899.
- [16] Sun Tao, Zhuo Xinmin, Chen Peirong, Li Huimin, Zhou Hongying, Wang Zhicheng, Shen Weizhou. Strongly peraluminous granites of Mesozoic in Eastern Nanling Range, southern China: Petrogenesis and implications for tectonics [J]. Science in China (series D), 2005, 48(2): 165-174.
- [17] Ling Hongfei, Shen Weizhou, Deng Ping, Jiang Shaoyong, Jiang Yaohui, Ye Haimin, Pu Wei, Tan Zhengzhong. Geochemical characteristics and genesis of Luxi-Xianrenzhang diabase dikes in Xiazhuang uranium orefield, northern Guangdong province [J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(4): 575-575.
- [18] Matsuo, M., B. Takano, and K. Sugimori. M-ssbauer spectroscopic study of estuarine sediments taken from the Tama River in Tokyo [J]. Nuovo Cimento, 1996, 50: 757-760.
- [19] Kuno A, Matsuo M, Takano B. M-ssbauer spectroscopic study on vertical distribution of iron components in estuarine sediments collected from Tama River in Tokyo [J]. Hyperfine Interact, 1998, 3: 328-331.
- [20] 方同辉, 马鸿文. 辽宁宽甸地幔矿物三价铁的穆斯堡尔谱测定及意义[J]. 现代地质, 1998, 12(2): 197-203.
Fang Tonghui, Ma Hongwen. Ferric iron contents of mantle xenolith minerals by M-ssbauer spectroscopy and its implications to calculated temperature, pressure and oxygen fugacity [J]. Geoscience, 1998, 12(002): 197-203. (in Chinese with English abstract)
- [21] 陈图华, 张毓昌. 黑云母的穆斯堡尔谱学及其在两类不同成因花岗岩体研究中的应用[J]. 矿物学报, 1986, 6(1): 44-50.
Chen Tuhua, Zhang Yuchang. Mossbauer studies of biotites and its application in two different genetic granites [J]. Acta Mineralogica Sinica, 1986, 6(1): 44-50. (in Chinese with English abstract)
- [22] Annersten H. Mossbauer studies of natural biotites [J]. American Mineralogist, 1974, 59(1): 143-151.
- [23] Stone D. Temperature and pressure variations in suites of Archean felsic plutonic rocks, Berens River area, northwest Superior Province, Ontario, Canada [J]. Canadian Mineralogist, 2000, 38(2): 455-470.
- [24] Foster M. Interpretation of the composition of trioctahedral micas [J]. Survey Prof. Paper, 1960, 354: 11-46.
- [25] 陈佑纬, 毕献武, 胡瑞忠, 戚华文. 贵东复式岩体印支期产铀和非产铀花岗岩地球化学特征对比研究[J]. 矿物岩石, 2009, (3): 106-114.
Chen Youwei, Bi Xianwu, Hu Ruizhong, Qi Huawen. Comparison of geochemical characteristic of uranium- and non-uranium-bearing indosinian granites in Guidong composite pluton [J]. J. Mineral Petrol., 2009, (003): 106-114. (in Chinese with English abstract)
- [26] Boynton W. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [J]. REE Geochemistry, 1984: 63-114.
- [27] Taylor S R, McLennan S. The continental crust: its composition and evolution [M]. Blackwell, Oxford, 1985.
- [28] Bea F, Pereira M, Stroh A. Mineral/leucosome trace-element partitioning in a peraluminous migmatite (a laser ablation-ICP-MS study) [J]. Chemical Geology, 1994, 117(1-4): 291-312.
- [29] 胡建, 邱检生, 王汝成, 蒋少涌, 凌洪飞, 王孝磊. 广东龙窝和白石冈岩体锆石 U-Pb 年代学, 黑云母矿物化学及其成岩指示意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(010): 2464-2474.
Hu Jian, Qiu Jiansheng, Wang Rucheng, Jiang Shaoyong, Ling Hongfei, Wang Xiaolei. Zircon U-Pb geochronology, biotite mineral chemistry and their petrogenetic implications of the Longwo and Baishigang plutons in Guangdong province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(010): 2464-2474. (in Chinese with English abstract)
- [30] Peiffert C, Cuney M, Nguyen-Trung C. Uranium in granitic magmas: Part 1. Experimental determination of uranium solubility and fluid-melt partition coefficients in the uranium oxide-haplogranite-H₂O-Na₂CO₃ system at 720-77°C, 2 kbar [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1994, 58: 2495-2507.
- [31] Chabiron A, Cuney M, Poty B. Possible uranium sources for the largest uranium district associated with volcanism: the Streltsova caldera (Transbaikalia, Russia) [J]. Mineralium Deposita, 2003, 38(2): 127-140.
- [32] Jonathan P Icenhower, David London. Partitioning of fluorine and chlorine between biotite and granitic melt: experimental calibration at 200 MPa H₂O [J]. Contr. Min. Petrol., 1997, 127: 17-29.
- [33] Webster J, Holloway J. Partitioning of F and Cl between magmatic hydrothermal fluids and highly evolved granitic magmas [J]. Geological Society of America Special Paper, 1990, 246: 21-34.
- [34] Hannah J, Stein H. Magmatic and hydrothermal processes in ore-bearing systems, ore-bearing granite systems; Petrogenesis and mineralizing processes [J]. Geological Society of America Special Paper, 1990, 246: 1-10.
- [35] 王剑锋. 铀地球化学教程[M]. 北京: 原子能出版社, 1986.
Wang Jianfeng. The lectures about the geochemistry of uranium [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1986. (in Chinese)
- [36] 王剑锋, 马永焱. 铀地球化学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
Wang Chuangduo, Ma Yonghuan. The lectures about the geochemistry of uranium [M]. Beijing: Higher Education Press, 1998. (in Chinese)
- [37] 余达鑫, 吴仁贵, 陈培荣. 铀资源地质学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2005.
Yu Dagan, Wu Rengui, Chen Peirong. The geology of uranium resources [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2005. (in Chinese)