

## 粤北长江铀矿田长排地区花岗岩体 地球化学特征及其意义

叶永钦, 叶松鑫, 许 幼, 徐文雄

(核工业二九〇研究所, 广东 韶关 512029)

**摘 要:** 粤北长江铀矿田长排地区花岗岩体地球化学特征研究表明: 该岩体具有高硅, 富碱,  $w(K_2O) > w(Na_2O)$ , 中—高铝, 低 Ti、Fe、Mg 等地球化学特征, 属于典型的 S 型花岗岩; 在原始地幔标准化微量元素蛛网图上, 大离子亲石元素 Rb、Th、U 富集, Ba、Nb、Sr、Eu 等元素明显亏损; 球粒陨石标准化稀土元素配分模式表现为明显右倾型。主量元素和微量元素含量及比值特征显示: 花岗岩体源自成熟度较高的陆壳物质; 源区物质主要由贫黏土的砂质岩组成; 花岗岩体形成于伸展构造环境。花岗岩体产铀性研究表明: 长排地区两期花岗岩体具有较高的铀区域地球化学背景, 且岩体中的铀均受到了活化改造和再分配, 具备较高的产铀潜力。

**关键词:** 花岗岩; 铀矿; 地球化学; 岩石成因; 燕山早期; 印支期; 长排地区; 广东

**中图分类号:** P588.12; P595

**文献标志码:** A

## Geochemical Characteristics of Granite Body in Changpai Area of Changjiang Uranium Orefield, the Northern Guangdong and Their Significance

YE Yong-qin, YE Song-xin, XU You, XU Wen-xiong

(No. 290 Research Institute of CNNC, Shaoguan 512029, Guangdong, China)

**Abstract:** The geochemical characteristics of granite body in Changpai area of Changjiang uranium orefield, the northern Guangdong, were studied. The results show that the granite body has the characteristics of high Si and alkalis,  $w(K_2O) > w(Na_2O)$ , medium-high Al, and low Ti, Fe, Mg, etc.; the granite body belongs to the typical S-type; according to the primitive mantle-normalized trace element spider diagrams, the large ion lithophile elements including Rb, Th and U are enriched, and the Ba, Nb, Sr, Eu, etc. are depleted; the chondrite-normalized REE patterns are obvious right deviation type. The contents and ratio characteristics of major and trace elements show that the granite body derives from the continental crust material with high maturity; the source materials are composed by the poor clay sandstone; the granite body forms in extensional tectonic settings. The study on the uranium production shows that the Indosinian and Early Yanshanian granite bodies in Changpai area have high regional geochemical background of uranium, and the uranium in granite body suffers reforming activation and redistribution, so that the granite body has higher production potential of uranium.

**Key words:** granite; uranium ore; geochemistry; petrogenesis; Early Yanshanian; Indosinian;

收稿日期: 2014-12-10

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2011BAB04B07-5); 中国地质调查局地质大调查项目(1212011220781); 中国核工业地质局铀矿地质项目(2011-71)

作者简介: 叶永钦(1988-), 男, 福建漳州人, 助理工程师, 理学硕士, E-mail: yeyongqincdut@163.com。

Changpai area; Guangdong

## 0 引言

粤北长排地区花岗岩体位于诸广山巨型复式岩体南缘的长江铀矿田中部,北邻棉花坑(302)铀矿床<sup>[1-6]</sup>。其大地构造位置隶属于华南地槽褶皱系赣南后加里东隆起带,处于华南铀成矿省 NE 向桃山—诸广山铀成矿带南段;区域上位于 NE 向长江断陷带的中部,是华南地区重要的花岗岩型铀矿找矿靶区。徐文雄等结合长排地区区域地质背景,充分分析了长排地区岩体、岩浆热液及构造等成矿地质条件,认为长排地区具有有利的铀成矿地质背景,多期次岩浆侵入活动造就了围岩蚀变类型丰富和酸碱叠加,含矿构造极其发育,成矿条件优越<sup>[7]</sup>。通过综合分析长排地区含矿构造蚀变带特征、铀矿化特征及控矿因素,含矿构造蚀变带具有明显的水平分带特征,中心为硅化带,向两侧依次发育赤铁矿化、绢云母化、绿泥石化和高岭土化等各类蚀变,矿化主要与硅化、赤铁矿化、黄铁矿化、绿泥石化、紫黑色萤石化关系密切,特别是当多种蚀变叠加时,往往有更好的铀矿化。黄国龙等分别对长排地区油洞岩体和

长江岩体进行 U-Pb 年代学、元素地球化学研究,并初步探讨了 2 个岩体的成因<sup>[8-9]</sup>,但都是针对长排地区花岗岩体中某一阶段的单一岩性,缺乏综合性研究。笔者通过对长排地区燕山早期和印支期侵入的花岗岩体开展详细的地球化学研究,在此基础上深入了解该地区花岗岩体的成因、构造环境及其产铀性。

## 1 岩体地质及岩相学特征

长排地区花岗岩体夹持于 NNE 向牛尾岭断裂、NE 向黄溪水断裂和 NW 向油洞断裂三者交汇部位,总体呈 NE 向展布,受断裂控制明显,属主动就位侵入体。区内地质构造运动方式多样,构造岩浆活动频繁,其中印支期—燕山早期岩浆侵入活动达到最高潮,构成本区岩体主体。出露的岩石主要为燕山早期花岗岩,其次是印支期侵入的花岗岩,另外还有少量海西期花岗闪长岩(图 1)。

印支期第二阶段粗粒斑状黑云母花岗岩( $\gamma_s^{1-2}$ )呈灰白色、粗粒似斑状结构和块状构造。主要矿物为钾长石、斜长石、石英,其次为黑云母。斑晶钾长

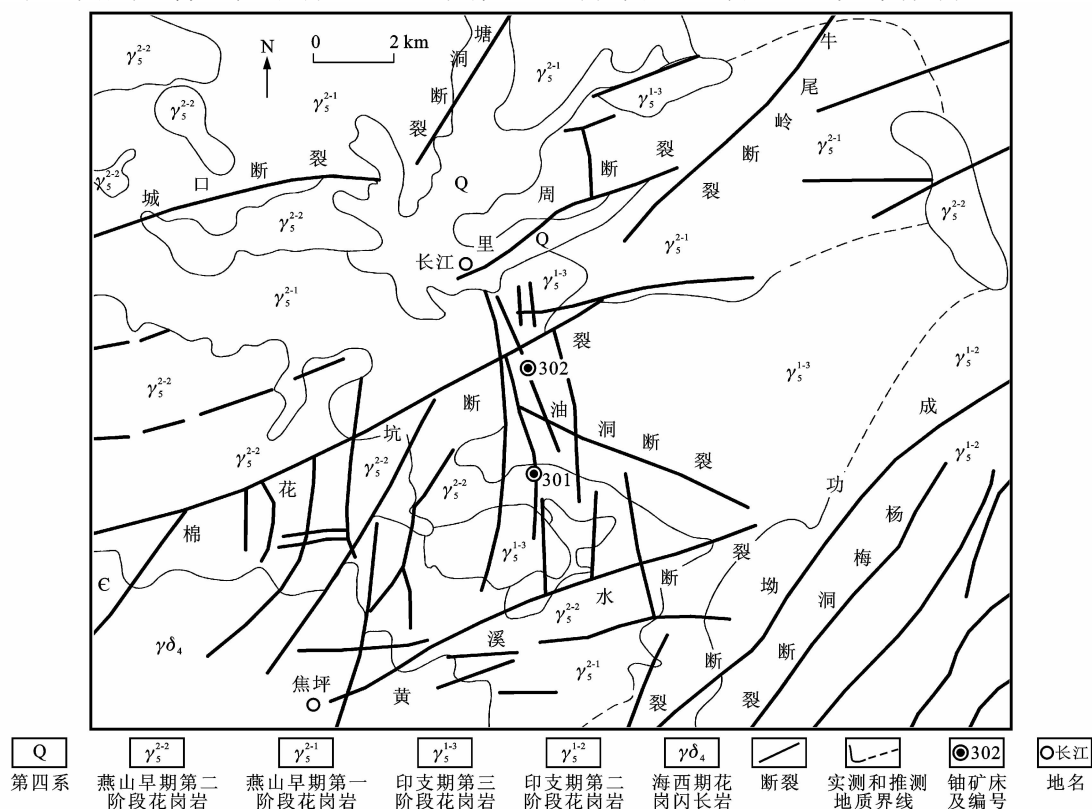


图 1 粤北长江铀矿田长排地区地质简图

Fig. 1 Sketch Geological Map in Changpai Area of Changjiang Uranium Orefield, the Northern Guangdong

石(体积分数约为30%)大小一般为(15~20)mm×(8~12)mm;斜长石(30%~35%)聚片双晶发育;石英(25%~30%)呈他形粒状,基质中石英为透明烟灰色;黑云母(5%~9%)呈自形片状,解理发育。岩石有钠长石化、绢云母化,黑云母有绿泥石化。

印支期第三阶段中粒小斑状二云母花岗岩( $\gamma_5^{1-3}$ )呈灰白色、中粒似斑状结构和块状构造。主要矿物为钾长石、斜长石、石英,其次为黑云母和白云母。斑晶钾长石(体积分数为30%~35%)为细长条状,呈半定向排列,体积分数较大;斜长石(约25%)为更长石,聚片双晶发育;石英(25%~30%)呈他形粒状;黑云母(5%~8%)呈自形鳞片状;白云母(2%~5%)为细片集合体,与黑云母伴生,云母解理多弯曲变形。岩石有钾长石化、钠长石化、白云母化、绢云母化及绿泥石化等蚀变。

燕山早期第一阶段花岗岩( $\gamma_5^{2-1}$ )主要分布在长排地区中部,出露面积大。岩性以中粒黑云母花岗岩、不等粒黑云母花岗岩为主。中粒黑云母花岗岩呈灰白色间浅肉红色、中粒花岗结构和块状构造。主要矿物成分为长石、石英,其次为黑云母。长石(体积分数为62%~65%)呈半自形板柱状;石英(25%~28%)呈他形粒状,无色透明,粒径2~5 mm;黑云母(5%~7%)呈自形片状,局部绿泥石化、少量绿帘石化。不等粒黑云母花岗岩呈灰白色间浅肉红色、不等粒结构和块状构造。主要矿物成分为长石、石英,其次为黑云母。长石(体积分数为60%~64%)呈半自形短柱状、板状;石英(26%~30%)呈他形粒状,无色透明,粒度不均匀;黑云母(5%~8%)呈自形鳞片状,为浅黄—黄褐色多色性。岩石常见有钾长石化、白云母化、绢云母化及绿泥石化等蚀变。

燕山早期第二阶段细粒黑云母花岗岩( $\gamma_5^{2-3}$ )在区内中南部零星分布,呈灰白带黄色、肉红色等,细粒花岗结构和块状构造。主要矿物成分为长石、石英,其次为黑云母。石英呈他形粒状,粒径为1.5~2.0 mm,粒度较均匀。

## 2 样品采集与分析测试

本次研究的样品为长排地区多个钻孔不同深度的新鲜岩石样,涉及多个成岩阶段。岩体主要有燕山早期的中粒黑云母花岗岩( $\gamma_5^{2-1}$ )、不等粒黑云母花岗岩( $\gamma_5^{2-1}$ )和细粒黑云母花岗岩( $\gamma_5^{2-3}$ )以及印支期粗粒斑状黑云母花岗岩( $\gamma_5^{1-2}$ )和中粒小斑状二云母花岗岩( $\gamma_5^{1-3}$ )。

将一定量的各阶段岩石样品全部破碎,在玛瑙研磨钵里研磨至200目(直径为0.071 mm)以下,然后送相关实验室进行各项测试分析。主量元素由核工业二九〇研究所分析测试中心采用湿化学方法测试,精度优于1%。微量元素、稀土元素分析由核工业北京地质研究院分析测试中心采用DZ/T 0223—2001《电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)分析方法通则》完成,分析仪器为Finnigan公司生产的HR-ICP-MS Element I型电感耦合等离子体质谱仪,相对误差不高于10%。

## 3 地球化学特征

### 3.1 主量元素

从主量元素分析结果(表1)可以看出:①长排地区花岗岩体酸度大, $\text{SiO}_2$ 含量(质量分数,下同)大于70%,其中燕山早期花岗岩体 $\text{SiO}_2$ 含量为71.64%~75.90%,平均为73.95%,印支期花岗岩体 $\text{SiO}_2$ 含量为69.20%~72.14%,平均为70.87%;②长排地区花岗岩体碱质含量高,燕山早期花岗岩体总碱含量( $w(\text{K}_2\text{O})+w(\text{Na}_2\text{O})$ )为7.94%~9.34%,印支期花岗岩体总碱含量为8.31%~9.23%, $w(\text{K}_2\text{O})>w(\text{Na}_2\text{O})$ ,燕山早期花岗岩体 $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 值为1.31~1.97,平均值为1.62,印支期花岗岩体 $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 值为1.61~2.12,平均值为1.90,与华南壳源型花岗岩相似<sup>[10]</sup>;③燕山早期花岗岩体 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量为12.18%~13.99%,平均值为13.01%,印支期花岗岩体 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量为13.70%~14.66%,平均值为14.23%,岩体总体上具有中—高铝的特征;④燕山早期与印支期花岗岩体 $\text{TiO}_2$ 含量平均值分别为0.20%和0.43%, $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)+w(\text{FeO})$ 平均值分别为1.66%和2.50%, $\text{MgO}$ 含量平均值分别为0.40%、0.86%,岩体具有低Ti、Fe、Mg的特征。综上所述,长排地区花岗岩体具有高硅、中—高铝与低Ti、Fe、Mg等岩石地球化学特征。

在Wright碱度率- $\text{SiO}_2$ 图解中,两期花岗岩体样品均落在碱性—钙碱性范围内,相当于皮科克钙碱性岩,燕山早期花岗岩体的Wright碱度率略高于印支期[图2(a)]。在 $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$ 图解上,燕山早期的样品主要落在高钾钙碱性系列及其上部范围内,印支期的样品则落在钾玄岩系列内[图2(b)]。在ACF图解中,两期花岗岩体样品均位于S型花岗岩区域内[图2(c)]。燕山早期花岗岩体铝饱和指数A/CNK值为0.89~1.08,平均值为0.97,属偏铝质花岗岩范畴;印支期花岗岩体A/CNK值为

表 1 花岗岩体主量元素分析结果

Tab. 1 Analysis Results of Major Elements of Granite Body

成岩时代	燕山早期										印支期			
样品编号	651-4	871-2	651-1	672-1	751-2	871-1	672-3	672-4	651-2	751-1	272-1	091-3	331-1	091-2
$w(\text{SiO}_2)/\%$	73.90	75.64	74.76	74.82	75.53	75.90	71.64	72.04	72.08	73.16	72.14	69.20	71.80	70.34
$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%$	0.59	0.26	0.36	0.48	0.40	0.36	0.70	0.62	0.47	0.47	0.39	1.99	0.27	0.08
$w(\text{FeO})/\%$	0.46	0.79	1.04	0.94	0.92	1.15	1.69	1.69	1.70	1.48	1.54	1.51	1.48	2.74
$w(\text{K}_2\text{O})/\%$	5.30	5.38	5.86	4.94	5.00	5.27	5.12	5.24	5.96	5.89	5.65	6.12	5.50	5.87
$w(\text{Na}_2\text{O})/\%$	3.59	3.47	3.48	3.50	3.81	2.67	3.27	3.20	3.38	3.25	2.66	2.89	3.42	3.36
$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	13.99	12.26	12.81	12.92	12.40	12.18	13.64	13.18	13.64	13.11	14.66	14.53	14.03	13.70
$w(\text{CaO})/\%$	0.72	1.23	0.72	1.04	0.72	0.72	1.73	1.30	1.44	1.59	0.85	1.88	1.23	0.43
$w(\text{MgO})/\%$	0.21	0.10	0.49	0.18	0.31	0.31	0.72	0.72	0.51	0.41	0.40	0.67	0.82	1.54
$w(\text{MnO})/\%$	0.10	0.09	0.10	0.11	0.09	0.11	0.14	0.12	0.16	0.13	0.07	0.09	0.10	0.14
$w(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.10	0.08	0.08	0.05	0.20	0.10	0.20	0.20
$w(\text{TiO}_2)/\%$	0.03	0.05	0.10	0.10	0.05	0.10	0.50	0.50	0.30	0.30	0.25	0.30	0.40	0.75
$w_{\text{total}}/\%$	98.94	99.30	99.75	99.06	99.26	98.80	99.25	98.69	99.72	99.84	98.81	99.28	99.25	99.15
$w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$	1.48	1.55	1.68	1.41	1.31	1.97	1.57	1.64	1.76	1.81	2.12	2.12	1.61	1.75
$(w(\text{Fe}_2\text{O}_3)+w(\text{FeO}))/\%$	1.05	1.05	1.40	1.42	1.32	1.51	2.39	2.31	2.17	1.95	1.93	3.50	1.75	2.82
Wright 碱度率(A. R)	2.91	3.12	3.12	3.01	3.77	2.41	2.48	2.58	2.63	2.59	2.04	2.09	2.62	2.81
A/CNK 值	1.08	0.89	0.96	0.99	0.95	1.07	0.97	0.99	0.93	0.90	1.22	0.98	1.01	1.08
NK/A 值	0.83	0.94	0.94	0.86	0.94	0.83	0.80	0.83	0.88	0.90	0.72	0.78	0.83	0.87
$w(\text{CaO})/w(\text{Na}_2\text{O})$	0.20	0.35	0.21	0.30	0.19	0.27	0.53	0.41	0.43	0.49	0.32	0.65	0.36	0.13
C/MF 值	0.84	1.45	0.44	0.90	0.56	0.50	0.67	0.51	0.65	0.84	0.45	0.67	0.51	0.10
A/MF 值	8.95	7.96	4.34	6.16	5.28	4.60	2.92	2.85	3.40	3.81	4.25	2.84	3.22	1.74
$x$ 值	21.21	20.90	22.95	20.03	20.60	23.14	18.75	20.10	21.42	21.39	23.32	21.53	20.51	22.88

注:样品 651-4、871-2、651-1 为细粒黑云母花岗岩;样品 672-1、751-2、871-1 为不等粒黑云母花岗岩;样品 672-3、672-4、651-2、751-1 为中粒黑云母花岗岩;样品 272-1、091-3 为中粒小斑状二云母花岗岩;样品 331-1、091-2 为粗粒斑状黑云母花岗岩; $w(\cdot)$  为元素或化合物含量; $w_{\text{total}}$  为主量元素总含量; $x$  代表岩石化学评价系数, $x=0.2w(\text{SiO}_2)+(w(\text{K}_2\text{O})+w(\text{Na}_2\text{O}))\times 3w(\text{K}_2\text{O})/5w(\text{Na}_2\text{O})-2w(\text{CaO})$ 。

0.98~1.22,平均值为 1.07,属过铝质花岗岩。在 A/CNK-NK/A 图解上,数据点大部分都落在亚碱性铝质区域内[图 2(d)]。

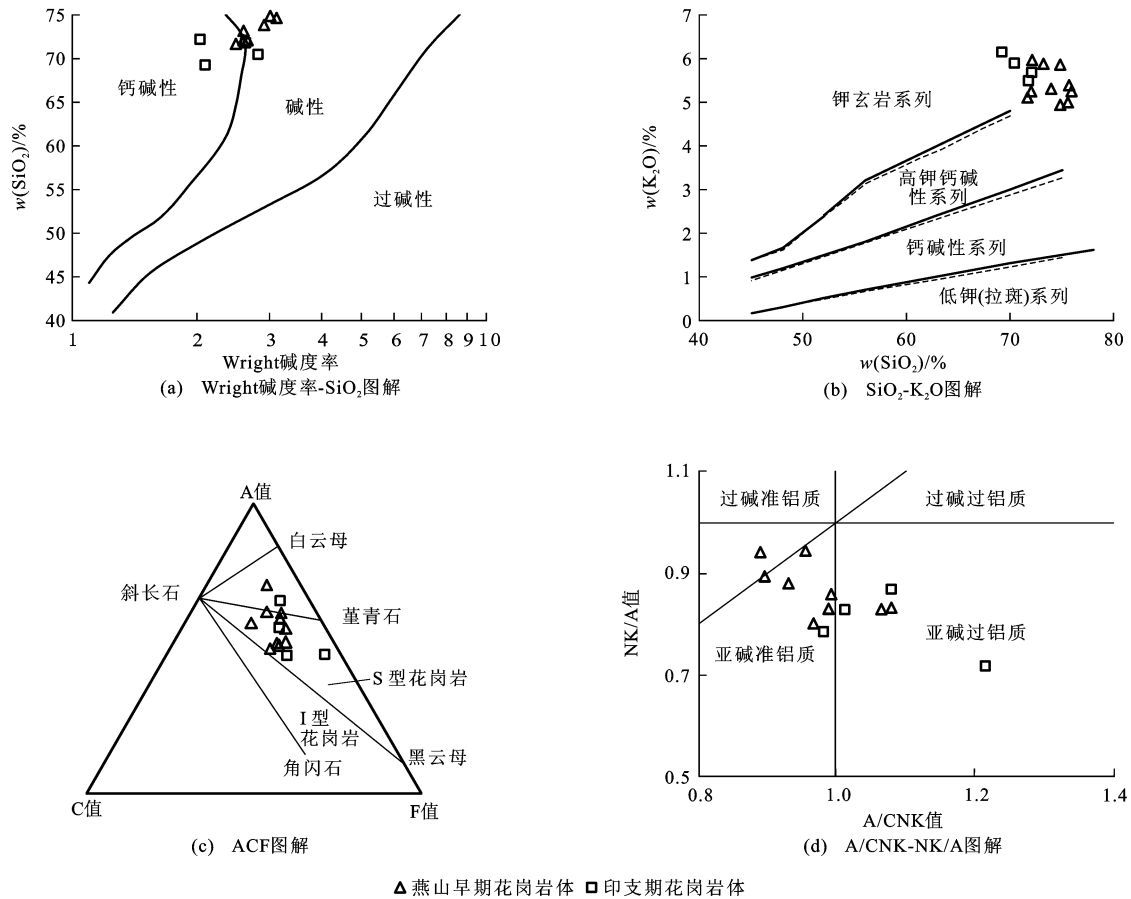
### 3.2 微量元素

长排地区花岗岩体微量元素分析结果见表 2。从燕山早期花岗岩体原始地幔标准化微量元素蛛网图[图 3(a)]可以看出,燕山早期不同岩性的花岗岩具有相似的微量元素特征,表现为 Rb、Th、U、Pb 等明显富集,Nd、Zr、Hf、Sm 等轻微富集,Ba、Sr、Eu 明显亏损,Ta、Nb、La 等轻微亏损。“峰值”和“谷值”明显,属于典型的低 Ba-Sr 花岗岩,类似于南岭东段过铝质花岗岩<sup>[11-13]</sup>。

燕山早期花岗岩体的  $w(\text{Nb})/w(\text{Ta})$  值(2.75~6.87,平均为 4.86)和  $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$  值(16.0~27.7,平均为 21.0)都明显低于正常花岗岩(分别为 11.0 和 33.0~40.0<sup>[14-16]</sup>),说明在壳源物质熔融形成花

岗岩浆的演化过程中,发生过熔体与富挥发分流体之间的相互作用<sup>[14-16]</sup>。 $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$  值(5.52~6.78,平均为 6.15)和  $w(\text{Rb})/w(\text{Nb})$  值(13.4~19.6,平均为 16.0)都分别高于中国东部平均值(分别为 0.310 和 6.80<sup>[17]</sup>)和全球上地壳平均值(分别为 0.320 和 4.50<sup>[18]</sup>)。以上元素比值特征充分表明长排地区燕山早期花岗岩体源自成熟度较高的陆壳物质。

由图 3(b)可知,印支期花岗岩体的微量元素配分模式表现出与燕山早期基本一致的特征,富集部分大离子亲石元素 Rb、Th、U 等,明显亏损 Ba、Nb、Sr、Eu 等。印支期花岗岩体的  $w(\text{Nb})/w(\text{Ta})$  值(5.98~8.09,平均为 6.73)、 $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$  值(27.7~34.0,平均为 32.7)、 $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$  值(0.26~5.93,平均为 3.63)和  $w(\text{Rb})/w(\text{Nb})$  值(0.98~15.60,平均为 11.0)表现出与燕山早期花岗岩体一致的特征。



图(a)引自文献[19];图(b)引自文献[20];图(c)引自文献[21];图(d)引自文献[10]

图2 花岗岩体主量元素地球化学散点图

Fig. 2 Diagrams Showing the Geochemistry of Major Elements of Granite Body

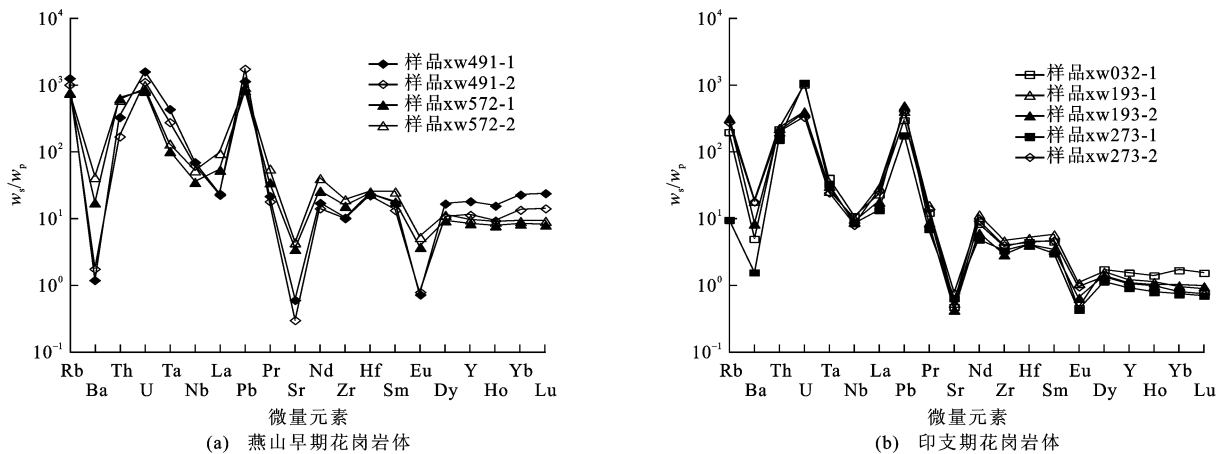
 $w_s$  为样品含量;  $w_p$  为原始地幔含量; 原始地幔标准化值引自文献[22]

图3 花岗岩体原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig. 3 Primitive Mantle-normalized Trace Element Spider Diagrams of Granite Body

上述元素比值特征进一步表明长排地区印支期花岗岩体源自成熟度较高的陆壳物质。

### 3.3 稀土元素

燕山早期花岗岩体稀土元素总含量偏低且变化明显,为 $(104 \sim 259) \times 10^{-6}$ ,平均值为 $161 \times 10^{-6}$

(表2),远低于世界花岗岩的稀土元素总含量平均值 $(285 \times 10^{-6})$ <sup>[23]</sup>;  $w_{\text{LREE}}/w_{\text{HREE}}$  值为2.08~9.10,平均为5.27,岩体明显富集轻稀土元素;  $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$  值为1.03~10.5,平均为4.93,轻、重稀土元素分馏明显; Eu显著亏损,  $\delta(\text{Eu})$  值为0.050~

表 2 花岗岩体微量元素和稀土元素分析结果

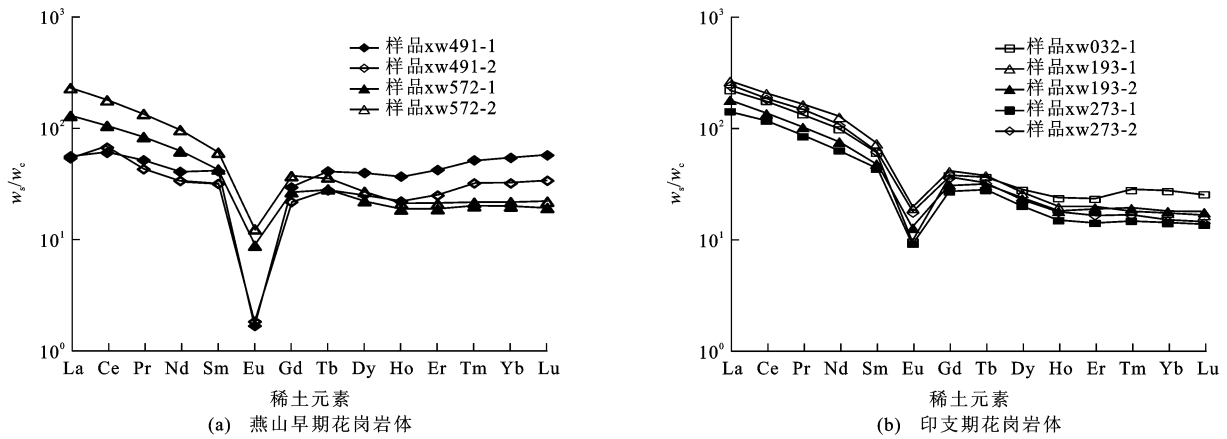
Tab. 2 Analysis Results of Trace and Rare Earth Elements of Granite Body

成岩时代	燕山早期				印支期				
样品编号	xw491-1	xw572-1	xw491-2	xw572-2	xw273-1	xw032-1	xw193-2	xw193-1	xw273-2
$w(\text{Rb})/10^{-6}$	683.0	411.0	545.0	421.0	23.9	269.0	397.0	395.0	353.0
$w(\text{Ba})/10^{-6}$	6.80	101.00	10.10	243.00	61.80	156.00	238.00	445.00	437.00
$w(\text{Th})/10^{-6}$	23.7	45.8	12.1	43.3	29.1	38.9	36.7	40.3	36.4
$w(\text{U})/10^{-6}$	28.6	14.6	19.9	15.5	34.6	33.1	15.2	15.7	13.5
$w(\text{Ta})/10^{-6}$	15.10	3.52	9.58	4.57	4.10	4.91	3.95	3.45	3.28
$w(\text{Nb})/10^{-6}$	41.6	21.0	37.0	31.4	24.5	29.7	25.5	27.9	23.3
$w(\text{Pb})/10^{-6}$	69.1	50.2	106	56.5	27.4	41.7	62.6	54.2	53.5
$w(\text{Sr})/10^{-6}$	10.30	60.60	5.12	76.30	91.50	71.90	67.00	81.00	105.00
$w(\text{Zr})/10^{-6}$	95.3	144.0	93.3	180.0	182.0	200.0	163.0	239.0	210.0
$w(\text{Hf})/10^{-6}$	5.96	6.01	5.70	6.51	5.80	6.33	5.89	7.07	6.18
$w(\text{Y})/10^{-6}$	68.4	32.0	42.6	36.6	26.2	39.9	30.4	32.7	29.5
$w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$	66.30	6.78	106.00	5.52	0.26	3.74	5.93	4.88	3.36
$w(\text{Rb})/w(\text{Nb})$	16.40	19.60	14.70	13.40	0.98	9.06	15.60	14.20	15.20
$w(\text{Nb})/w(\text{Ta})$	2.75	5.97	3.86	6.87	5.98	6.05	6.46	8.09	7.10
$w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$	16.0	24.0	16.4	27.7	31.4	31.6	27.7	33.8	34.0
$w(\text{Th})/w(\text{U})$	0.83	3.14	0.61	2.79	0.84	1.18	2.41	2.57	2.70
$w(\text{La})/10^{-6}$	13.4	30.9	12.9	54.8	33.8	52.2	42.8	63.3	57.7
$w(\text{Ce})/10^{-6}$	37.3	65.0	41.5	110.0	71.8	108.0	83.4	127.0	113.0
$w(\text{Pr})/10^{-6}$	4.96	8.00	4.12	12.90	8.05	12.70	9.75	15.60	14.10
$w(\text{Nd})/10^{-6}$	19.2	29.3	15.9	45.4	29.5	45.8	35.5	59.2	50.0
$w(\text{Sm})/10^{-6}$	6.37	6.60	4.91	9.35	6.62	9.21	7.35	11.20	9.46
$w(\text{Eu})/10^{-6}$	0.099	0.518	0.108	0.728	0.529	0.555	0.737	1.110	1.010
$w(\text{Gd})/10^{-6}$	6.12	5.55	4.52	7.74	5.56	7.75	6.41	8.43	7.33
$w(\text{Tb})/10^{-6}$	1.55	1.07	1.05	1.37	1.04	1.36	1.15	1.41	1.20
$w(\text{Dy})/10^{-6}$	10.20	5.71	6.49	6.92	5.09	7.09	5.94	6.63	5.73
$w(\text{Ho})/10^{-6}$	2.110	1.070	1.260	1.210	0.841	1.330	1.020	1.110	0.995
$w(\text{Er})/10^{-6}$	7.07	3.15	4.17	3.52	2.33	3.83	3.09	3.21	2.73
$w(\text{Tm})/10^{-6}$	1.330	0.516	0.827	0.555	0.375	0.709	0.486	0.460	0.424
$w(\text{Yb})/10^{-6}$	9.33	3.42	5.51	3.74	2.38	4.63	3.05	2.95	2.51
$w(\text{Lu})/10^{-6}$	1.470	0.495	0.869	0.564	0.344	0.646	0.446	0.420	0.359
$w_{\text{REE}}/10^{-6}$	121	161	104	259	168	256	201	302	267
$w_{\text{LREE}}/w_{\text{HREE}}$	2.08	6.69	3.22	9.10	8.37	8.35	8.31	11.30	11.50
$\delta(\text{Eu})$	0.05	0.25	0.07	0.25	0.26	0.20	0.32	0.34	0.36
$w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$	1.03	6.48	1.68	10.50	10.20	8.09	10.10	15.40	16.50
$w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$	1.36	3.02	1.70	3.78	3.30	3.66	3.76	3.65	3.94
$w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$	0.54	1.34	0.68	1.71	1.93	1.38	1.74	2.36	2.42

注:样品 xw491-1 为细粒黑云母花岗岩;样品 xw572-1、xw491-2 为不等粒黑云母花岗岩;样品 xw572-2 为中粒黑云母花岗岩;样品 xw273-1、xw032-1、xw193-2 为中粒小斑状二云母花岗岩;样品 xw193-1、xw273-2 为粗粒斑状黑云母花岗岩; $w_{\text{REE}}$  为稀土元素总含量; $w_{\text{LREE}}$  为轻稀土元素总含量; $w_{\text{HREE}}$  为重稀土元素总含量; $w(\cdot)_{\text{N}}$  为元素含量球粒陨石标准化后的值; $\delta(\cdot)$  为元素异常。

0.250, 平均为 0.160。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式[图 4(a)]上, 配分模式呈右倾“V”字形。 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$  值(1.36~3.78, 平均为 2.47)和  $w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$  值(0.540~1.71, 平均为 1.07) 较低, 反映轻、重稀土元素本身之间的分馏较弱。

印支期花岗岩体稀土元素总含量变化较大, 为  $(168 \sim 302) \times 10^{-6}$ , 平均值为  $239 \times 10^{-6}$ , 含量较高; $w_{\text{LREE}}/w_{\text{HREE}}$  值为 8.31~11.5, 平均值为 9.57, 明显超过地幔(1.13~1.14), 强烈富集轻稀土元素; $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$  值为 8.09~16.5, 平均值为



$w_c$  为球粒陨石含量;球粒陨石标准化值引自文献[22]

图4 花岗岩体球粒陨石标准化稀土元素配分模式

Fig. 4 Chondrite-normalized REE Patterns of Granite Body

12.0, 轻、重稀土元素分馏显著;Eu 明显亏损,  $\delta(\text{Eu})$  值为 0.200~0.360, 平均值为 0.290。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式[图 4(b)]上, 配分模式为明显右倾的不对称燕型。 $w(\text{La})_N/w(\text{Sm})_N$  值 (3.30~3.94, 平均为 3.66) 和  $w(\text{Gd})_N/w(\text{Yb})_N$  值 (1.38~2.42, 平均为 1.97) 较高, 反映轻、重稀土元素本身之间的分馏较强。

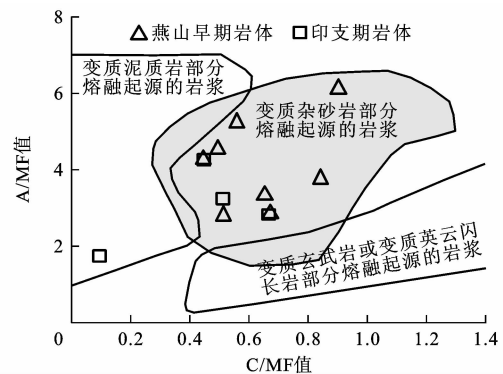
## 4 讨论

### 4.1 花岗岩的源区特征

长排地区两期花岗岩体相对富硅、铝、碱,  $w(\text{K}_2\text{O}) > w(\text{Na}_2\text{O})$ , 富集大离子亲石元素 Rb、Th、U, 明显亏损 Ba、Nb、Sr、Eu, 具有较高的  $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 、 $w(\text{Rb})/w(\text{Nb})$  值, 轻稀土元素强烈富集, 球粒陨石标准化稀土元素配分模式呈右倾型, Eu 显著亏损,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值较低, Nd 模式年龄古老<sup>[24]</sup>。上述地球化学特征表明, 长排地区两期花岗岩体均属于典型的壳源型花岗岩范畴, 是由古老的地壳组分通过部分熔融的方式形成的。其中:  $\epsilon_{\text{Nd}} = [(N(^{143}\text{Nd})/N(^{144}\text{Nd}))_i / (N(^{143}\text{Nd})/N(^{144}\text{Nd}))_{\text{CHUR}} - 1] \times 10^4$ , 下标 i 表示初始比值, 下标 CHUR 表示球粒陨石均一源与样品同时的比值,  $N(\cdot)/N(\cdot)$  为同一元素同位素比值,  $N(\cdot)$  为该元素的原子丰度;  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  为年龄  $t$  对应的  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值。

长排地区花岗岩体的  $w(\text{CaO})/w(\text{Na}_2\text{O})$  平均值均大于 0.3, 燕山早期岩体为 0.19~0.53, 平均值为 0.34, 印支期岩体为 0.13~0.65, 平均值为 0.36。这反映其源区物质主要由砂质成分岩石组成, 少量由泥质成分组成<sup>[23]</sup>。在 C/MF-A/MF 图解<sup>[25]</sup>上, 数据点主要分布于变质杂砂岩部分熔融起

源的岩浆区域内, 少量分布于变质泥质岩部分熔融起源的岩浆区域内(图 5), 说明长排地区花岗岩体的源区物质主要由贫黏土的砂质岩组成。结合其古老的 Nd 模式年龄(1 608~1 997 Ma), 推测这些源区物质最初是在古元古代从地幔中提取的。



图件引自文献[25]

图5 花岗岩体 C/MF-A/MF 图解

Fig. 5 Diagram of C/MF-A/MF for Granite Body

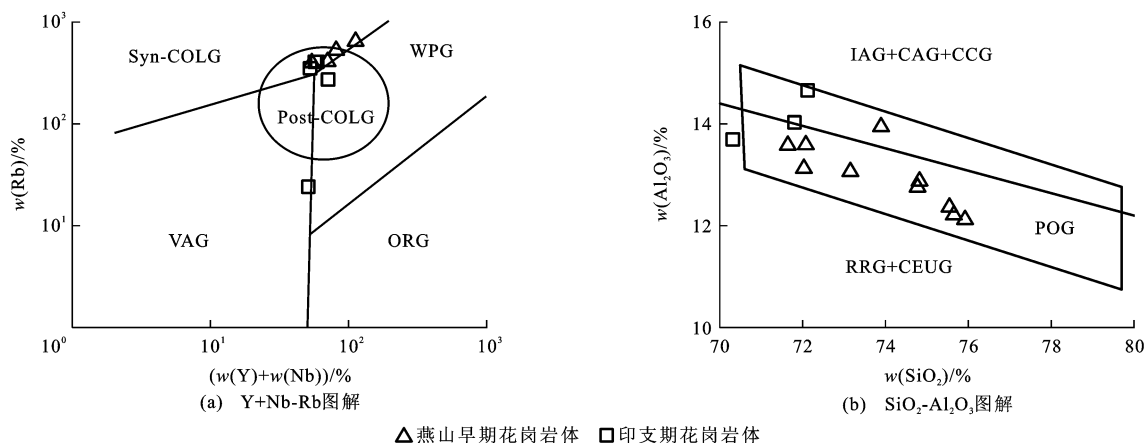
### 4.2 花岗岩形成的构造环境

在 Y+Nb-Rb 图解<sup>[26]</sup>中, 长排地区花岗岩体主要位于后碰撞和同碰撞花岗岩区域内[图 6(a)]。肖庆辉等研究表明, 投影于同碰撞区域内的花岗岩其实是后碰撞作用的产物<sup>[27-28]</sup>。在  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  图解<sup>[29]</sup>中, 数据点主要落在后造山花岗岩类区域内[图 6(b)], 而后造山花岗岩类本质与后碰撞花岗岩相似, 因此, 长排地区花岗岩体是在伸展构造环境下形成的。

### 4.3 产铀性分析

#### 4.3.1 U、Th 含量特征

长排地区花岗岩体的 U 含量较高。燕山早期花岗岩体的 U 含量为  $(14.6 \sim 28.6) \times 10^{-6}$ , 平均值



Syn-COLG 为同碰撞花岗岩; WPG 为板内花岗岩; Post-COLG 为后碰撞花岗岩; VAG 为火山弧花岗岩; ORG 为洋脊花岗岩; IAG 为岛弧花岗岩类; CAG 为大陆弧花岗岩类; CCG 为大陆碰撞花岗岩类; POG 为后造山花岗岩类; RRG 为与裂谷有关花岗岩类; CEUG 为与大陆的造陆抬升有关的花岗岩类; 图(a)引自文献[26]; 图(b)引自文献[29]

图 6 花岗岩体 Y+Nb-Rb 和  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  构造环境判别图解

Fig. 6 Tectonic Setting Discrimination Diagrams of Y+Nb-Rb and  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  for Granite Body

为  $19.7 \times 10^{-6}$ , Th 含量为  $(12.1 \sim 45.8) \times 10^{-6}$ , 平均值为  $31.2 \times 10^{-6}$ ; 印支期花岗岩体的 U 含量为  $(13.5 \sim 34.6) \times 10^{-6}$ , 平均值为  $22.4 \times 10^{-6}$ , Th 含量为  $(29.1 \sim 40.3) \times 10^{-6}$ , 平均值为  $36.28 \times 10^{-6}$ 。两期花岗岩体的 U 含量都高于世界花岗岩平均值 ( $3.50 \times 10^{-6}$ ), 也明显高于华南产铀花岗岩平均值 ( $10.7 \times 10^{-6}$ ), 显示长排地区花岗岩体具有较高的铀区域地球化学背景, 是成为产铀岩体的重要前提。

$w(\text{Th})/w(\text{U})$  值是反映产铀花岗岩体的一个重要地球化学特征参数, 未经岩浆期后热液作用或表生作用改造的各种岩浆岩  $w(\text{Th})/w(\text{U})$  值能够稳定地保持在  $3 \sim 5$  [30]。燕山早期花岗岩体的  $w(\text{Th})/w(\text{U})$  值一般小于 3, 一些样品出现了向更低值分离的现象; 印支期花岗岩体的  $w(\text{Th})/w(\text{U})$  值一般在  $1 \sim 2$  之间。这反映了岩体自印支期以来, 特别是燕山早期以来, 遭受了一定程度的热液作用影响, 岩体中的 U 受到活化改造和再分配。

#### 4.3.2 岩石化学评价系数

岩石化学评价系数(x)是评价花岗岩体产铀性的又一判定标准。张祖还等研究认为, 岩石化学评价系数在  $18 \sim 23$  的岩体具备产铀矿能力 [30]。长排地区燕山早期花岗岩体与印支期花岗岩体的岩石化学评价系数分别为  $18.75 \sim 23.14$  和  $20.51 \sim 23.32$ , 平均值分别为 21.05 和 22.06。这显示两期花岗岩体属于产铀岩体范畴, 均具有产铀潜力。

## 5 结 语

(1) 粤北长江铀矿田长排地区燕山早期与印支

期花岗岩体具有高硅, 富碱,  $w(\text{K}_2\text{O}) > w(\text{Na}_2\text{O})$ , 中一高铝, 低 Ti、Fe、Mg 等地球化学特征, 属于典型的 S 型花岗岩。岩体富集大离子亲石元素 Rb、Th、U, 明显亏损 Ba、Nb、Sr、Eu, 具有较低的  $w(\text{Nb})/w(\text{Ta})$ 、 $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$  值和较高的  $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 、 $w(\text{Rb})/w(\text{Nb})$  值。上述花岗岩源自成熟度较高的陆壳物质。

(2)  $w(\text{CaO})/w(\text{Na}_2\text{O})$  值及 C/MF-A/MF 图解表明, 长排地区花岗岩体的源区物质主要由贫黏土的砂质岩组成, 其最初是在古元古代从地幔中提取的。

(3) Y+Nb-Rb 和  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  构造环境判别图解表明, 长排地区花岗岩体是在伸展构造环境下形成的。

(4) 花岗岩体 Th 与 U 含量、 $w(\text{Th})/w(\text{U})$  值、岩石化学评价系数等产铀性特征参数表明, 长排地区两期花岗岩体具有较高的铀区域地球化学背景, 且岩体中的 U 均受到了活化改造和再分配, 具备较高的产铀潜力。

## 参考文献:

## References:

- [1] 祁家明, 罗春梧, 黄国龙, 等. 粤北花岗岩型铀矿黄铁矿地球化学特征及对成矿流体的指示作用[J]. 铀矿地质, 2015, 31(2): 73-80.  
QI Jia-ming, LUO Chun-wu, HUANG Guo-long, et al. Geochemical Character of Pyrite and Its Tracing Effects to Ore-forming Fluid for Granite Type Uranium Deposit in North Guangdong[J]. Uranium Geology, 2015, 31



- (2):73-80.
- [2] 黄国龙,吴烈勤,邓平,等.粤北花岗岩型铀矿找矿潜力及找矿方向[J].铀矿地质,2006,22(5):267-275,280.
- HUANG Guo-long, WU Lie-qin, DENG Ping, et al. Prospecting Potential and Direction for Granite Uranium Deposit in North Guangdong, China[J]. Uranium Geology, 2006, 22(5):267-275, 280.
- [3] 黄国龙,曹豪杰,徐文雄,等.诸广棉花坑铀矿床垂向分带模式及深部找矿潜力[J].铀矿地质,2015,31(3):355-362.
- HUANG Guo-long, CAO Hao-jie, XU Wen-xiong, et al. Vertical Zoning Model and Prospecting Potential in Depth of Mianhuakeng Uranium Deposit in Zhuguang [J]. Uranium Geology, 2015, 31(3):355-362.
- [4] 徐文雄,谭忠银,罗春梧,等.棉花坑铀矿床花岗岩脉岩地球化学特征及其与铀成矿的关系[J].铀矿地质,2014,30(6):345-355.
- XU Wen-xiong, TAN Zhong-yin, LUO Chun-wu, et al. Geochemical Characteristic and Ore-forming Geological Significance of Fine Crystalline Granite in Mianhuakeng Uranium Deposit, Northern Guangdong[J]. Uranium Geology, 2014, 30(6):345-355.
- [5] 祁家明,黄国龙,朱捌,等.粤北棉花坑铀矿床蚀变花岗岩副矿物特征研究[J].地质学报,2014,88(9):1691-1704.
- QI Jia-ming, HUANG Guo-long, ZHU Ba, et al. Compositions Study of Auxiliary Minerals in Altered Granitic Rocks of the Mianhuakeng Uranium Deposit in Northern Guangdong[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(9):1691-1704.
- [6] 陈振宇,黄国龙,朱捌,等.南岭地区花岗岩型铀矿的特征及其成矿专属性[J].大地构造与成矿学,2014,38(2):264-275.
- CHEN Zhen-yu, HUANG Guo-long, ZHU Ba, et al. The Characteristics and Metallogenic Specialization of Granite-hosted Uranium Deposits in the Nanling Region[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2014, 38(2):264-275.
- [7] 徐文雄,叶松鑫,诸广岩体南部长排地区铀矿找矿潜力[J].铀矿地质,2013,29(5):263-267.
- XU Wen-xiong, YE Song-xin. Analyses on Prospecting Potential of Changpai Region in North of Zhuguang Pluton[J]. Uranium Geology, 2013, 29(5):263-267.
- [8] 黄国龙,曹豪杰,凌洪飞,等.粤北油洞岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其成因研究[J].地质学报,2012,86(4):577-586.
- HUANG Guo-long, CAO Hao-jie, LING Hong-fei, et al. Zircon SHRIMP U-Pb Age, Geochemistry and Genesis of the Youdong Granite in Northern Guangdong[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(4):577-586.
- [9] 黄国龙,刘鑫扬,孙立强,等.粤北长江岩体的锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及其成因研究[J].地质学报,2014,88(5):836-849.
- HUANG Guo-long, LIU Xin-yang, SUN Li-qiang, et al. Zircon U-Pb Dating, Geochemical Characteristic and Genesis of the Changjiang Granite in Northern Guangdong[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(5):836-849.
- [10] 陈小明,王汝成,刘昌实,等.广东从化佛冈(主体)黑云母花岗岩定年和成因[J].高校地质学报,2002,8(3):293-307.
- CHEN Xiao-ming, WANG Ru-cheng, LIU Chang-shi, et al. Isotopic Dating and Genesis for Fogang Biotite Granites of Conghua Area, Guangdong Province[J]. Geological Journal of China Universities, 2002, 8(3):293-307.
- [11] 孙涛,周新民,陈培荣,等.南岭东段中生代强过铝花岗岩成因及其大地构造意义[J].中国科学:D辑,地球科学,2003,33(12):1209-1218.
- SUN Tao, ZHOU Xin-min, CHEN Pei-rong, et al. Strongly Peraluminous Granites in Mesozoic, Eastern Nanling Range of Southern China: Petrogenesis and Implications for Tectonics[J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, 2003, 33(12):1209-1218.
- [12] 凌洪飞,沈渭洲,邓平,等.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(3):413-424.
- LING Hong-fei, SHEN Wei-zhou, DENG Ping, et al. Age, Geochemistry and Petrogenesis of the Sundong Granite, Northern Guangdong Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(3):413-424.
- [13] 凌洪飞,沈渭洲,邓平,等.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(3):677-687.
- LING Hong-fei, SHEN Wei-zhou, DENG Ping, et al. Study of Geochemistry and Petrogenesis of the Maofeng Granite, Northern Guangdong Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(3):677-687.
- [14] CERNY P, GOAD B E, HAWTHORNE F C, et al. Fractionation Trends of the Nb- and Ta-bearing Oxide Minerals in the Greer Lake Pegmatitic Granite and Its Pegmatite Aureole, Southeastern Manitoba[J]. American Mineralogist, 1986, 71(3/4):501-517.
- [15] GREEN T H. Significance of Nb/Ta as an Indicator

- of Geochemical Processes in the Crust-mantle System [J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3/4): 347-359.
- [16] DOSTAL J, CHATTERJEE A K. Contrasting Behavior of Nb/Ta and Zr/Hf Ratios in a Peraluminous Granitic Pluton (Nova Scotia, Canada) [J]. *Chemical Geology*, 2000, 163(1/2/3/4): 207-218.
- [17] 高山, 骆庭川, 张本仁, 等. 中国东部地壳的结构和组成[J]. *中国科学: D 辑, 地球科学*, 1999, 29(3): 204-213.
- GAO Shan, LUO Ting-chuan, ZHANG Ben-ren, et al. Structure and Composition of the Continental Crust in East China [J]. *Science in China: Series D, Earth Sciences*, 1999, 29(3): 204-213.
- [18] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The Geochemical Evolution of the Continental Crust [J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33(2): 241-265.
- [19] WRIGHT J B. A Simple Alkalinity Ratio and Its Application to Questions of Non-orogenic Granite Genesis [J]. *Geological Magazine*, 1969, 106(4): 370-384.
- [20] PECCERILLO A, TAYLOR S R. Geochemistry of Eocene Calc-alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, 58: 63-81.
- [21] 邱检生, 胡建, 王孝磊, 等. 广东河源白石岗岩体: 一个高分异的 I 型花岗岩 [J]. *地质学报*, 2005, 79(4): 503-514.
- QIU Jian-sheng, HU Jian, WANG Xiao-lei, et al. The Baishigang Pluton in Heyuan, Guangdong Province: A Highly Fractionated I-type Granite [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(4): 503-514.
- [22] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and Isotopic Systematics of Ocean Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42: 313-345.
- [23] SYLVESTER P J. Post-collisional Strongly Peraluminous Granites [J]. *Lithos*, 1998, 45(1/2/3/4): 29-44.
- [24] 徐文雄, 叶松鑫, 尹征平, 等. 广东省仁化县长排地区铀矿普查地质报告[R]. 韶关: 核工业二九〇研究所, 2013.
- XU Wen-xiong, YE Song-xin, YIN Zheng-ping, et al. General Survey Report on Uranium Ore Deposit in Changpai Area in Renhua County, Guangdong Province [R]. Shaoguan: No. 290 Research Institute of CNNC, 2013.
- [25] ALTHERR R, HOLL A, HEGNER E, et al. High-potassium, Calc-alkaline I-type Plutonism in the European Variscides; Northern Vosges (France) and Northern Schwarzwald (Germany) [J]. *Lithos*, 2000, 50(1/2/3): 51-73.
- [26] PEARCE J A, HARRIS N B W, TINDLE A G. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks [J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956-983.
- [27] 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等. 花岗岩研究思维与方法 [M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- XIAO Qing-hui, DENG Jin-fu, MA Da-quan, et al. The Way of Investigation on Granitoids [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.
- [28] 柏道远, 周亮, 马铁球, 等. 湘东南印支期花岗岩成因及构造背景 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2007, 26(3): 197-212.
- BAI Dao-yuan, ZHOU Liang, MA Tie-qiu, et al. Genesis and Tectonic Setting of Indosinian Granites in Southeast Hunan [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2007, 26(3): 197-212.
- [29] MANIAR P D, PICCOLI P M. Tectonic Discrimination of Granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101: 635-643.
- [30] 张祖还, 章邦桐. 华南产铀花岗岩及有关铀矿床研究 [M]. 北京: 原子能出版社, 1990.
- ZHANG Zu-huan, ZHANG Bang-tong. On the Uranium-Bearing Granites and Their Related Uranium Deposits in South China [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1990.