

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

陈佑纬^{1,2}, 毕献武¹, 胡瑞忠¹, 戚华文¹

{ 1. 地球化学研究所矿床地化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;
2. 中国科学院研究院, 北京 100049 }

【摘要】 鲁溪黑云母花岗岩体和下庄二云母花岗岩体为粤北贵东复式岩体的重要组成部分。两岩体形成于相同构造背景,空间上紧密共生,时间上近乎同时生成,但鲁溪黑云母花岗岩不成矿,下庄二云母花岗岩赋存着大量铀矿床。对鲁溪黑云母岩体和下庄二云母进行系统的岩石学、矿物学、主量元素和微量元素分析,其结果表明,鲁溪黑云母花岗岩和下庄二云母花岗岩具有相似的地球化学特征,为同一母岩浆先后结晶分异的产物。岩浆不同演化阶段温度、氧逸度等物理化学条件的变化造成两岩体的铀含量和铀的赋存状态差异,致使鲁溪黑云母花岗岩的铀含量低,且铀主要以惰性铀存在,不利于成矿,而下庄二云母花岗岩的铀含量高,铀多以活性铀的形式存在,利于后期热液成矿。因此鲁溪岩体不成矿,而下庄岩体赋存着大量的铀矿床。

【关键词】 花岗岩;物理化学条件;铀含量;铀赋存形式

中图分类号:P588.12⁺1 文献标识码:A

文章编号:1001-6872(2009)03-0106-09

0 引言

花岗岩型铀矿床是指与花岗岩体有着紧密空间关系和成因联系的热液型铀矿床,它可产在岩体内部或岩体外围一定范围内^[1]。南岭地段的粤北地区是中国花岗岩型铀矿重要聚集区,这里分布着我国最大的花岗岩型铀矿田-下庄矿田。下庄铀矿田由希望、335和377等多个铀矿床组成,这些铀矿床均产在贵东复式花岗岩体东部。自20世纪50年代发

现该矿田以来,许多学者对下庄铀矿田作了大量的研究工作,其中有关花岗岩与铀成矿关系研究表明,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^[2]。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;铀矿床分布在下庄、帽峰及笋洞岩体,而与下庄岩体紧密共生的鲁溪岩体却无铀矿床分布。前人的地球化学及年代学的研究表明^[3],鲁溪岩体和下庄岩体均为印支期花岗岩体,均形成于印支碰撞后的拉张环境,且岩体内部均有幔源性脉岩出露。形成于相

收稿日期:2009-03-17; 改回日期:2009-06-11

基金项目:国家自然科学基金(编号:40673042);国家自然科学基金重点(编号:40634020)

作者简介:陈佑纬,男,26岁,博士生,地球化学专业,研究方向:矿床地球化学。E-mail:kofbird@163.com

同构造背景、相同时代和空间上密切共生的两个岩体矿化特征存在明显的差异, 导致这种差异的原因是什么? 对这一问题的回答, 对深刻揭示花岗岩型铀矿床成矿机制具有重要的意义。由于前人的工作主要集中在铀矿化方面, 对于岩体的地球化学特征方面的研究较为薄弱, 因此, 希望以产铀的下庄岩体和不产铀的鲁溪岩体作为研究对象, 通过系统研究对比鲁溪岩体和下庄岩体的岩石学、地球化学特征, 从而厘定两岩体地球化学特征的差异及其对铀成矿的制约, 为岩体的铀成矿理论提供依据。

1 地质背景及岩石学特征

贵东岩体位于广东省的北部, 是南岭地区 3 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, 区域上处于华夏古陆闽、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—奥陶系浅变质砂岩、板岩及含炭板岩, 泥盆—石炭系砂岩、碳酸盐岩。该岩体是一个由鲁溪、下庄、帽峰、笋洞、隘子、司前等岩体组成的复式岩体, 出露面积约 1 000 km²。贵东岩体大致呈东西展布, 东部为下庄岩体、笋洞岩体、帽峰岩体及鲁溪岩体, 西部为隘子岩体和司前岩体。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。以往的研究认为贵东岩体是由主体和补体组成的燕山期花岗岩^[4], 但近年来的研究表明贵

东岩体是由印支-燕山期多次岩浆侵入形成的复式岩体^[3], 其中鲁溪岩体、下庄岩体、帽峰岩体的成岩年龄分别为 239 Ma ± 5 Ma(单颗粒锆石 LA-ICP-MS)^[5], 235.8 Ma ± 7.6 Ma(单颗粒锆石 LA-CP-MS)^[6]和 219.6 Ma ± 0.9 Ma(单颗粒锆石 U-Pb 同位素稀释法)^[3], 是印支期岩体; 笋洞岩体的成岩年龄为 189.1 Ma ± 0.7 Ma(单颗粒锆石 U-Pb 同位素稀释法)^[3], 是燕山早期岩体; 司前岩体和隘子岩体的成岩年龄是 160.1 Ma ± 6.1 Ma(单颗粒锆石 LA-ICP-MS)和 151 Ma ± 11 Ma(单颗粒锆石 LA-ICP-MS)^[3], 是燕山中期岩体。

鲁溪岩体和下庄岩体均属印支期岩体, 其成岩年龄在误差范围内基本一致, 空间上密切共生, 具有相似的构造环境, 均产于印支碰撞后的后碰撞拉张环境^[3], 岩体内均有幔源矿化剂的标志——基性脉岩分布^[7]。

野外和显微镜下观察表明, 下庄岩体为中粒-中粗粒二云母花岗岩, 岩石呈灰白色, 淡灰红色, 似斑状结构。主要矿物为长石、石英、黑云母、白云母。电子探针分析表明, 钾长石均为透长石, 斜长石为钠长石, An=1~4, 钾长石为条纹长石和微斜长石, 板状他形晶体, 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%。黑云母多呈黑褐色, 片状, 常在其内部及边缘伴生小颗粒石英, 含量约 8%。白云母多为原生白云母, 呈片状, 含量约 5%。副矿物有锆石、石榴子石、榍石、独

居石、磁铁矿, 钛铁矿等。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、黑云母。电子探针分析表明, 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%, 斜长石多为聚片双晶发育, 见环带构造, 含量约 25%; 石英为大颗粒自形晶, 多见波状消光, 含量为 30%; 黑云母多为片状, 大颗粒自形晶, 晶面扭曲, 常交代钾长石, 含量约 15%; 副矿物为角闪石, 磁铁矿、原生褐帘石、电气石等。两岩体发育轻微的绿泥石化, 绢云母化。

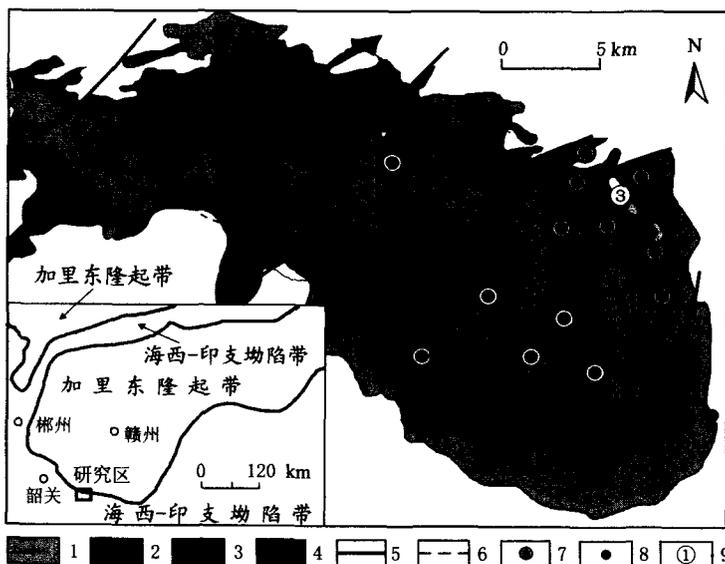


图 1 贵东复式岩体地质简图

1. 中粒二云母花岗岩; 2. 粗粒斑状黑云母花岗岩; 3. 细粒二云母花岗岩; 4. 中粗粒黑云母花岗岩; 5. 断裂; 6. 基性脉岩; 7. 铀矿床; 8. 铀矿点; 9. 岩体编号; ①. 鲁溪岩体; ②. 下庄岩体; ③. 帽峰岩体; ④. 笋洞岩体; ⑤. 司前岩体; ⑥. 隘子岩体

Fig. 1 Simplified geological map showing the Guidong complex

2 样品及分析方法

用于主量元素及微量元素分析的样品采自下庄岩体和鲁溪岩体的新鲜花岗岩。主量元素含量采用 X 射线荧光光谱仪

(XRF)分析,误差小于3%。其中FeO,Fe₂O₃含量采用常规湿化学方法-重铬酸钾容量法分析,误差小于1%,微量元素含量采用等离子体质谱仪(ICP-MS)分析,精度高于5%。矿物电子探针分析采用EMPA-1600型电子探针完成的,其检出限为0.002%,工作电压为25 kV,电流为10.0 nA,束斑为10.0 μm。上述分析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。

3 岩体的岩石化学特征

3.1 主量元素特征

下庄二云母花岗岩和鲁溪黑云母花岗岩的主量元素分析结果(表1)可见,两岩体的岩石化学成分主要表现为以下特征:

(1)下庄二云母花岗岩具有相对较高的SiO₂质量分数(70.67%~76.7%)和K₂O质量分数(4.59%~6.32%),全碱含量ALK(Na₂O+K₂O)=7.61%~9.38%,高于正常的世界花岗岩(Na₂O+K₂O=7.75%)和我国花岗岩类岩石(Na₂O+K₂O=7.82%)^[8],下庄花岗岩的K₂O/Na₂O>1.5;鲁溪黑云母花岗岩具有相对较低的SiO₂质量分数(64%~68.8%)和K₂O质量分数(2.51%~4.66%),全碱含量ALK(Na₂O+K₂O)=6.0%~7.85%,低于正常世界花岗岩和我国花岗岩值,鲁溪花岗岩的K₂O/Na₂O变化范围为0.73~1.46,平均1.12。因此相对于鲁溪黑云母花岗岩,下庄二云母花岗岩具有富硅、富碱和富钾的特点。在SiO₂-K₂O判别图上(图2),下庄二云母花岗岩样品点落在钾玄岩系列与高钾钙碱性系列之间,鲁溪黑云母花岗

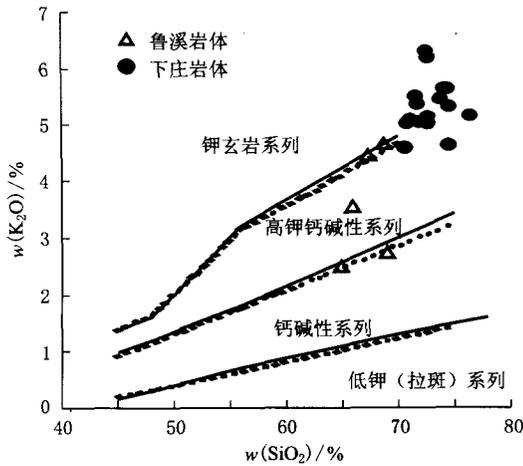


图2 鲁溪和下庄岩体的w(SiO₂)-w(K₂O)判别图解(底图据Collins W J, et al, 1982^[14])

Fig. 2 Discrimination diagram of w(SiO₂)-w(K₂O) for Luxi and Xiazhuang granites^[14]

表1 鲁溪和下庄岩体主量元素成分分析结果.w(B)/%

样品号	LX-1	LX-2	LX-3	LX-4	LX-5	XZ-02	XZ-03	XZ-04	XZ-05	XZ-07	XZ-11	XZ-13	XZ-14	XZ-15	XZ-16	XZ-17	XZ-18	XZ-19	XZ-20	XZ-21	XZ-22
SiO ₂	68.84	65.00	66.00	67.37	68.80	71.56	71.65	70.67	74.10	76.39	74.54	71.07	70.79	74.31	73.82	74.50	72.56	72.72	72.58	71.80	72.64
TiO ₂	0.52	0.74	0.64	0.58	0.44	0.21	0.25	0.32	0.14	0.10	0.12	0.30	0.30	0.11	0.14	0.17	0.21	0.24	0.22	0.18	0.15
Al ₂ O ₃	12.96	15.36	15.16	15.08	14.26	13.60	13.72	13.86	14.24	12.60	12.91	14.32	14.71	13.67	14.44	13.47	14.49	14.34	13.68	14.26	13.86
Fe ₂ O ₃	4.53	4.76	4.00	2.91	2.36	2.00	2.16	2.39	2.22	2.21	1.19	0.21	0.23	0.22	0.44	0.30	0.33	0.65	0.56	0.62	0.61
FeO	0.08	0.09	0.08	0.11	0.11	0.05	0.05	0.05	0.04	0.03	0.04	0.06	0.07	0.04	0.04	0.04	0.04	0.07	0.08	0.08	0.06
MnO	1.27	2.09	1.88	1.01	1.02	0.43	0.55	0.80	0.32	0.18	0.25	0.66	0.80	0.27	0.29	0.38	0.42	0.60	0.40	0.62	0.50
MgO	2.57	3.94	3.41	1.97	2.03	1.21	1.31	1.75	0.77	0.51	1.12	1.42	1.53	0.92	0.59	0.78	1.10	1.20	1.23	1.48	1.16
CaO	3.23	3.42	2.89	3.36	3.19	3.04	3.44	3.14	2.93	2.94	3.11	3.39	3.73	3.53	3.30	2.85	2.70	3.09	3.09	3.49	2.36
Na ₂ O	2.77	2.51	3.54	4.45	4.66	5.51	5.37	4.59	5.66	5.16	5.32	5.10	5.04	5.65	4.64	4.64	6.32	5.04	5.14	5.05	6.20
K ₂ O	0.22	0.31	0.28	0.21	0.21	0.09	0.11	0.13	0.13	0.04	0.05	0.23	0.26	0.07	0.11	0.09	0.10	0.19	0.10	0.10	0.08
P ₂ O ₅	1.52	0.82	1.30	1.08	1.20	1.08	1.20	1.30	1.04	0.57	1.35	1.47	1.03	0.11	0.88	1.32	0.58	0.00	0.42	0.81	1.35
LOI	99.20	99.26	99.40	98.99	100.03	99.61	101.33	100.23	100.68	100.20	100.89	100.84	101.49	100.77	100.73	99.10	99.10	99.10	99.10	99.79	100.22
Total	0.86	0.74	1.22	1.32	1.46	1.81	1.56	1.46	1.93	1.76	1.65	1.64	1.49	1.51	1.55	1.41	2.22	1.87	1.66	1.63	2.63
K ₂ O/Na ₂ O	1.00	0.99	1.03	1.08	1.02	1.03	0.99	1.04	1.15	1.11	0.98	1.08	1.06	0.98	1.13	1.14	1.07	1.19	1.06	1.08	1.09
ACNK	1.56	1.84	1.77	1.46	1.39	1.24	1.20	1.37	1.30	1.21	1.17	1.35	1.33	1.12	1.23	1.29	1.26	1.45	1.29	1.35	1.31
A/NK	5.99	5.93	6.43	7.81	7.85	8.55	8.81	7.73	8.59	8.10	8.55	8.21	8.43	9.38	8.99	7.94	9.17	7.74	8.23	8.14	8.56
Na ₂ O+K ₂ O	0.80	1.15	1.18	0.59	0.64	0.40	0.38	0.56	0.26	0.17	0.35	0.46	0.45	0.25	0.17	0.24	0.39	0.44	0.40	0.48	0.49
CaO/Na ₂ O	7.03	7.88	6.80	5.66	5.05	2.88	3.21	4.13	2.44	2.00	2.14	3.46	4.12	2.36	2.62	2.64	2.70	2.85	2.80	3.14	2.51
TFMM	786.75	805.52	818.04	786.64	761.91	786.65	774.56	753.17	722.64	770.44	803.14	716.8	759.99	768.15	769.9	748.42					
T/C																					

注:样品 LX-1~LX-5 取自鲁溪岩体,其余均取自下庄岩体;LX-4、XZ-19、XZ-20 引自吴烈勋等,2005^[11]; LX-5 引自金景福等,1990^[12]; XZ-21、XZ-22 引自凌洪飞,2005^[6]; ACNK = Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O),分子比 A/NK = Al₂O₃/(Na₂O+K₂O),分子比,TFMM = (TiO₂+FeO+MgO+MnO),LOI 为烧失量,温度由铅石饱和温度计获得^[13]

岩样品点则落在高钾钙碱性系列之中。

(2) 除具有相当的 Al_2O_3 和 Na_2O 含量外, 下庄二云母花岗岩具有相对较低的 TiO_2 , FeO , MnO , CaO , P_2O_5 含量。在 $A/NK-ACNK$ 关系图上(图 3), 下庄二云母花岗岩的铝饱和指数 $ACNK > 1$, 部分样品的 $ACNK > 1.1$, 属于弱过铝质-强过铝质岩石。鲁溪黑云母花岗岩所有样品 $1 < ACNK < 1.1$ 属于弱过铝质岩石。

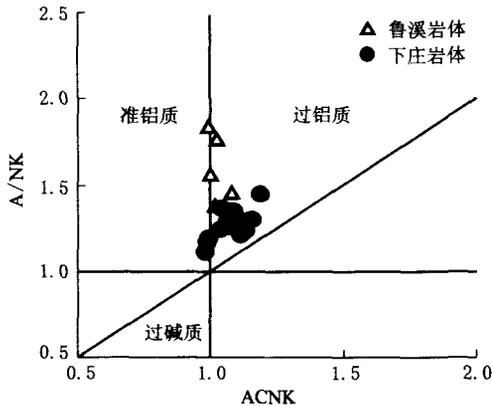


图 3 鲁溪岩体、下庄岩体花岗岩的 $ACNK-A/NK$ 图解(底图据 Maniar P D, et al, 1989^[15])
Fig. 3 $ACNK-A/NK$ diagram for Luxi and Xiaozhuang granites

(3) 在 ACF 图解上(图 4), 所有岩体均落入 S 型花岗岩类。下庄岩体含有原生白云母, $CIPW$ 标准矿物中含有大量的刚玉(含量 $> 1\%$) 而不含透辉石, 属于 S 型花岗岩^[9], 鲁溪岩体不含 S 型花岗岩典型的过铝质矿物如白云母、石榴子石等, 但其 $CIPW$ 标准矿物中不含透辉石, 含少量刚玉, 因此也具有 S 型花岗岩的特征^[9]。研究表明 S 型花岗岩岩石化学特征上表现为 K_2O 与 SiO_2 呈非线性相关关系^[10], 两岩体的 K_2O 与 SiO_2 均不具明显的相关性, 进一步说明两岩体具有 S 型花岗岩的特征。

(4) 在主要氧化物的 Harker 图解上(图 5), 两岩体的 SiO_2 与 TiO_2 , FeO' , MgO , CaO , P_2O_5 ,

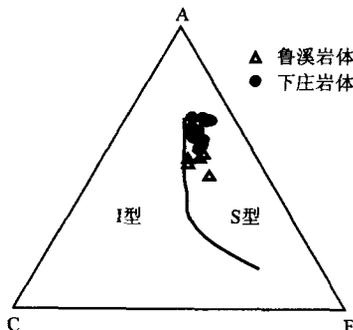


图 4 鲁溪岩体、下庄岩体花岗岩的 ACF 图解(底图据 Nakada S, et al, 1979^[16])
Fig. 4 ACF diagram for Luxi and Xiaozhuang granites

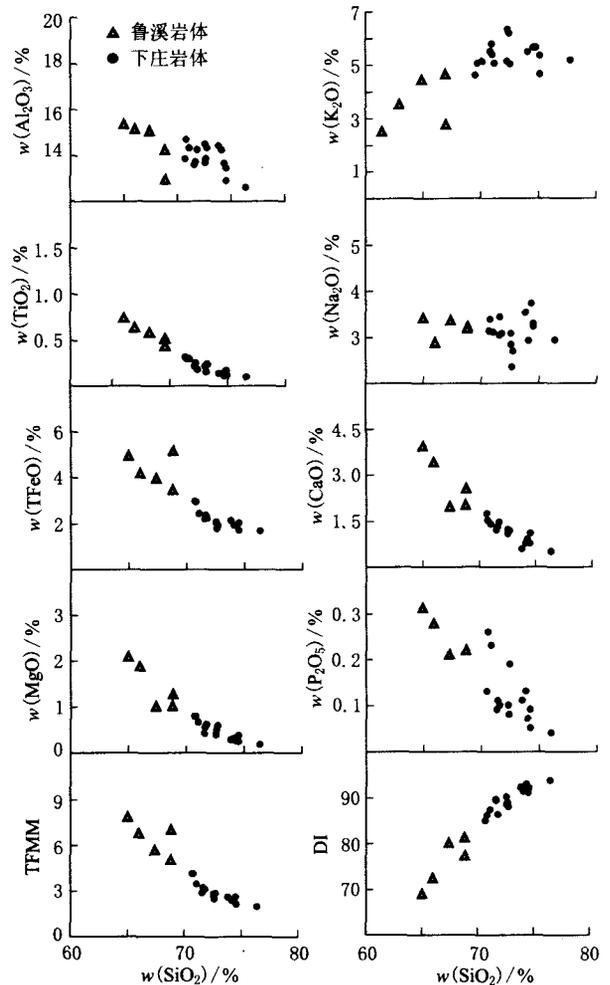


图 5 鲁溪岩体与下庄岩体花岗岩的 Hacker 图解
Fig. 5 Hacker diagram for Luxi and Xiaozhuang granites

Al_2O_3 , $TFMM(TiO_2 + FeO' + MgO + MnO)$ 等都具有很好的负相关趋势, 说明两岩体的富钙斜长石、辉石、磷灰石及钛铁矿等矿物的分离结晶作用明显。

3.2 微量元素特征

下庄二云母花岗岩和鲁溪黑云母花岗岩的微量元素分析结果见表 2, 在原始地幔标准化图(图 6)上可以看出, 两岩体花岗岩的微量元素变化特征类似。相对于原始地幔, 两花岗岩均富集大离子元素 Rb , Pb , La , Nd , Sm ; 亏损 Ba , Nb , Sr , P , Ti ; 其中 Ba , Sr , Ti 的亏损可能反映了成岩过程是斜长石、磷灰石和钛铁矿等分离结晶^[17]。 Nb , Ta 相对于 Th , Ce 显示较为明显的亏损, 说明两岩体源岩可能为陆壳物质^[18]。

Nb/Ta 比常用来作为壳-幔作用的重要指示剂, 在岩浆起源中得到了广泛的运用^[18]。下庄岩体的 Nb/Ta 比值(4.78~9.08, 平均 6.54) 较低, 鲁溪岩体的 Nb/Ta 比值相对较高(11~13.65, 平均 12.66), 但都明显低于中国东部上地壳平均值(16.2)^[20], 在 $Nb/Ta-Nb$ 图解上(图 7), 两岩体的

表 2 鲁溪和下庄岩体的微量元素和稀土元素分析结果. $w(B)/10^{-6}$
Table 2 Analysis of trace elements and rare earth elements for Luxi and Xiazhuang granites (in $\times 10^{-6}$)

样品号	LX-1	LX-2	LX-3	LX-4	LX-5	XZ-02	XZ-03	XZ-04	XZ-05	XZ-07	XZ-11	XZ-13	XZ-14	XZ-16	XZ-15	XZ-17	XZ-18	XZ-19	XZ-20	XZ-21	XZ-22
Rb	205.05	204.32	200.46			461.56	421.00	429.96	420.97	382.27	342.98	363.34	523.30	377.93	398.27	339.79	410.96			385.40	494.10
Sr	163.80	269.52	297.69			81.30	98.04	124.41	44.62	29.30	47.20	154.97	48.80	53.98	48.29	104.70				101.90	73.32
Ba	340.59	293.85	623.57			378.17	316.75	359.41	186.20	67.49	101.65	428.08	594.14	147.27	177.92	189.56	485.96			367.60	226.40
Th	35.10	28.74	22.59			29.38	32.83	37.86	31.39	32.70	26.10	26.28	38.66	29.57	27.68	26.92	27.38			35.24	25.51
U	6.17	5.33	4.47			23.36	27.29	15.29	19.48	10.67	21.60	26.08	8.29	49.02	19.22	9.41	14.93			21.07	26.92
Nb	16.71	18.47	14.63			19.72	17.30	19.33	22.59	18.22	14.01	26.16	40.01	15.96	25.26	15.59	18.23			19.57	30.77
Ta	1.52	1.35	1.10			2.59	2.73	2.75	4.21	2.19	1.95	4.18	4.40	3.34	4.26	2.81	2.14			4.03	6.40
Zr	175.33	241.44	257.45			119.81	129.89	164.18	123.24	95.15	76.38	129.65	196.62	73.04	106.21	96.52	127.01			128.60	95.87
Hf	4.51	5.81	6.16			3.56	3.81	4.63	3.66	3.39	2.58	3.32	4.83	2.59	3.15	2.96	3.46			3.65	3.03
Co	24.73	13.80	11.77			2.88	3.70	4.90	1.59	1.19	1.51	3.97	5.01	1.69	1.81	2.43	2.91				
Ni	26.49	13.58	12.99			3.77	7.96	5.65	1.89	5.93	2.52	9.57	3.76	2.86	2.78	3.73	3.95				
Cr	14.64	21.49	19.88			8.12	15.45	10.58	3.97	14.48	7.82	22.60	8.19	6.88	6.84	7.22	8.29				
V	58.22	90.07	78.72			16.39	23.70	31.06	8.24	2.87	6.17	32.69	34.30	9.73	8.52	12.67	17.36				
Sc	8.56	12.03	11.45			5.12	5.99	7.40	4.18	6.36	5.08	7.18	8.25	2.85	5.05	3.93	4.64				
La	73.50	101.25	88.40			108.92	113.07	341.46	91.77	50.29	21.44	65.55	148.19	29.91	94.37	61.34	91.28				
Ce	8.24	14.02	6.49			21.44	22.38	83.89	21.20	15.04	11.42	19.29	43.71	11.52	21.58	24.43	19.13				
Ga	20.55	23.11	20.83			18.19	17.92	19.59	18.77	16.05	14.60	22.21	18.63	13.89	19.65	15.94	16.76			18.90	19.06
In	0.08	0.07	0.07			0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.05	0.08	0.12	0.06	0.07	0.05	0.07				
Cu	297.52	21.29	16.10			8.75	8.47	14.15	8.18	6.37	8.25	11.13	11.54	6.40	8.03	11.56	12.89				
Pb	34.72	31.04	39.33			63.55	62.65	56.51	52.96	73.92	68.85	45.24	52.11	80.07	58.40	61.49	69.14				
Zn	87.63	101.12	91.77			59.50	57.19	72.01	58.43	40.65	38.52	76.63	89.69	48.03	70.63	79.93	50.35				
Ag	0.98	0.28	0.28			0.34	0.31	0.31	0.40	0.29	0.24	0.27	0.32	0.27	0.42	0.25	0.33				
As	15.22	14.99	15.15			13.07	12.85	13.50	13.14	13.36	12.81	13.11	15.82	12.99	14.35	12.96	12.48				
Sb	1.77	3.39	1.83			2.81	4.27	13.42	6.57	4.03	1.89	13.25	4.80	2.58	3.90	2.81	1.69				
W	1.00	0.85	1.21			1.80	2.58	3.95	9.98	0.83	1.36	7.87	5.92	1.82	4.98	3.56	2.11				
Sn	208.45	194.57	199.15			147.38	158.07	158.18	162.49	179.64	184.61	174.65	303.89	206.86	175.59	201.44	198.46				
Bi	1.16	0.42	0.35			0.45	0.51	0.81	2.41	0.35	0.35	1.17	0.32	0.33	1.20	4.75	0.56				
Mo	2.34	0.95	0.74			0.58	0.76	0.90	0.97	0.84	0.53	0.90	0.68	0.71	1.15	0.63	2.75				
Cd	0.74	0.37	0.42			0.28	0.35	0.38	0.36	0.37	0.34	0.32	0.68	0.47	0.43	0.43	0.38				
Ca	60.83	70.83	57.77			34.06	39.00	48.83	31.90	29.22	23.55	43.66	55.98	24.10	27.56	27.99	30.88			36.90	54.03
La	115.38	135.19	108.86			67.72	78.25	97.38	66.32	62.38	49.37	83.05	106.38	50.83	56.76	55.73	59.34			85.20	101.80
Pr	13.07	14.87	12.16			19.28	14.80	9.03	11.15	7.52	7.35	5.84	9.24	11.78	5.98	6.43	6.65			10.30	10.86
Nd	45.47	52.21	43.17			56.56	53.24	27.17	30.98	38.01	26.88	31.41	39.72	21.03	22.74	21.78	23.21			38.30	38.42
Nd	8.18	8.80	7.07			9.95	5.67	6.45	7.03	5.98	6.10	4.98	5.12	6.92	5.25	5.11	4.66			9.99	7.50
Sm	1.10	1.43	1.24			1.26	0.64	0.65	0.75	0.42	0.34	0.75	0.79	0.36	0.38	0.46	0.65			0.49	0.65
Eu	6.51	6.50	5.49			6.39	4.93	5.32	6.20	5.37	6.42	5.15	4.13	5.41	5.71	4.81	4.44			8.04	6.35
Gd	1.02	0.97	0.80			1.22	0.86	0.95	0.98	0.91	1.27	1.05	0.59	0.93	1.17	0.84	0.73			1.93	0.88
Tb	5.04	4.91	4.14			7.44	3.94	5.26	6.10	5.93	7.08	3.05	4.55	8.21	5.21	5.26	4.22			12.30	5.79
Dy	2.29	2.45	2.20			1.49	1.09	1.22	1.20	0.95	1.59	0.53	0.77	1.83	0.95	1.12	0.86			2.57	1.17
Ho	0.91	0.92	0.79			4.12	3.21	3.57	3.41	2.45	5.26	4.70	1.50	2.08	5.45	2.41	3.21			8.10	3.35
Er	0.29	0.34	0.29			0.78	0.52	0.48	0.34	0.71	0.73	0.21	0.27	0.81	0.36	0.49	0.35			1.14	0.50
Tm	1.88	2.22	1.88			4.91	3.45	3.66	3.39	2.26	4.65	4.82	1.51	1.66	5.41	2.57	3.44			7.74	3.17
Yb	0.30	0.33	0.28			0.71	0.48	0.53	0.48	0.34	0.67	0.71	0.21	0.28	0.79	0.37	0.54			1.20	0.46
Lu	29.37	29.51	24.88			35.72	39.99	37.78	31.31	60.96	55.35	17.96	25.48	62.57	31.01	37.99	28.69			1.20	0.46
Y	262.27	301.97	246.16			42.50	35.72	39.99	37.78	31.31	60.96	55.35	17.96	25.48	62.57	31.01	37.99			224.20	234.93
ΣREE	262.27	301.97	246.16			42.50	35.72	39.99	37.78	31.31	60.96	55.35	17.96	25.48	62.57	31.01	37.99			224.20	234.93
LREE	244.02	283.33	230.27			162.91	186.23	225.20	156.92	160.09	130.15	184.95	237.52	136.94	136.59	136.35	140.58			181.18	213.26
HREE	18.24	18.64	15.89			266.65	143.10	164.36	203.14	139.02	104.33	173.23	221.58	107.56	119.07	117.04	125.29			43.02	21.67
L/H	13.38	15.20	14.49			27.06	19.81	21.87	22.06	17.90	29.40	25.83	11.72	15.95	29.38	17.52	19.31			15.29	43.02
(La/Yb) ^N	21.88	21.52	20.74			9.25	6.67	7.21	9.74	9.52	4.24	3.30	19.52	22.82	3.01	7.25	5.49			9.84	4.21
(La/Sm) ^N	6.51	7.04	7.28			5.26	5.29	6.08	4.66	4.19	4.14	7.46	7.07	4.01	4.72	5.26	5.94			3.22	11.52
(Gd/Yb) ^N	2.81	2.37	2.37			0.37	0.34	0.35	0.22	0.12	0.20	0.50	0.39	0.20	0.23	0.31	0.46			1.62	1.73
δEu	0.46	0.58	0.61			0.21	0.21	0.18	0.22	0.24	0.25	0.16	0.17	0.25	0.22	0.21	0.20			0.26	0.20
Sm/Nd	0.18	0.17	0.16			0.19	0.19	0.16	0.18	0.18	0.18	0.16	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17			0.19	0.23
Zr/Hf	38.84	41.56	41.77			33.67	34.13	35.49	33.67	28.09	29.58	39.04	40.70	28.24	33.72	32.94	36.76			35.19	31.60
Nb/Ta	11.01	13.66	13.31			7.60	6.33	7.04	5.36	8.33	7.17	6.25	9.08	4.78	5.92	5.54	8.52			4.86	4.81
Rb/Sr	1.25	0.76	0.67			5.54	4.29	3.46													

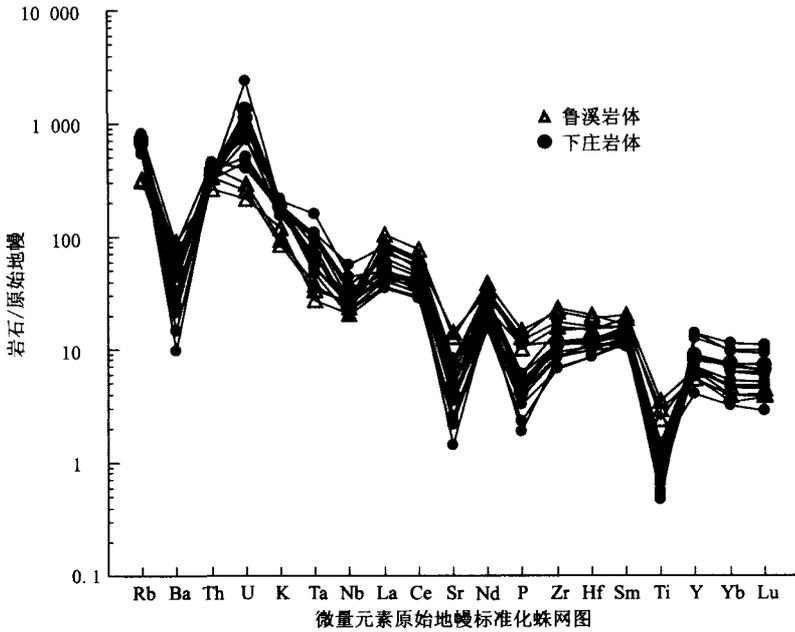


图 6 鲁溪下庄岩体的原始地幔蛛网(标准化所用 MORB 值据 Rollison H R, et al, 2000^[18])

Fig. 6 Spider diagram for Luxi and Xiazhuang granites

投影点均位于上地壳平均值的右下方, 也同样说明两岩体源区为地壳物质。

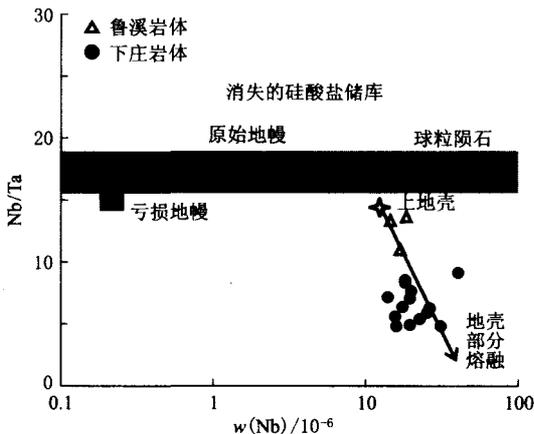


图 7 鲁溪和下庄岩体的 Nb-Nb/Ta 图解(底图据 Taylor S R, 1985^[21])

Fig. 7 Nb-Nb/Ta diagram for Luxi and Xiazhuang granites

3.3 稀土元素特征

下庄二云母花岗岩和鲁溪黑云母花岗岩的稀土元素分析结果见表 2, 主要表现为以下特征^[21]:

(1) 下庄二云母花岗岩的稀土总量相对较低, $\Sigma REE = 130.15 \times 10^{-6} \sim 237.52 \times 10^{-6}$, 鲁溪黑云母花岗岩的稀土总量相对较高, $\Sigma REE = 262.27 \times 10^{-6} \sim 335.84 \times 10^{-6}$ 。

(2) 两岩体花岗岩均富集轻稀土, 在球粒陨石标准化的稀土元素模式图(图 8)上表现为右倾型。下庄二云母花岗岩的轻重稀比值 $LREE/HREE = 3.66 \sim 14.78$, 鲁溪黑云母花岗岩的轻重稀土比值

$LREE/HREE = 9.85 \sim 20.45$, 鲁溪黑云母花岗岩相对更富集轻稀土。两岩体的轻重稀土分异均明显, 下庄二云母花岗岩的 $(La/Yb)_N = 3 \sim 22.82$, 平均为 8.83; 鲁溪黑云母花岗岩的 $(La/Yb)_N = 9.24 \sim 36.32$, 平均为 21.94, 鲁溪黑云母花岗岩相对具有更明显的轻重稀土分异。

(3) 两岩体的轻稀土分异相对明显, 下庄二云母花岗岩的 $(La/Sm)_N = 3.23 \sim 7.46$, 鲁溪黑云母花岗岩的 $(La/Sm)_N = 5.9 \sim 7.28$ 。两岩体的重稀土分异相对不明显, 下庄岩体的 $(Gd/Yb)_N = 0.84 \sim 2.64$, 鲁溪岩体岩体的 $(La/Sm)_N = 1.06 \sim 3.3$ 。

(4) 两岩体花岗岩均具有负 Eu 异常的特征, 下庄二云母花岗岩的 $\delta Eu = 0.17 \sim 0.5$, 鲁溪黑云母花岗岩的 $\delta Eu = 0.46 \sim 0.61$, 可以看出下庄岩体具有更强烈更明显的负 Eu 异常, 说明该岩体经历了高度演化, 斜长石分离对岩浆分异演化起了重要的作用。

(5) 在 $(La/Yb)_N \sim \delta(Eu)$ 图解中(图 9), 两岩体花岗岩的投影点均落在壳源型区。

4 讨论

4.1 岩石成因

已有的研究表明, 下庄岩体为古元古代变质沉积物低程度部分熔融而来^[11]。鲁溪岩体花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 239 Ma, 下庄花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 235 Ma, 两者年龄在误差范围内重合, 都含有 410 Ma~500 Ma 的残留锆石^[3], 同时两岩体密切共生, 具有相同的构造背景, 结合上述岩石学、岩石化学和微量元素地球化学特征, 可以认为鲁溪岩体和下庄岩体具有相同的岩浆源区岩。其证据如下:

1) 岩石矿物学证据: 从鲁溪岩体到下庄岩体, 花岗岩的岩石颗粒从粗变细, 由巨粒变成中粒; 暗色矿物减少或消失, 浅色和过铝质矿物增多, 由黑云母花岗岩变为二云母花岗岩。斜长石由 An 值较大的中长石演化为 An 值较小的钠长石, 钾长石由条纹长石到微斜长石, 角闪石、褐帘石由少到无, 黑云母由多变少; 下庄岩体出现过铝质矿物(原生白云母)等。这些变化特征表明, 鲁溪岩体与下庄岩体在岩石学上具有一定的顺承演化关系; 2) 主量元素的证据: 两

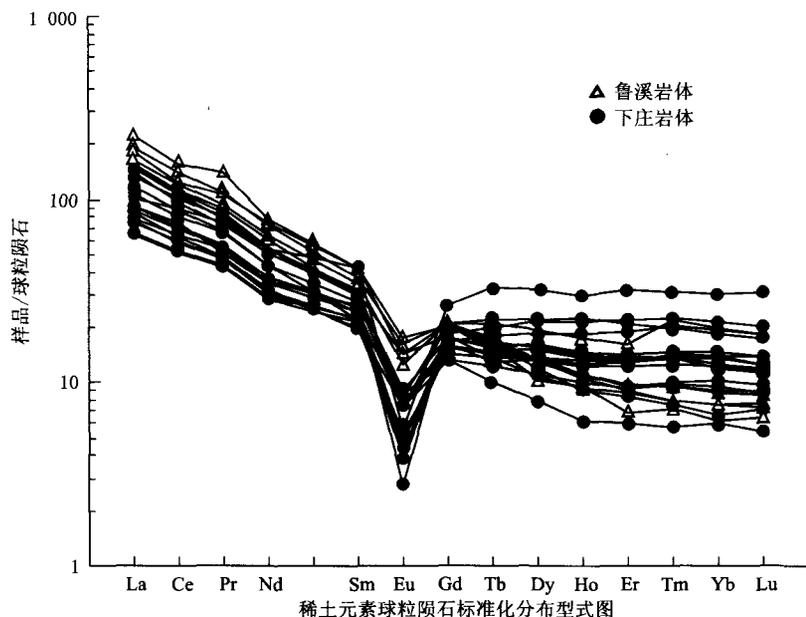


图8 鲁溪和下庄岩体和稀土元素球粒陨石标准化曲线(标准化所用球粒陨石数根据 Dostal J, et al, 1995^[22])

Fig. 8 Chondrite normalized diagram for Luxi and Xiaozhuang granites

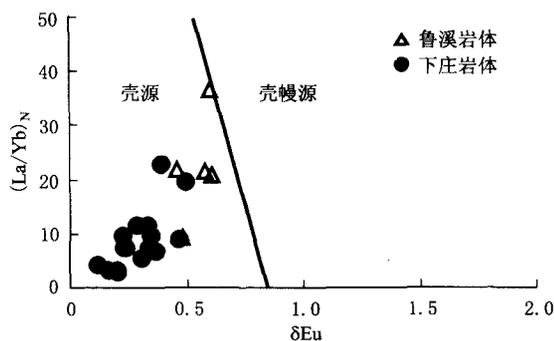


图9 鲁溪和下庄岩体 $(La/Yb)_N-\delta(Eu)$ 图解

Fig. 9 $(La/Yb)_N-\delta(Eu)$ diagram for Luxi and Xiaozhuang granites

花岗岩在主量元素含量上变化很有规律,与鲁溪黑云母花岗岩相比,下庄二云母花岗岩贫镁贫钙,富硅富碱,这同 Scaillet 在类似岩石的实验所证实的过铝质岩浆经过分离结晶作用衍生的残余岩浆的特征一致。在哈克图解上,下庄二云母花岗岩与鲁溪黑云母花岗岩具有相似的相关性,下庄二云母花岗岩的投影点位于鲁溪黑云母花岗岩的延长线上,表明二者之间具有演化关系,即下庄岩体是由鲁溪岩体残余岩浆结晶分异演化而来;3)微量元素和稀土元素的证据:两花岗岩的微量元素蛛网图十分相似,但下庄二云母花岗岩相对于鲁溪黑云母花岗岩具有更大的变化幅度,即富的更富,贫的更贫。鲁溪黑云母花岗岩的 Zr/Hf 为 39~42,下庄二云母花岗岩的 Zr/Hf 值相对较低为 33~40。 Zr/Hf 值的降低,可能是由于岩浆中锆石的分离结晶作用使分异岩浆中的 Zr 含量减少而造成的^[22]。相对于鲁溪黑云母花

岗岩,下庄二云母花岗岩的 Ba, Sr, Zr 降低和 $Rb, Rb/Sr$ 的升高暗示了下庄二云母花岗岩的结晶分异程度的更高^[24]。

两花岗岩的稀土配分模式也十分相似,均为右倾的轻稀土富集型,显示两岩体为相似母岩浆分异演化的产物。与鲁溪黑云母花岗岩相比,下庄二云母花岗岩的稀土总量和轻稀土明显减少,重稀土元素总量明显升高, Eu 由中等负异常变为强烈负异常。这与南岭地区很多岩浆演化晚期形成的复式岩体的演变特征是一致的^[25]。实验证明岩浆晚期富 F 流体作用促使残余熔体中 HREE 富集^[26],下庄岩体中的重稀土富集可能是由于流体分异的氟化物的形成共同造成的。另外,下庄花岗岩中 LREE 的降低可能是鲁溪岩体中褐帘石分离结晶作用形成。

4.2 花岗岩铀含量特征、赋存形式及其形成机制

由表 1 可见,下庄二云母花岗岩富集 U ,其质量分数为 $8.29 \times 10^{-6} \sim 49.01 \times 10^{-6}$,平均为 20.9×10^{-6} ,远高于正常花岗岩的平均值(3.5×10^{-6})和中国东部上地壳的平均值(1.5×10^{-6}),鲁溪黑云母花岗岩的铀含量相对较低,为 $4.46 \times 10^{-6} \sim 6.17 \times 10^{-6}$,平均为 5.32×10^{-6} ,略高于正常花岗岩的平均值。

两岩体花岗岩均含有黑云母。根据黑云母的电子探针分析结果和 Rieder 的黑云母命名方法^[27],获得两岩体黑云母均属铁黑云母,其中下庄二云母花岗岩中黑云母 $X_{Fe} (= Fe^{2+}/Fe^{2+} + Mg) = 0.5 \sim 0.51$,鲁溪黑云母花岗岩的 $X_{Fe} = 0.59 \sim 0.62$,说明两岩体花岗岩未遭受后期流体的改造^[28],且下庄岩体的分异演化程度较鲁溪岩体的高。在黑云母 $Fe^{3+}-Fe^{2+}-Mg$ 图解中(图 10),两花岗岩的黑云母均位于 $Fe_2O_3-Fe_3O_4$ (HM) 出溶线和 $Ni-NiO$ (NNO) 出溶线之间,但鲁溪花岗岩的黑云母更靠近 $Ni-NiO$ 出溶线,说明其有更高的氧逸度,结合两花岗岩的锆石饱和温度,可知,下庄二云母花岗岩的结晶温度和氧逸度均低于鲁溪黑云母花岗岩。

铀是亲氧元素,在岩浆作用早期缺氧的封闭条件下,由于四价铀的离子电位比 Si, Al 等元素的低,争夺氧的能力弱,所以很难与氧结合形成铀矿物,因

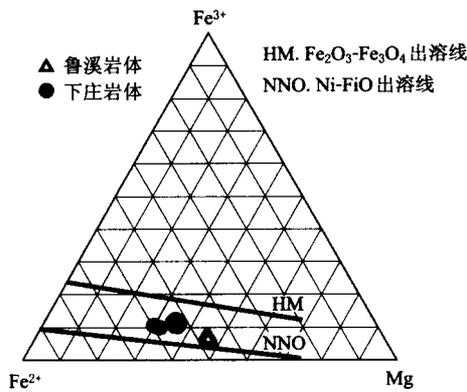


图 10 鲁溪和下庄花岗岩黑云母 Fe^{3+} - Fe^{2+} -Mg 图解(底图据 Wones D R *et al.*, 1965^[23])

Fig. 10 Fe^{3+} - Fe^{2+} -Mg diagram for Luxi and Xiaozhuang granites^[23]

此,随着岩浆的分异演化,铀不断地富集。而随着岩浆演化至晚期阶段(鲁溪花岗岩阶段),一方面,温度、压力及氧逸度的降低,使残余岩浆中的 O/Si 比值降低,游离 O^{2-} 增多;另一方面,残余岩浆中挥发组分、稀有和稀土元素也相对富集,一些半径和电负性与四价铀相近的离子也相对富集(如 Th^{4+} , Ce^{4+} , Y^{4+} 等)。而四价铀离子可以与这些离子进行类质同象置换,与游离 O^{2-} 结合形成一系列含铀的富 REE 副矿物,如独居石、钍石、锆石、褐帘石等,这些副矿物增多导致铀分散,不利于铀集中进入热液成矿。而在岩浆作用更晚期(下庄花岗岩阶段),由于先前析出大量的稀土元素,导致残余岩浆中 REE 元素减少,不断富集的铀满足富含 REE 的副矿物的需

参考文献

- [1] 杜乐天. 花岗岩型铀矿文集[M]. 北京:原子能出版社,1982.
- [2] 张展适,华仁民,刘晓东. 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.
- [3] 徐夕生,邓平,YO'Reilly S,等. 华南贵东杂岩体单颗粒锆石激光探针 ICPMS U-Pb 定年及其成岩意义[J]. 科学通报,2003,48(012):1328-1334.
- [4] 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.
- [5] 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(003):413-424.
- [6] 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(003):677-687.
- [7] 胡瑞忠. XW 铀矿床成矿机理[J]. 成都地质学院学报,1989,16(003):1-9.
- [8] 邱家骧. 岩浆岩石学[M]. 北京:地质出版社,1985.
- [9] Chappell B W. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. Lithos, 1999, 46(3):535-551.
- [10] Chappell B W, White A J R. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. Transactions of the Royal Society of Edinburgh Earth sciences, 1992, 83:1-26.
- [11] 吴烈勤,黄国龙,沈渭洲,等. 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(002):65-71.
- [12] 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(003):1-9.
- [13] Watson E B, Harrison T M. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1983, 64(2):295-304.
- [14] Collins W J, Beams S D, White A J R, *et al.* Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1982, 80(2):189-200.
- [15] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Bulletin of the Geological Society of America, 1989, 101(5):635-643.
- [16] Nakada S, Takahashi M. Regional variation in chemistry of the Miocene intermediate to felsic magmas in the Outer Zone and the Setouchi province of southwest Japan[J]. Journal of the Geological Society of Japan, 1979, 85:571-582.
- [17] Dupont A, Vander Auwera J, Pin C, *et al.* Trace element and isotope (Sr, Nd) geochemistry of porphyry- and skarn-mineralising Late Cre-

求之后,岩浆中还有大量游离铀剩余。剩余的铀与游离 O^{2-} 结合,形成活性铀形式存在的晶质铀矿析出,利于后期热液成矿^[29]。

因此,鲁溪黑云母花岗岩具有较低的铀含量,铀大部分以类质同象替换存在于副矿物之中,不利于后期热液成矿。下庄二云母花岗岩具有高的铀含量,铀大部分以晶质铀矿的形式存在^[30],利于后期热液成矿。随着花岗岩浆向超酸,偏碱,铝过饱和,少铁、钙的演化,铀丰度有增长的趋势。

5 结 论

5.1 两岩体花岗岩的元素地球化学特征相似,但下庄花岗岩相对于鲁溪花岗岩具有富硅、富碱、富钾,更低的稀土含量和负 Eu 异常等特点。

5.2 鲁溪岩体和下庄岩体是同一岩浆源先后结晶分异演化而来,成岩过程中,由于温度、氧逸度等成岩条件的变化导致了鲁溪黑云母花岗岩具有较低的铀含量,铀大部分以惰性铀-类质同象替换存在于副矿物之中,不利于成矿;而下庄二云母花岗岩具有高的铀含量,铀大部分以活性铀-晶质铀矿的形式存在,因而利于后期热液成矿。因此鲁溪岩体不成矿,而下庄岩体赋存着大量铀矿床。

5.3 随着花岗岩浆向超酸,偏碱,铝过饱和,少铁、钙的演化,铀丰度有增长的趋势。

- taceous intrusions from Banat, western South Carpathians, Romania[J]. *Mineralium Deposita*, 2002, 37(6): 568-586.
- [18] Rollison H R. *Petrogeochemistry*[M]. Yang Xueming, Yang Xiaoyong, Chen shuangxi, Translation Hefei: Chinese Science and Technology University Publishing House, 2000; 179-205.
- [19] Barth M G, McDonough W F, Rudnick R L. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust[J]. *Chemical Geology*, 2000, 165(3-4): 197-214.
- [20] 高山, H K. 中国东部地壳的结构和组成[J]. *中国科学: D 辑*, 1999, 29(003): 204-213.
- [21] Taylor S R, McLennan S. *The continental crust: its composition and evolution*[M]. Blackwell Scientific Publications Oxford, 1985.
- [22] Dostal J, Chatterjee A K. Origin of Topaz-Bearing and Related Peraluminous Granites of the Late Devonian Davis Lake Pluton, Nova-Scotia, Canada - Crystal Versus Fluid Fractionation[J]. *Chemical Geology*, 1995, 123(1-4): 67-88.
- [23] Wones D R, Eugster H P. Stability of biotite: experiment, theory and application[J]. *Am Mineral*, 1965, 50(9): 1 228-1 273.
- [24] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95(4): 407-419.
- [25] 王德滋, 周新民. 中国东南部晚中生代花岗质火山-侵入杂岩成因与地壳演化[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [26] Ponader C W, Brown Jr G E. Rare earth elements in silicate glass/melt systems; I. Effects of composition on the coordination environments of La, Gd, and Yb[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1989, 53(11): 2 893-2 903.
- [27] Rieder M, Cavazzini G, D'yakonov Y S, *et al.* Nomenclature of the micas[J]. *Canadian Mineralogist*, 1998, 36(3): 905.
- [28] 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.
- [29] 余达淦, 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.
- [30] 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(003): 10-17.

COMPARISON OF GEOCHEMICAL CHARACTERISTIC OF URANIUM-AND NON-URANIUM-BEARING INDO SINIAN GRANITES IN GUIDONG COMPOSITE PLUTON

CHEN You-wei^{1,2}, BI Xian-wu¹, HU Rui-zhong¹, QI Hua-wen¹

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 biotite granite and Xiazhuang two-mica granite are important part of Guidong composite pluton in the northern Guangdong Province. They have the same tectonic setting, close spatial association and close age. However, there are many uranium deposits in Xiazhuang two-mica granite while none in Luxi biotite granite. Based on studies of petrology, mineralogy, characteristics of major and trace elements, it is indicated that the Luxi biotite granite and Xiazhuang two-mica granite have the similar geochemical characteristics and they are at different evolutionary stage of the same parent. Different physical and chemical conditions such as temperature and oxygen fugacity of different evolutionary stage produce different uranium content. The Luxi biotite granite is of low uranium content occurred as the form of inert uranium, while Xiazhuang two-mica granite is of high uranium content occurred as the form of mobile uranium. Therefore, there are many uranium deposits in Xiazhuang two-mica granite while none in Luxi biotite granite.

Key words: granite; physical and chemical condition; uranium content; existing state of uranium

ISSN 1001-6872(2009)03-0106-09; CODEN: KUYAE2

Synopsis of the first author: Chen Youwei, male, 26 years old, a Ph D candidate of geochemistry. Now he is engaged in the research of deposit geochemistry.