

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2020.02.011

粤北竹筒尖矿床碱交代花岗岩地球化学特征及地质意义

罗强,刘文泉,张海强,伏顺成,李俊

(核工业二九〇研究所,广东 韶关 512026)

摘要: 竹筒尖矿床位于粤北下庄矿田西北部,区内碱交代作用较发育,碱交代花岗岩主要呈面状展布,与铀矿化关系密切。为研究区内碱交代过程元素变化特征及其与铀成矿的关系,文章系统采集了5件碱交代花岗岩样品,分析了其主量及微量元素组成。结果表明,与新鲜花岗岩相比,碱交代花岗岩中 SiO_2 、 Na_2O 含量明显降低,而 K_2O 含量显著偏高,表明区内碱交代以钾质交代为主;碱交代花岗岩中相对富集Rb、Th及U元素,亏损Ba、Sr、Ti等元素, $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 值相对降低, δEu 值与新鲜花岗岩一致。上述特征表明,区内碱交代花岗岩与新鲜花岗岩可能具有相同的形成环境及物质来源,同时暗示流体中的U可能来自花岗岩;碱交代作用的发育有利于富铀花岗岩中铀的活化转移,为成矿流体中铀的富集创造了有利条件。

关键词: 铀矿;碱交代;地球化学特征;竹筒尖;广东省

中图分类号: P619.14 **文献标识码:** A

0 引言

粤北下庄铀矿田是中国花岗岩型铀矿的重要产地,经过半个多世纪的铀矿勘查,区内发现了多个花岗岩型铀矿床,如希望矿床、竹山下矿床、石土岭矿床及竹筒尖矿床等,这些矿床的形成往往与碱交代作用关系密切。前人曾通过对粤北部分铀矿床碱交代作用形成的矿物实验表明^[1-2],碱交代过程伴随着铀的活化与转移。近年来的铀矿勘查工作在粤北铀矿区发现了较广泛的碱交代作用,但相关的碱交代作用的研究程度相对较低,目前的研究^[3-5]多为从不同侧面描述研究区的地质特征与成矿规律,且尚未对研究区内碱交代花岗岩的成因及其与铀成矿之间的成因联系进行过系统研究,这可能会对研究区的下一步找矿勘探工作造成一定的制约。因此,本文将

从碱交代岩的地球化学性质着手研究,讨论竹筒尖矿床碱交代作用的成因机制、动力学背景及其与铀成矿作用的关系,力图认识该矿床的成岩及成矿机理。

1 矿床地质概况

竹筒尖铀矿床位于粤北下庄矿田西北部黄陂地区(图1),区内出露岩体以下庄岩体、白水寨岩体为主。下庄岩体主体岩性为中粒黑云母花岗岩,单颗粒锆石的U-Pb年龄为 $228.0\text{ Ma} \pm 0.5\text{ Ma}$ ^[6],白水寨岩体主体岩性为细粒二云母花岗岩,被认为是下庄岩体的晚期补充侵入体^[3]。

竹筒尖铀矿床主要产在白水寨岩体内,赋矿围岩主要为细粒二云母花岗岩和碱交代花岗岩,矿化部位发育绢云母化、绿泥石化和钾钠交代等蚀变。

收稿日期: 2019-09-02; **责任编辑:** 王传泰

基金项目: 中国核工业地质局铀矿地质项目“广东省下庄矿集区铀矿资源调查评价与勘查”(编号:201924)资助。

作者简介: 罗强(1988—),男,工程师,学士学位,主要从事铀矿地质勘查及研究工作。通信地址:广东省韶关市武江区武江科技工业园广前路18号,核工业二九〇研究所;邮政编码:512026;E-mail:328086462@qq.com

通信作者: 刘文泉(1986—),男,高级工程师,博士,从事铀矿地质勘查、研究及管理工作。通信地址:广东省韶关市武江区武江科技工业园广前路18号,核工业二九〇研究所;邮政编码:512026;E-mail:396994520@qq.com

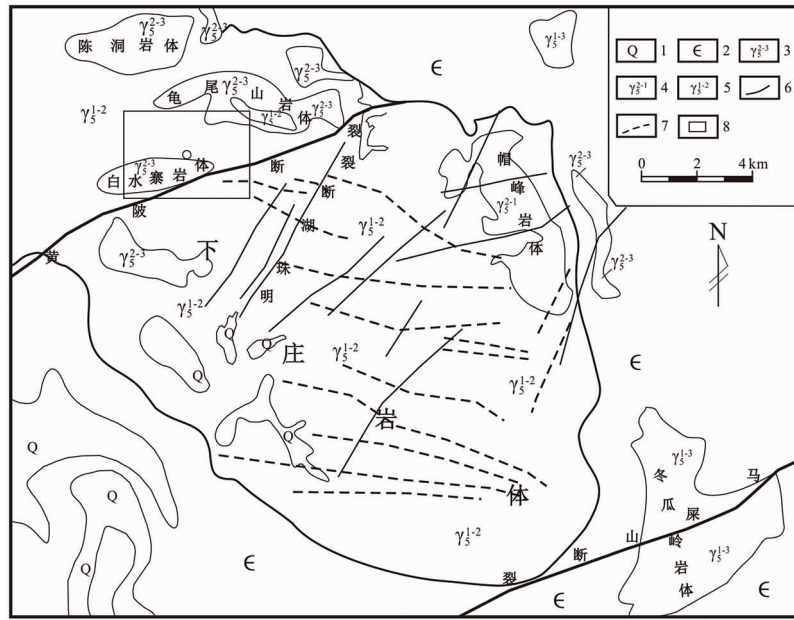


图 1 下庄矿田地质简图

Fig. 1 The geological sketch of Xiaozhuang uranium ore field

1. 第四系浮土层; 2. 寒武系浅变质砂岩; 3. 燕山早期细粒花岗岩;
4. 燕山早期中粒花岗岩; 5. 印支期花岗岩; 6. 硅化断裂带;
7. 辉绿岩; 8. 研究区位置

铀矿化主要受 NEE 向 F_3 断裂带及上下盘蚀变碎屑花岗岩、白水寨岩体(细粒二云母花岗岩或碱交代花岗岩)的控制。铀矿体主要以脉状、细脉状及透镜体状形式产出。主要含矿岩性有构造角砾岩、硅化碎裂岩、碎裂岩、碎裂岩化花岗岩和碱交代花岗岩等。铀矿化类型有硅化带型、碎裂岩型及碱交代型等,相应形成的矿石类型分别为铀-微晶石英型、铀-赤铁矿型、铀-钾长石型和铀-绿泥石型,主要矿化类型为硅化带型和碱交代型岩两种。

区内岩石发育多种类型的热液蚀变作用,主要包括硅化、绢云母化、绿泥石化、黄铁矿化、萤石化、赤铁矿化、高岭土化和碱交代等。与铀矿化关系较为密切的蚀变主要有硅化、赤铁矿化、钾(钠)长石化、白云母化等,岩石碎裂程度越高,碱交代和白云母化越强,矿石品位越高,且常见硅钙铀矿、钙铀云母和铜铀云母等次生铀矿物。

2 样品采集和分析方法

本次研究工作以检块的方式在钻孔岩芯中分别采集碱交代花岗岩为研究碱交代花岗岩地球化学特征的样品,系统采集样品 5 件。样品主量元素分析

测试在核工业 290 研究所分析测试中心完成;主量元素分析法采用的是一种精度较高的湿化学测试方法,精度优于 1%。微量元素、稀土元素分析测试由北京核工业地质研究院完成,采用的分析方法为电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测定法,用于分析测试的仪器型号为 Finnigan Element I 型,检测限低于 0.5×10^{-9} ,相对标准差优于 5%。样品的主量元素、微量元素、稀土元素分析结果见表 1、表 2、表 3 所述。

3 结果与讨论

3.1 主量元素特征

区内碱交代花岗岩的主要元素组成如表 1 所述,与新鲜中粒黑云母花岗岩(下庄岩体)相比,碱交代花岗岩中 SiO_2 、 Na_2O 含量明显降低, K_2O 含量显著偏高,说明碱交代过程中以钾交代为主,石英及钠长石被交代。 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 TiO_2 及 LOI 等含量也相对偏高, MnO 及 CaO 含量变化相对较小。此外,相对新鲜中粒黑云母花岗岩,碱交代花岗岩中氧化指数($F = w(\text{Fe}_2\text{O}_3) / w(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$)明显偏高(0.44~0.74,均值 0.61),说明碱交代流体具有较高的氧逸度^[7]。

表 1 碱交代花岗岩的主量元素组成

Table 1 Composition of major elements of alkalimetasomatic granite

样品号	231-13	231-57	231-69	231-75	231-77	下庄岩体
SiO ₂	62.16	67.32	62.56	59.66	57.46	71.8~73.54(72.59)
TiO ₂	0.084	0.076	0.25	0.15	0.26	0.1~0.18(0.15)
Al ₂ O ₃	19.64	18.53	20.77	21.6	21.96	13.61~14.26(14.03)
Fe ₂ O ₃	0.49	0.68	1.45	1.37	1.7	0.33~0.71(0.5)
FeO	0.62	0.72	0.61	0.49	0.82	1.09~1.7(1.37)
MnO	0.061	0.071	0.08	0.086	0.1	0.05~0.08(0.07)
MgO	2.42	2.25	2.91	2.39	2.65	0.49~0.8(0.63)
CaO	0.9	0.6	0.55	0.4	0.55	0.54~1.48(1.22)
Na ₂ O	0.55	0.84	0.67	0.41	0.43	2.94~3.4(3.12)
K ₂ O	10.63	9.62	10.07	10	10.64	5~5.77(5.4)
P ₂ O ₅	0.19	0.12	0.25	0.24	0.21	0.07~0.1(0.09)
LOI	2.25	2.65	2.86	2.77	2.77	0.46~0.97(0.69)
Total	99.06	100.56	100.1	99.62	99.64	99.49~100.1(99.92)
w(K ₂ O+Na ₂ O)	11.18	10.46	10.74	10.41	11.07	8.14~8.84(8.52)
w(K ₂ O)/w(Na ₂ O)	19.33	11.45	15.03	24.39	24.74	1.47~1.96(1.74)

量单位:w_B/‰。下庄岩体共采集 6 个样品,括号内为 6 个样品平均值。

表 2 碱交代花岗岩的微量元素组成

Table 2 Composition of trace elements of alkali metasomatic granite

样品号	231-13	231-57	231-69	231-75	231-77	下庄岩体
Rb	776	561	674	459	897	377.1~450(417.6)
Sr	146	28.8	48.1	30.7	56.6	49.5~101.9(65.13)
Y	13.8	28.6	31	11.1	58.2	20.6~34.12(28.24)
Zr	114	68.5	230	40.6	37.8	98.18~148(121.95)
Hf	4.03	2.86	7.5	2.31	11.8	2.88~4.72(3.67)
Nb	21.7	27.1	34.2	27.5	44.6	18.96~26.87(23.11)
Ta	4.02	4.33	6.71	8.58	8.73	2.76~5.22(3.9)
Ba	244	40.7	240	184	384	189~367.6(247.9)
Th	20.5	10.8	36	36.5	54.9	27.5~38.3(34.05)
U	66.2	92.9	1231	2453	368	16.77~25.4(19.46)
w(Y+Nb)	35.50	55.70	65.20	38.60	102.80	44.6~57.8(51.35)
w(Rb)/w(Sr)	5.32	19.48	14.01	14.95	15.85	3.78~9.05(7)
w(Rb)/w(Ba)	3.18	13.78	2.81	2.49	2.34	1.04~2.30(1.77)
w(Rb)/w(Nb)	35.76	20.70	19.71	16.69	20.11	15.90~19.89(18.26)
w(Zr)/w(Hf)	28.29	23.95	30.67	17.58	32.03	30.13~37.18(33.6)

量单位:w_B/10⁻⁶。下庄岩体共采集 6 个样品,括号内为 6 个样品平均值。

表 3 碱交代花岗岩的稀土元素组成

Table 3 Composition of rare earth elements of alkalimetasomatic granite

样品号	231-13	231-57	231-69	231-75	231-77	下庄岩体
La	22.3	10.3	34.80	18.3	63.10	32.4~54.03(42.18)
Ce	47.6	22.8	75.00	38.6	125.00	65~101.8(79.08)
Pr	5.64	2.82	9.69	4.62	15.40	8.08~10.86(9.71)
Nd	21	9.47	34.00	15	52.40	29~38.42(34.96)
Sm	4.76	2.96	8.37	4.4	11.80	6.5~7.91(7.27)
Eu	0.452	0.175	0.68	0.507	0.76	0.45~0.73(0.58)
Gd	3.72	3.17	7.14	4.65	10.20	5.45~7.45(6.59)
Tb	0.673	0.792	1.34	1.24	2.06	0.81~1.10(0.95)
Dy	3.07	4.73	6.25	6.9	10.70	4.37~6.27(5.56)
Ho	0.475	0.809	0.95	1.17	1.79	0.79~1.25(1.04)
Er	1.22	2.36	2.51	3.38	5.08	2.05~3.46(2.83)
Tm	0.182	0.443	0.39	0.672	0.85	0.29~0.50(0.4)
Yb	1.17	3.16	2.51	5.27	5.34	2.04~3.17(2.56)
Lu	0.177	0.502	0.38	0.824	0.85	0.27~0.46(0.37)
w(ΣREE)	112.44	64.49	184.02	105.53	305.32	157.96~234.92(194.07)
w(LREE)/w(HREE)	9.52	3.04	7.57	3.38	7.28	7.18~9.85(8.6)
δEu	0.32	0.17	0.26	0.34	0.21	0.189~0.33(0.25)
w(La) _N /w(Yb) _N	12.88	2.20	9.37	2.35	7.98	9.76~12.66(11.17)
w(La) _N /w(Sm) _N	2.95	2.19	2.62	2.62	3.37	3.06~4.68(3.65)
w(Gd) _N /w(Yb) _N	2.58	0.81	2.31	0.72	1.55	1.62~2.59(2.15)

量单位:w_B/10⁻⁶。下庄岩体共采集 6 个样品,括号内为 6 个样品平均值。

3.2 微量元素特征

区内碱交代花岗岩的微量元素组成如表 2 所述。

由于微量元素及其比值,比主量元素更能有效地示踪岩石学过程,因此,它是现代岩石学研究的一个重要组成部分^[8]。从图 2 碱交代花岗岩(a)与下庄岩体(b)微量元素蛛网图不难看出,与正常的花岗岩相比,碱交代花岗岩中相对富集大离子元素 Rb、Th,亏损 Ba、Sr、Ti 等元素,反映了碱交代过程中 Rb、Th 的明显带入,Ba、Sr、Ti 的损失反映了斜长石、钛铁矿和磷灰石在交代过程中的分离和结晶^[6]。此外,碱交代花岗岩中 U、Ta 含量相对升高,而 Y、Zr、Nb、Hf 等元素含量变化不大。虽然在碱交代过程中某些元素含量发生了变化,但总体而言,碱交代花岗岩与新鲜花岗岩在微量元素标准化配分曲线图中类似^[9],表明二者继承关系明显,同时暗示流体中的铀可能来自花岗岩。

3.3 稀土元素特征

区内碱交代花岗岩的稀土元素组成见表 3 所述,其配分模式如图 3 所示。

稀土元素配分模式是示踪成矿物质来源和流体-岩石作用程度的重要依据之一^[10],碱交代花岗岩稀土元素特征如下:

1) 相对新鲜中粒黑云母花岗岩,碱交代花岗岩中稀土总量较低, $w(\Sigma\text{REE}) = 64.69 \times 10^{-6} \sim 305.32 \times 10^{-6}$ (平均为 154.36×10^{-6}); $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 值(3.04~9.52,平均为 6.16)、 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值(2.20~12.88,平均为 6.96)也相对降低,说明在碱交代过程中轻稀土被带出明显;在球粒陨石标准化的稀土元素配分模式图^[9]上,曲线呈近水平型(图 3a),这可能是因为交代过程中轻稀土元素先被交代,而重稀土相对残留在交代流体中,从而导致碱交代花岗岩具有上述稀土元素特征。

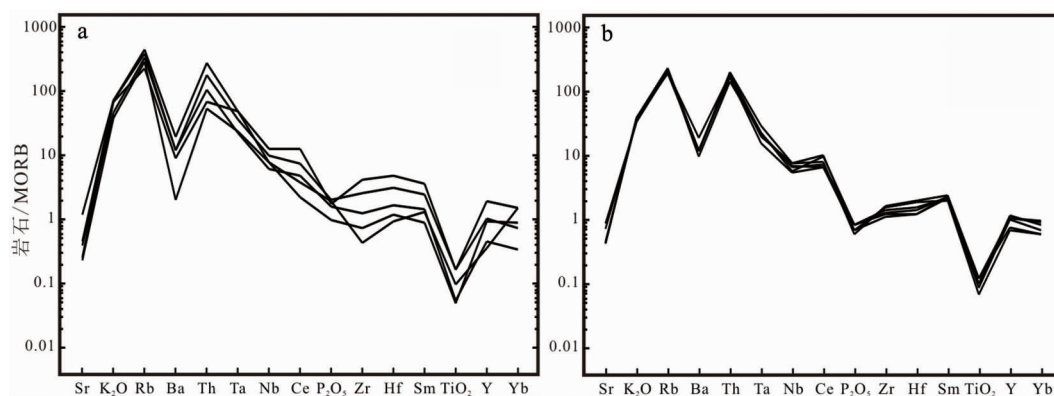


图 2 碱交代花岗岩微量元素蛛网图(a)和下庄岩体微量元素蛛网图(b)

Fig. 2 Trace element spider diagram of alkaline metasomatic granite (a) and Xiazhuang rock mass (b)

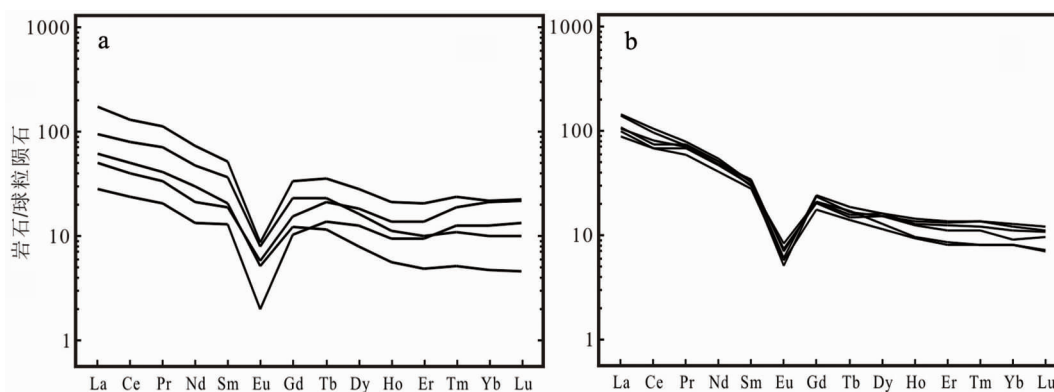


图 3 碱交代花岗岩稀土元素配分模式图(a)和下庄岩体稀土元素配分模式图(b)^[11]

Fig. 3 REE pattern of Alkaline metasomatic granite (a) and Xiazhuang rock mass (b)

2) 碱交代花岗岩的 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 值稍高 (2.19~3.37, 平均为 2.75), $w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值稍低 (0.72~2.58, 平均为 1.58), 表明轻稀土元素之间的分馏相对明显, 重稀土元素之间的分馏较弱。

3) 碱交代花岗岩 δEu 值为 0.17~0.32 (平均为 0.26), 与新鲜中粒黑云母花岗岩一致, 说明二者具有相同的形成环境及物质来源。此外, $w(\text{La})/w(\text{Sm})-w(\text{La})$ 图解 (图 4) 显示, 数据点投影不是呈正相关展布, 而是呈近水平展布, 表明碱交代流体经历了明显的分离与结晶作用^[11]。

4 碱交代作用地质意义

粤北下庄区内花岗岩分布广泛, 规模较大。区内铈含量研究资料表明, 花岗岩体中的铈含量高 (均值 $>16 \times 10^{-6}$), 而中基性岩脉的铈含量低 ($<1.6 \times 10^{-6}$)^[12], 表明成矿流体中铈来源于地幔可能性不大, 而来自广泛分布的花岗岩体可能性较大。花岗岩中铈的主要载体矿物为黑云母、锆石、独居石等, 花岗岩中的铈主要由于上述矿物发生交代作用, 而被浸取出来; 上述矿物经过交代蚀变作用使其中的稳定铈转变为活动铈, 为成矿流体中铈的富集成矿提供了良好的条件, 如下庄岩体中, 黑云母发生绿泥石化后, 原岩中约 40% 的铈已发生活化转移^[13]。裂变径迹研究^[1]表明, 在新鲜的黑云母中, 裂变径迹呈密集的小球状分布, 说明铈主要以一种固定的晶格铈形式存在于黑云母所包裹的副矿物中; 但经白云母化以后, 新生白云母中几乎没有径迹分布, 而残留的未被交代的黑云母中仍见有密集的径迹。这表

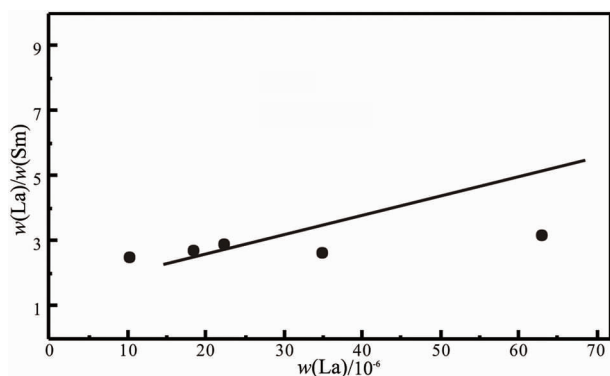


图 4 碱交代花岗岩稀土元素
 $w(\text{La})/w(\text{Sm})-w(\text{La})$ 图解

Fig. 4 $w(\text{La})/w(\text{Sm})-w(\text{La})$ diagram
of alkali metasomatic granite

明, 在白云母化过程中, 黑云母中的铈发生了活化转移。程华汉等通过对含铈花岗岩碱交代作用前后重砂矿物变化的研究发现^[2], 在碱交代作用之后, 岩体中主要的富铈矿物锆石中的铈发生了显著的亏损。如在下庄岩体中, 新鲜黑云母花岗岩中锆石、褐帘石、磷灰石和磷钇矿的含量较高, 但随着碱交代作用增强, 含铈副矿物的数量显著减少^[14], 碱交代过程中锆石数量的大量减少, 使原锆石中的稳定铈变成活性铈, 大大提高了铈的浸出率。

综上, 碱交代作用对于铈成矿具有重大的意义, 碱交代作用的发育不仅有利于富铈花岗岩中铈的活化转移, 为成矿流体中铈的富集创造有利条件, 而且在某些条件下, 尤其是在碱交代作用晚期, 由于大量铈转移进入交代流体而有可能在有利的物理化学条件下直接富集成矿。

5 结语

通过对粤北竹筒尖矿床碱交代花岗岩地球化学特征研究取得以下认识:

(1) 竹筒尖地区碱交代作用主要为钾质交代, 且碱质流体为高氧逸度流体; 微量与稀土元素特征表明, 碱交代花岗岩与下庄岩体具有较好的继承关系, 二者可能具有相同的成矿环境及物质来源。

(2) 碱交代作用为成矿流体中铈富集与成矿提供了有利条件, 对区内铈矿找矿意义重大。

参考文献:

- [1] 倪师军. 石土岭铈矿床成矿物质来源探讨及铈沉淀机制的热力学计算模拟[D]. 成都: 成都地质学院, 1986.
- [2] 程华汉, 杜乐天. 几个铈矿床碱交代作用中重砂矿物变化的研究[J]. 铈矿地质, 1998, 14(1): 26-31.
- [3] 王春双, 吴烈勤. 粤北白水寨地区铈矿潜力分析[J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 2012, 35(1): 17-22.
- [4] 刘文泉, 吴烈勤, 李俊. 广东省翁源县竹筒尖铈矿床地质特征及成矿机制探讨[J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 2014, 37(2): 143-149.
- [5] 赖中信, 王娥. 下庄矿田竹筒尖地区花岗岩型热液铈矿床定位条件分析[J]. 铈矿冶, 2014, 30(2): 109-112.
- [6] 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), 2003, 33(12): 2109-2118.
- [7] 王正庆, 范洪海, 陈东欢, 等. 沙子江铈矿外围地化特征、元素迁移及铈成矿机理[J]. 高校地质学报, 2018, 24(2): 185-199.

- [8] 陈骏, 王鹤年. 成矿流体作用过程的 REE 示踪研究[J]. 南京大学学报(自然科学地质流体专辑), 1997, 33: 28-35.
- [9] Brown G C. Calc-alkaline intrusive rocks; their diversity, evolution and relation to volcanic arcs [M]. New York: John Wiley and Sons, 1982: 437-464.
- [10] 王中刚. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [11] 张祖还, 章邦桐, 等. 华南产铀花岗岩及有关铀矿床研究[M]. 北京: 原子能出版社, 1991.
- [12] 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(3): 677-687.
- [13] 王学成. 贵东岩体地质地球化学特征及 339 矿床成因研究[D]. 南京: 南京大学, 1986.
- [14] 邓平, 凌洪飞, 沈渭洲, 等. 粤北石土岭铀矿床碱交代作用成因探讨[J]. 地质论评, 2005, 51(5): 57-565.

Geochemical characteristics and geological significance of alkali metasomatic granites in the Zhutongjian ore deposit in the north Guangdong province

LUO Qiang, LIU Wenquan, ZHANG Haiqiang, FU Shuncheng, LI Jun

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

Abstract: The Zhutongjian deposit is located in the northwest Xiazhuang ore field in north Guangdong province. The alkali metasomatism is developed in the area, and the areally-distributed alkali metasomatic granite is closely related to uranium mineralization. In order to study the change characteristics of elements in the alkali metasomatism and its relationship with uranium mineralization, five samples of alkali metasomatic granite were collected and the major and trace elements were analyzed. The results show that compared with fresh granite, the content of SiO_2 and Na_2O in alkali metasomatic granite is significantly lower, while the content of K_2O is significantly higher. This is the indication of dominance of potassium metasomatism. The alkali metasomatic granite is relatively enriched in Rb, Th and U elements, depleted in Ba, Sr, Ti etc., relative lower in $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$, and its δEu value consistent with fresh granite. The above characteristics suggest that the alkali metasomatic granite and fresh granite may be the same of formation environment and material source and imply that U in the fluid may come from granite. Development of alkali metasomatism is beneficial to the activation and transportation of uranium from uranium-rich granite so as to create favorable conditions for the U enrichment to ore.

Key Words: uranium deposit; alkali metasomatism; geochemical characteristics; Zhutongjian; Guangdong province