

周万蓬, 范洪海, 刘林清, 等. 相山火山盆地南部印支期富铀岩体岩石学及主微量元素特征[J]. 中国地质, 2015, 42(6): 1897-1909.
Zhou Wanpeng, Fan Honghai, Liu Linqing, et al. Petrology and major-trace elements characteristics of the Indosinian uranium-rich pluton in southern Xiangshan volcanic basin[J]. Geology in China, 2015, 42(6): 1897-1909(in Chinese with English abstract).

相山火山盆地南部印支期富铀岩体岩石学 及主微量元素特征

周万蓬^{1,2,3} 范洪海¹ 刘林清^{2,3} 姜勇彪³

(1.核工业北京地质研究院,北京 100029;2.江西省数字国土重点实验室,江西 南昌 330013;
3.东华理工大学地质调查研究院,江西 抚州 344000)

摘要:通过对咸口岩体进行岩石学、主微量元素分析,发现其为一套印支期富铀复式岩体,具富硅、高钾、弱过铝质特征,属高钾钙碱性系列岩石;其稀土元素配分型式具右倾斜特征,富轻稀土,轻稀土分馏比重稀土明显,铈亏损明显;微量元素 Nb、Ce、Pr、Zr、Ba 明显亏损,而 Rb、Th、U、Pb、Ta、Nd、Hf 元素富集,Rb/Sr 比值变化大(0.92~6.52);岩体平均铀含量为 19.55×10^{-6} ,属富铀花岗岩体。由主微量元素构造环境判别,结合区域地质背景分析,咸口岩体为板内后造山构造环境下形成的富铀花岗岩体。相山南部咸口富铀岩体的发现为解决相山铀矿田的铀源问题提供了新的思路,也有望指引在相山南部寻找花岗岩型铀矿床。

关键词:咸口富铀岩体,地球化学,印支期,相山

中图分类号:P588.12¹;P619.14 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2015)06-1897-13

Petrology and major-trace elements characteristics of the Indosinian uranium-rich pluton in southern Xiangshan volcanic basin

ZHOU Wan-peng^{1,2,3}, FAN Hong-hai¹, LIU Lin-qing^{2,3}, JIANG Yong-biao³

(1. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China;
2. Digital Land Key Laboratory of Jiangxi Province, Nanchang 300013, Jiangxi, China;
3. Geological Survey Institute of East China Institute of Technology, Fuzhou 344000, Jiangxi, China)

Abstract: Petrology and major-trace elements analysis shows that Xiankou pluton is a compound granitic body characterized by high SiO₂, high K and slightly peraluminous nature, thus belonging to the high-K calc-alkaline series. Chondrite-normalized REE patterns are characterized by right-inclined shape, rich light rare earth, significant negative europium anomalies, and more obvious fractionation of LREE than that of HREE. Trace elements are characterized by rich Rb, Th, U, Pb, Ta, Nd, Hf, obviously poor Nb, Ce, Pr, Zr, Ba, and significant variation of Rb/Sr ratio (0.92 ~ 6.52), with the average uranium content being 19.55ppm, suggesting

收稿日期:2014-09-27;改回日期:2015-07-14

基金项目:中国地质调查局工作项目(1212011120836)和(1212011220248)资助。

作者简介:周万蓬,男,1973年生,博士生,副教授,主要从事铀矿地质、区域地质相关方面的教学和科研工作;E-mail:wpzhou@ecit.cn。

通讯作者:范洪海,男,1963年生,博士生导师,研究员,主要从事铀矿地质和岩石地球化学领域的研究工作,E-mail:fh270@263.net。

that the pluton belongs to uranium-rich granite. The tectonic setting discrimination diagram of trace elements and main elements shows that Xiankou pluton is a uranium-rich granite formed in an environment of intraplate post-orogenesis. The discovery of Xiankou pluton provides a new train of thought for resolving the uranium source problem of the Xiangshan uranium orefield, and might guide the prospecting for granite type uranium deposits in southern Xiangshan.

Key words: Xiankou uranium-rich pluton; geochemistry, Indochina, Xiangshan

About the first author: ZHOU Wan-peng, male, born in 1973, doctor candidate, associate professor, mainly engages in the study and teaching of uranium geology and regional geology; E-mail: wpzhou@ecit.cn.

About the corresponding author: FAN Hong-hai, male, born in 1963, supervisor of doctor candidate, senior researcher, mainly engages in the study of uranium geology and litho-geochemistry; E-mail: fhh270@263.net.

1 引 言

相山铀矿田成矿铀源问题一直困扰各研究者,不同学者从不同研究角度提出多种假设,各假设主要是从成矿作用方面来进行考虑,如“双混合”模式认为成矿的铀来自原生流体和富铀地层(主要为矿田基底变质岩)及古老铀矿床的溶解^[1];水-岩相互作用模式认为铀源来自相山火山盆地水热系统之围岩^[2-3];地幔流体模式认为是地幔流体通过对地壳基底岩石和围岩中铀的浸取而获取成矿铀源^[4-5]。另外通过对围岩、矿石、蚀变矿物的同位素、微量元素地球化学分析,认为铀源主要来自矿田基底变质岩、相山火山-侵入杂岩体^[6-9]。从前人的大量研究中,相山铀矿田的铀源可归纳为来自基底变质岩、打鼓顶组和鹅湖岭组火山岩(或相山火山-侵入杂岩体)及深部地幔流体中的铀。相山矿田铀源问题上要作出正确判断,需要从区域地质-地球化学特征来研究区域成矿物质的时空演化历史^[10]。本次在相山南边测制咸口岩体剖面时,采集的样品分析结果显示,其平均铀含量为 19.55×10^{-6} (一般花岗岩铀平均含量为 4.75×10^{-6} ^[11]),显示该岩体为一富铀岩体。咸口富铀岩体的发现可为相山铀矿田的铀源问题提供新的思路。

前人虽然对咸口岩体进行了一定的地质工作,但一直未对其进行详细的地球化学成分方面的研究,本次利用在该区进行的区域地质调查,对该岩体的岩石学、地球化学特征进行了研究分析,并尝试探讨其对铀成矿作用的意义。

2 区域地质特征

咸口岩体位于江西省乐安县城东侧约6 km,北距相山火山-侵入杂岩体边部不到2 km。岩体主要分布于南边白竹村,北边下咸口村,东侧横岗村,西侧罗山村之间,出露形态大致为椭圆状,东西长约7.3 km,南北宽约4.1 km,面积约22.4 km²。在区域上,位于扬子地块和华夏地块的江绍缝合带(或称钦杭构造带)南侧(图1),在成矿区划上咸口岩体位于赣杭火山岩型铀成矿带和于山-大王山花岗岩型铀成矿带的交汇部位附近。在1:5万陀上、鹿冈、乐安县幅地质调查报告将咸口复式岩体分别按岩石结构建立单元,包括店元单元、横岗单元、上店元单元、排前单元,并认为它们构成同源岩浆演化序列(其中排前单元为补充期岩体),归并建立咸口序列。

咸口岩体(咸口序列)前人未进行同位素定年工作,本次对店元、横岗、上店元、排前各单元进行了LA-ICP-MS 锆石U-Pb定年,获得²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄分别为(229±4)Ma、(235±4)Ma、(235±3)Ma、(236±3)Ma^①,各单元形成于中三叠世,属印支期岩体。

店元单元侵入青白口纪库里组、上施组以及早泥盆世乐安岩体,被上店元侵入体及排前单元侵入,与横岗单元的接触关系因风化浮土掩盖未能见及。横岗单元侵入青白口纪浅变质岩,侵入早泥盆世乐安岩体,切割乐安岩体中的片麻理,被排前单元岩脉状穿插。上店元单元仅见有一个岩瘤状侵入体和一些岩脉状出露(如在丁元水库采石场),侵

①周万蓬,范洪海,刘林清,姜勇彪. 相山火山盆地南部印支期富铀岩体锆石U-Pb年龄及Nd、Sr、Pb同位素特征,待刊。

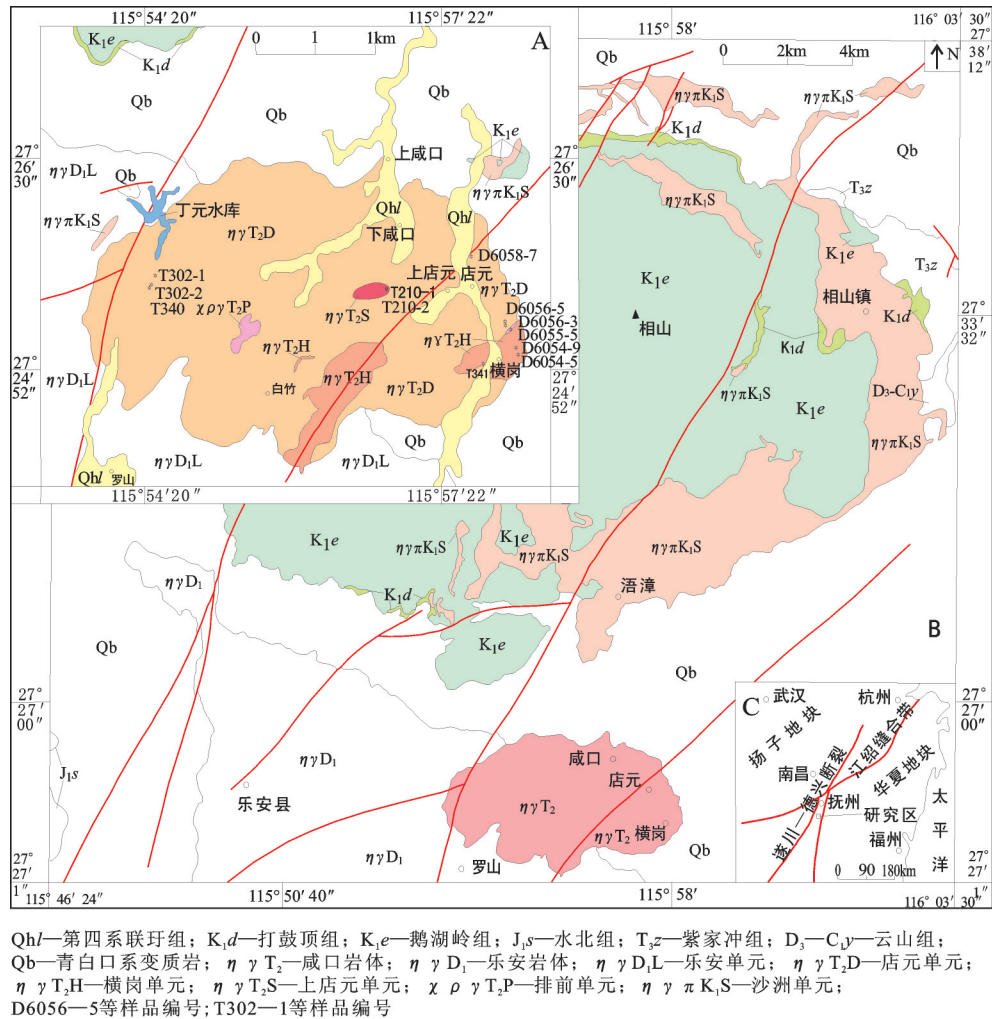


图1 咸口岩体区域地质简图
 Fig.1 Sketch regional geological map of Xiankou pluton

入店元单元。排前单元以岩瘤状侵入体和岩脉状
 出露,侵入于店元和横岗单元中。

店元单元中见有少量微粒—细粒镁铁质包体,包
 体中有源自花岗岩质岩的长石、石英捕掳晶,也有花
 岗质的反向脉,为岩浆混合包体;上店元单元局部也
 含微粒镁铁质包体;横岗单元偶见富云母包体。店元
 和横岗单元中有变质岩捕掳体,常见排前单元的细粒
 碱长花岗岩脉。各单元中石英脉发育,并且都产有少
 量(含电气石)花岗伟晶岩脉、细晶岩脉或不规则伟晶
 岩囊包。各单元在乐安县横岗村到丁元水库附近出
 露情况及样品采集位置见图1-A。

3 咸口岩体的岩石学特征

店元单元岩性为中粗粒巨斑黑云母二长花岗

岩,块状构造,似斑状结构(图2-a),斑晶成分为钾
 长石(条纹长石),含量为20%~25%,大小1~10
 cm;基质中粗粒花岗结构,成分主要为钾长石(条纹
 长石)、斜长石(An值32~25)、石英、黑云母,少量
 填隙状白云母。黑云母细粒鳞片状,局部丛状,粒
 径0.5~2 mm;斜长石常绢云母化,有的可见环带结
 构(图3-a)。岩石中有镁铁质包体,岩性为微细粒
 斑状黑云石英闪长岩—细粒斑状富云花岗闪长岩,
 其中有长石、石英捕掳晶。

横岗单元岩性为粗中粒少斑黑云二长花岗岩,
 块状构造,似斑状结构(图2-b),斑晶成分为钾长石
 (条纹长石),含量为3%~10%,大小1 cm×2 cm~3
 cm×8cm;基质粗中粒花岗结构(图3-b),个别石英
 可达15 mm;基质成分主要为钾长石(主要条纹长

石、少量微斜长石)、斜长石、石英、黑云母(3%±)及少量填隙状白云母;黑云母细粒星散鳞片状,局部丛状,粒径0.5~2 mm,绝大多数已绿泥石化;斜长石多已绢云母化。

上店元单元岩性为细粒似斑状黑云二长花岗岩,似斑状结构(图2-c),斑晶有两个粒级,一个粒级0.6 cm×1.2 cm~2 cm×4 cm,成分为钾长石(条纹长石)(图3-c),含量为6%~10%,另一个粒级的斑晶3~8 mm,成分为石英、钾长石(条纹长石)、斜长石(An33~13,可具环带结构),含量分别为3%~5%、7%~10%、20%~25%;基质细粒花岗结构,成分主要为石英、斜长石、微斜长石、黑云母;其中黑云母呈细粒星散鳞片状,常绿泥石化,斜长石常绢云母化。

排前单元岩性为细粒黑云母碱长花岗岩,块状构造,细粒花岗结构(图2-d、图3-d),粒径主要为0.5~2 mm。矿物组成:石英30%左右,他形粒状;黑云母1%~2%,鳞片状,常蚀变为绿泥石或白云母;钾长石(主要为微斜条纹长石,少量微斜长石)30%~40%,半自形-他形;钠长石30%~40%(An2~0.4),半自形-他形。

4 样品采集和分析方法

咸口岩体的样品是在东华理工大学承担的江西1:5万陀上幅、鹿冈幅、乐安县幅区域地质调查项目工作过程中采集。在野外采集样品时注意选择新鲜、无蚀变的岩石,并在野外剔除岩石中的角砾、蚀变、表面风化部分,再送采集的样品到实验室进行主微量元素分析。

所选岩石样品的主量、微量元素在核工业北京地质研究院分析测试中心进行测试。主量元素分析采用X射线荧光光谱法(XRF)和化学分析法(CA),XRF所用仪器为飞利浦PW2404 X射线荧光光谱仪,X射线管电压为50 kV,电流为50 mA,元素的测定精度可达0.01%,分析误差<5%;CA仅用于测定样品中氧化亚铁的含量,测定范围:>0.5%。微量元素分析采用Finnigan MAT制造的HR-ICP-MS(Element I)仪器,测试方法参照DZ/T0223-2001(电感耦合等离子体质谱(ICP-MS))方法,工作温度、相对湿度分别为20℃和30%,微量元素含量大于10 μg/g时相对误差小于5%,小于10 μg/g的相

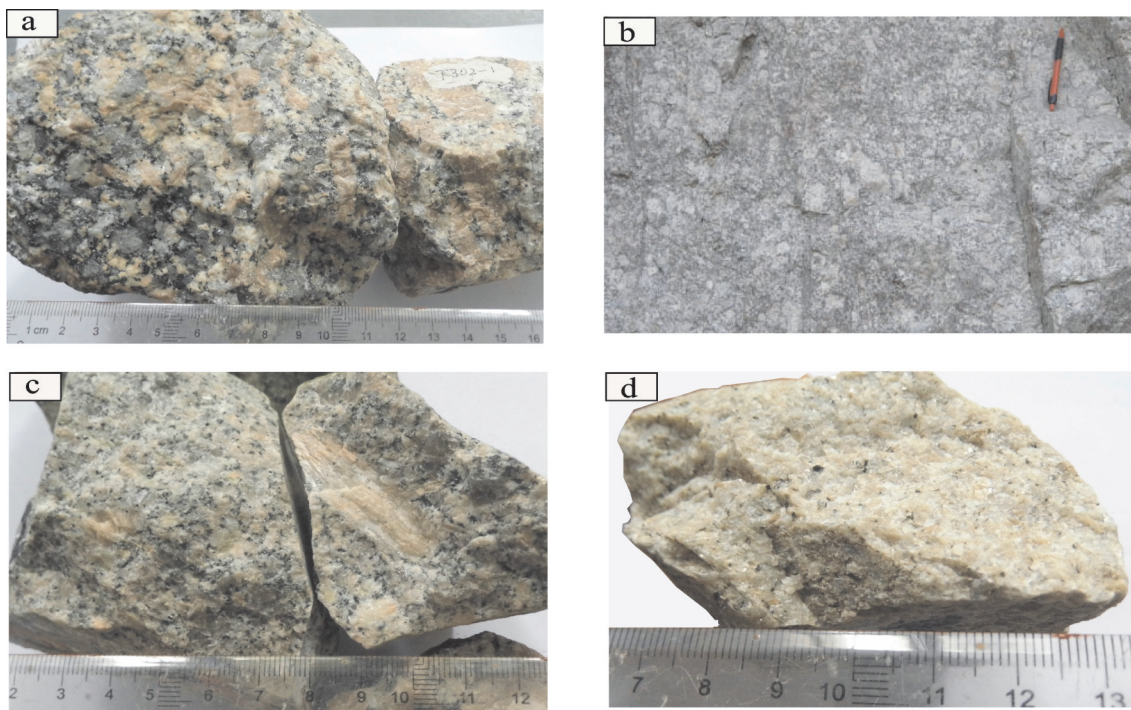
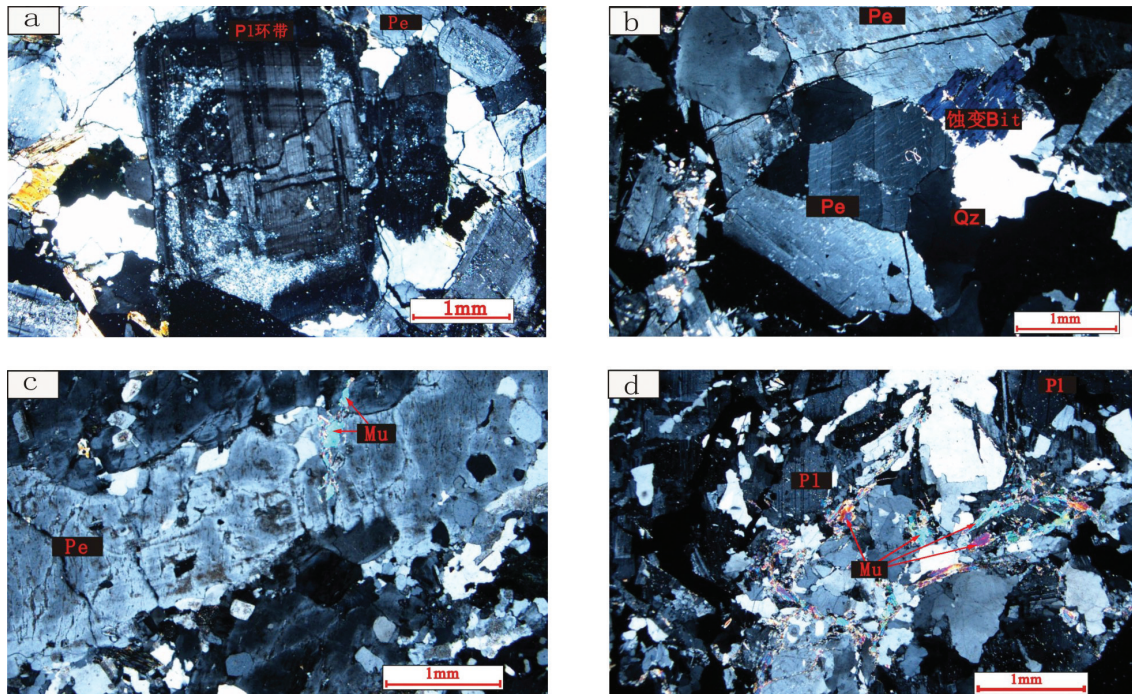


图2 岩石手标本

Fig.2 Rock hand specimens



a-店元单元斜长石环带及条纹长石;b-横岗单元粗中粒花岗结构及条纹长石;c-上店元单元条纹长石斑晶;d-排前单元细粒花岗结构及白云母;Pl-斜长石;Pe-条纹长石;Bit-黑云母;Qz-石英;Mu-白云母

图3 各岩石单元镜下特征(+)

Fig.3 Microscopic characteristics of each rock unit(+)

对误差小于10%。对分析数据进行岩石地球化学数据处理时利用Geokit软件^[12]。

5 地球化学特征

5.1 主量元素特征

咸口岩体各岩性的主量元素、CIPW标准矿物含量及主要岩石化学参数见表1和表2。由表可知:岩石富硅, SiO₂含量为70.4%~76.9%,平均为73.1%; (Na₂O+K₂O)含量在6.77%~11.4%,里特曼指数(σ)除了排前单元D6056-3样品为4.57,其他均在1.56~2.69,为钙碱性岩类($\sigma < 3.3$),在SiO₂-(Na₂O+K₂O)硅碱图上,岩石样品均落在亚碱性系列;高钾, K₂O含量3.06%~8.06%, K₂O/Na₂O比值除了样品T302-1为0.76,其他均大于1, K₂O>Na₂O,在K₂O-SiO₂图解中位于高钾钙碱性系列;铝弱过饱和, Al₂O₃含量11.3%~15.5%, A/CNK值在0.96~1.18,平均为1.065, A/NK值在1.09~1.50,在A/CNK-A/NK图中,岩石落在过铝质靠近准铝质区域,具过铝质或弱过铝质特征, AR值在2.16~4.29,在CIPW标准矿物中大部分样品的刚玉体积含量大

于1%。该岩体与典型的强过铝S型花岗岩(A/CNK>1.1, CIPW标准矿物刚玉含量>1%^[13])相比, A/CNK值偏低。

5.2 稀土元素特征

咸口岩体稀土元素分析结果见表3,利用Taylor(1985)球粒陨石数据对分析结果进行标准化,并绘制稀土元素分布型式图(图4)。从表3和图4可看出, ΣREE 为 $383.07 \times 10^{-6} \sim 25.79 \times 10^{-6}$,差异较大,并有店元单元向横岗单元、上店元单元和排前单元大致降低趋势,富轻稀土, LREE/HREE=2.8~19.7, (La/Yb)_N=1.9~35.6,其中轻稀土的分馏较重稀土明显, (La/Sm)_N及(Gd/Yb)_N分别为2.31~8.87和0.18~3.27;钕亏损明显, $\delta\text{Eu}=0.31 \sim 0.88$ 。随着岩体的演化,及分异指数的增大,轻、重稀土比值及 δEu 值具有较明显的降低演变趋势,指示岩体在成岩过程中存在富轻稀土矿物(如磷灰石、褐帘石、独居石等)和斜长石的分离结晶作用。岩石的稀土元素球粒陨石标准化配分型式图有明显的右倾斜特征(图4)。

5.3 微量元素特征

咸口岩体微量元素分析结果见表3,在原始地

表1 咸口岩体主要元素含量(%)
Table 1 Major element content (%) of Xiankou pluton

| 单元 | 样号 | 岩性 | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | CO ₂ | H ₂ O ⁺ | 总量 |
|-----|---------|----------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------|
| 店元 | T302-1 | | 70.4 | 0.37 | 14.9 | 0.68 | 1.88 | 0.09 | 0.71 | 2.51 | 4.02 | 3.06 | 0.18 | 0.17 | 0.98 | 99.9 |
| | T340-1 | 中粗粒巨斑状黑云 | 70.5 | 0.32 | 14.8 | 0.82 | 1.42 | 0.09 | 0.70 | 1.68 | 3.04 | 5.27 | 0.14 | 0.40 | 0.51 | 99.8 |
| | D6056-5 | 二长花岗岩 | 71.9 | 0.47 | 13.2 | 0.67 | 2.22 | 0.13 | 0.84 | 1.24 | 2.82 | 3.95 | 0.20 | 0.66 | 1.63 | 99.9 |
| | D6058-7 | | 73.3 | 0.29 | 13.9 | 1.01 | 0.80 | 0.05 | 0.56 | 0.95 | 3.26 | 4.75 | 0.10 | 0.08 | 0.47 | 99.6 |
| 店元 | T340-2 | 微粒铁镁质包体 | 66.9 | 0.85 | 15.5 | 1.09 | 2.93 | 0.13 | 1.84 | 3.38 | 4.11 | 1.86 | 0.25 | 0.40 | 0.54 | 99.9 |
| | T302-3 | | 64.12 | 1.03 | 14.37 | 1.18 | 5.55 | 0.14 | 2.25 | 2.41 | 2.99 | 3.73 | 0.43 | 0.27 | 1.28 | 99.97 |
| 横岗 | D6054-9 | 粗中粒少斑黑云母 | 70.6 | 0.47 | 14.1 | 0.34 | 2.33 | 0.09 | 0.91 | 0.90 | 3.43 | 4.73 | 0.20 | 0.19 | 1.48 | 99.8 |
| | T341-1 | 二长花岗岩 | 76.9 | 0.18 | 11.3 | 0.33 | 0.95 | 0.11 | 0.34 | 0.99 | 2.54 | 4.74 | 0.05 | 0.89 | 0.35 | 99.7 |
| 上店元 | T210-1 | | 71.1 | 0.39 | 13.5 | 0.56 | 1.87 | 0.10 | 0.64 | 1.57 | 3.41 | 4.69 | 0.15 | 0.61 | 1.24 | 99.9 |
| | T210-2 | 细粒似斑状黑云 | 75.2 | 0.29 | 12.3 | 0.69 | 1.48 | 0.10 | 0.54 | 0.96 | 3.17 | 4.05 | 0.10 | 0.50 | 0.23 | 99.7 |
| | T340-3 | 二长花岗岩 | 72.2 | 0.32 | 14.2 | 0.61 | 1.38 | 0.08 | 0.50 | 1.78 | 3.10 | 4.90 | 0.16 | 0.44 | 0.18 | 99.9 |
| 排前 | D6054-5 | | 74.9 | 0.07 | 13.6 | 0.54 | 0.38 | 0.05 | 0.11 | 0.27 | 4.30 | 4.97 | 0.05 | 0.06 | 0.60 | 99.9 |
| | D6055-5 | 细粒黑云母碱长 | 75.3 | 0.09 | 13.4 | 0.20 | 0.75 | 0.05 | 0.05 | 0.18 | 3.37 | 5.67 | 0.02 | 0.08 | 0.70 | 99.9 |
| | D6056-3 | 花岗岩 | 71.4 | 0.06 | 15.5 | 0.11 | 0.48 | 0.04 | 0.08 | 0.21 | 3.34 | 8.06 | 0.08 | 0.09 | 0.46 | 99.9 |

表2 咸口岩体的CIPW标准矿物含量(%)及主要岩石化学参数
Table 2 CIPW-normative minerals content (%) and main petrochemical parameters of Xiankou pluton

| 单元 | 样品号 | Q | An | Ab | Or | C | Hy | Il | Mt | Ap | Cc | A/CNK | σ | AR | A/NK | 全碱 | K ₂ O/Na ₂ O | TFeO/MgO | CaO/Na ₂ O |
|-----|---------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------------------------------------|----------|-----------------------|
| 店元 | T302-1 | 29.5 | 10.1 | 35.4 | 19.3 | 0.82 | 3.2 | 0.4 | 0.52 | 0.36 | 0.39 | 1.03 | 1.82 | 2.38 | 1.50 | 7.08 | 0.76 | 3.51 | 0.62 |
| | T340-1 | 29.7 | 4.8 | 26.1 | 32.9 | 1.66 | 2.55 | 0.35 | 0.62 | 0.27 | 0.91 | 1.08 | 2.50 | 2.16 | 1.39 | 8.31 | 1.73 | 3.08 | 0.55 |
| | D6056-5 | 39.1 | 0.7 | 25.2 | 25.3 | 2.82 | 3.91 | 0.52 | 0.52 | 0.4 | 1.53 | 1.18 | 1.57 | 2.28 | 1.48 | 6.77 | 1.40 | 3.36 | 0.44 |
| | D6058-7 | 34.2 | 3.5 | 28.3 | 29.6 | 1.46 | 1.68 | 0.31 | 0.61 | 0.2 | 0.18 | 1.14 | 2.11 | 2.56 | 1.33 | 8.01 | 1.46 | 3.05 | 0.29 |
| 包体 | T340-2 | 27.7 | 12.7 | 36.5 | 11.9 | 1.51 | 6.32 | 0.95 | 0.85 | 0.5 | 0.93 | 1.04 | 1.49 | 1.93 | 1.76 | 5.97 | 0.45 | 2.13 | 0.82 |
| | T302-3 | 24.04 | 7.69 | 27.5 | 24.6 | 1.93 | 10.6 | 1.17 | 0.94 | 0.89 | 0.65 | 1.08 | 2.11 | 2.11 | 1.60 | 6.72 | 1.25 | 2.94 | 0.81 |
| 横岗 | D6054-9 | 29.9 | 2.0 | 30.4 | 30.0 | 1.84 | 4.3 | 0.52 | 0.26 | 0.4 | 0.44 | 1.14 | 2.39 | 2.68 | 1.31 | 8.16 | 1.38 | 2.90 | 0.26 |
| | T341-1 | 45.1 | 0.0 | 19.6 | 29.4 | 1.63 | 1.65 | 0.19 | 0.25 | 0.1 | 1.63 | 1.01 | 1.56 | 2.42 | 1.21 | 7.28 | 1.87 | 3.67 | 0.39 |
| 上店元 | T210-1 | 30.8 | 2.9 | 30.0 | 29.5 | 1.21 | 3.09 | 0.42 | 0.43 | 0.3 | 1.39 | 1.00 | 2.32 | 2.65 | 1.27 | 8.10 | 1.38 | 3.71 | 0.46 |
| | T210-2 | 40.2 | 1.0 | 27.4 | 25.3 | 1.6 | 2.41 | 0.31 | 0.52 | 0.19 | 1.13 | 1.08 | 1.62 | 2.84 | 1.28 | 7.22 | 1.28 | 3.89 | 0.30 |
| | T340-3 | 32.4 | 4.9 | 26.6 | 30.4 | 1.35 | 2.16 | 0.34 | 0.46 | 0.31 | 0.99 | 1.04 | 2.19 | 2.27 | 1.36 | 8.00 | 1.58 | 3.86 | 0.57 |
| 排前 | D6054-5 | 30.3 | 0.6 | 36.9 | 30.5 | 0.58 | 0.54 | 0.07 | 0.33 | 0.1 | 0.13 | 1.05 | 2.69 | 4.29 | 1.09 | 9.27 | 1.16 | 7.87 | 0.06 |
| | D6055-5 | 33.5 | 0.3 | 29.0 | 34.9 | 1.09 | 0.88 | 0.1 | 0.15 | 0.04 | 0.18 | 1.12 | 2.52 | 2.97 | 1.15 | 9.04 | 1.68 | 18.6 | 0.05 |
| | D6056-3 | 20.6 | 0.0 | 28.3 | 49.1 | 0.86 | 0.68 | 0.06 | 0.08 | 0.15 | 0.18 | 1.06 | 4.57 | 2.48 | 1.09 | 11.4 | 2.41 | 7.24 | 0.06 |

注: 样品岩性同表1。

幔标准化微量元素蛛网图(图5)上,表现为Ba、Nb、Ce、Pr、Zr明显亏损,而富Rb、Th、U、Pb、Ta、Nd、Hf元素;Rb/Sr比值变化大(0.92~6.52),大致有从店元单元、横岗单元、上店元单元、排前单元依次增高的趋势;K/Rb比值低(仅有一个样品的比值为424.5,其他均≤160)。由于部分岩石化探样品有不同程度的风化,会使岩石中铀含量有所减少,采集的全分析样品均为未风化新鲜样,分析的含量相对较准确,从分析结果来看,咸口岩体各单元的平均铀含量分别为:店元单元 18.04×10^{-6} 、横岗单元 14.94×10^{-6} 、上店元 29.36×10^{-6} 、排前单元为 16.00×10^{-6} ,咸口岩体各单元的平均铀含量为 19.55×10^{-6} ,远远高于一般的花岗岩,也远高于相山赋矿围岩(一般为 $3 \times 10^{-6} \sim 9 \times 10^{-6}$),属富铀花岗岩。

6 讨 论

6.1 构造环境

咸口岩体在大地构造背景上处于华南扬子地块和华夏地块接合带的南缘,前人对于华南印支期花岗岩形成的大地构造背景存在一定的分歧。张岳桥、董树文等^[14-17]研究认为华南在三叠纪时期,是在特提斯构造域碰撞造山作用下造成的陆内挤压褶皱及其随后的伸展变形和岩浆活动,岩浆活动主要发生在晚三叠世230~210 Ma。Zhou et al (2006)^[18]对中南半岛上的陆-陆碰撞造山作用的研究,认为陆-陆碰撞造山作用造成了华南印支早期($T_1 \sim T_2^1$)由挤压形成的同碰撞花岗岩和印支晚期($T_2^2 \sim T_3$)由局部伸展形成的晚碰撞花岗岩(滞后于

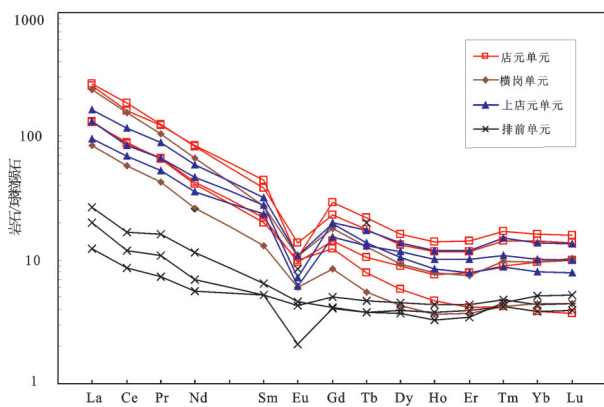


图4 咸口岩体稀土元素球粒陨石标准化配分型式图
Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns of Xiankou pluton

同碰撞约20 Ma)。Wang et al^[19-21]将华南印支期岩体划分为两个亚阶段:早期以过铝质片麻状花岗岩为主,是同构造期地壳深熔作用的产物,SHRIMP 锆石U-Pb年龄集中在230~240 Ma,这类岩体非常少;晚期岩体年龄集中在210~230 Ma,代表伸展构造环境下地壳重熔的产物。梁新权^[22-23]等认为扬子地块和华夏地块在晚二叠世—中三叠世发生了强烈的碰撞作用,晚三叠世由挤压构造转换至伸展构造,自晚二叠世开始碰撞造山作用结束。

据微量元素构造环境判别图解^[24-25],咸口岩体样品落在板内花岗岩、同碰撞花岗岩和火山弧花岗岩的交汇处附近(图6)。依据花岗岩类主量元素构造环境判别图,咸口岩体的 $SiO_2 > 70\%$ 适合于用 $Al_2O_3-SiO_2$ 图判别^[26],在其判别图(图7)上咸口岩体落入后造山构造环境,可推断咸口岩体形成于后造山构造环境。

依据花岗岩形成构造背景的主微量元素组成,综合考虑岩体的区域地质背景和时空框架^[27],笔者认为咸口岩体的形成是处于华南早中生代板内后造山构造环境之后,在伸展构造体制下形成的地壳重熔花岗岩,但有地幔物质的加入。

6.2 铀成矿作用

长期以来,相山铀矿田的成矿铀源问题争论不休。许多研究者从成矿作用、水-岩相互作用、地幔流体及围岩、矿石、蚀变矿物的同位素、微量地球化学分析,认为铀源可能来自古老铀矿床、矿田基底变质岩、相山火山-侵入杂岩体、深部地幔流体^[1-9]。邵飞在研究相山铀矿田的铀源时,认为前人的研究主要是在相山矿田内铀的“汇”聚区找铀源,而对相山

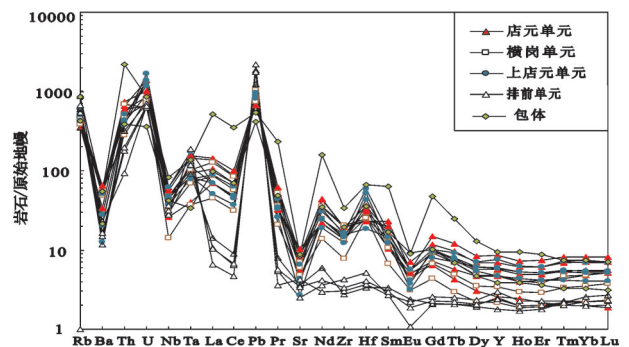


图5 咸口岩体微量元素原始地幔标准化蛛网图
Fig. 5 Primitive mantle-normalized spidergram for trace elements of Xiankou pluton

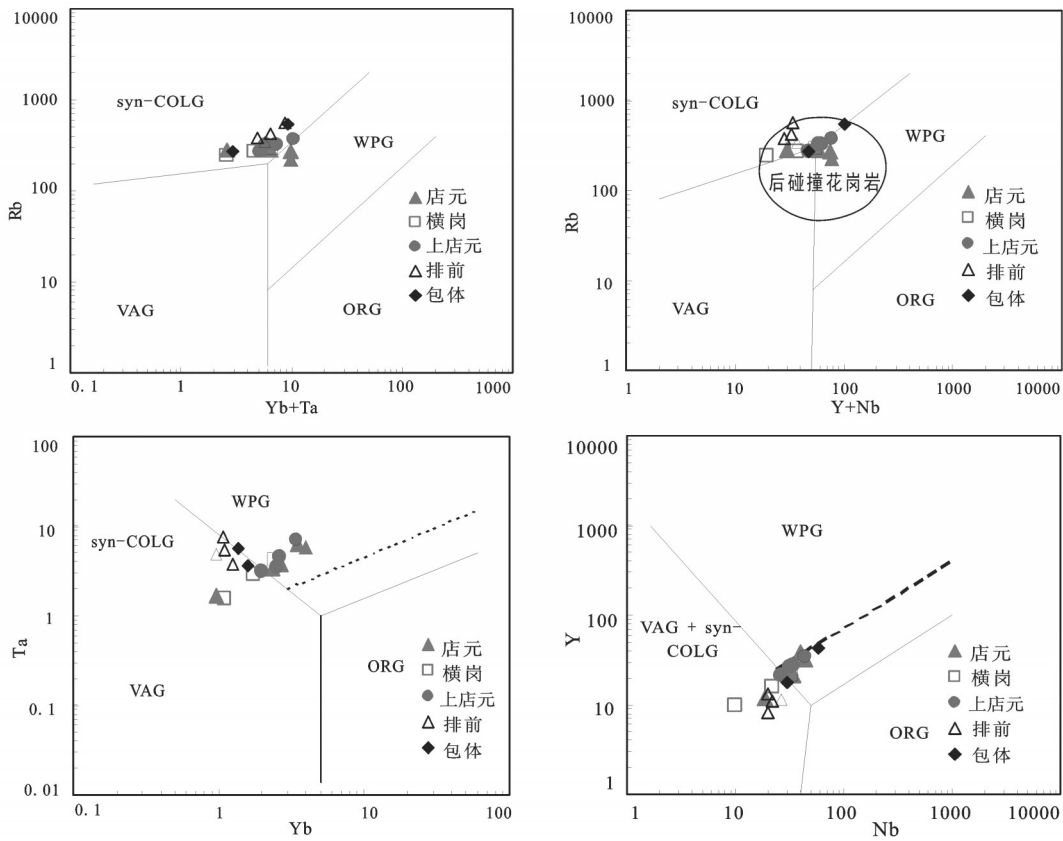
表3 咸口岩体微量元素含量(10⁻⁶)及其相关系数
Table 3 Trace element compositions (10⁻⁶) and related coefficients of Xiankou pluton

| 单元 | 店元 | | | 包体 | | | 横岗 | | | 上店元 | | | 排前 | |
|----------------------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| | T302-1 | T340-1 | D6056-5 | D6058-7 | T340-2 | T302-3 | D6054-9 | T341-1 | T210-1 | T210-2 | T340-3 | D6054-5 | D6055-5 | D6056-3 |
| La | 93.8 | 47.7 | 97.8 | 47.9 | 67.2 | 355 | 86.7 | 31.1 | 48.1 | 34.8 | 60.2 | 7.3 | 9.8 | 4.5 |
| Ce | 154.4 | 84.7 | 177.7 | 83.5 | 123 | 618 | 148.7 | 55.2 | 80.9 | 65.9 | 111 | 11.3 | 16.1 | 8.3 |
| Pr | 16.9 | 8.9 | 17.2 | 9.1 | 13.5 | 64.9 | 14.4 | 5.8 | 9.1 | 7.2 | 12.2 | 1.5 | 2.2 | 1.0 |
| Nd | 59.7 | 29 | 58.8 | 30.0 | 47.0 | 213.0 | 47.6 | 18.7 | 33.0 | 25.4 | 41.7 | 4.9 | 8.1 | 4.0 |
| Sm | 10.1 | 4.6 | 8.8 | 5.1 | 7.5 | 28.3 | 6.3 | 3.0 | 6.4 | 5.4 | 7.4 | 1.2 | 1.5 | 1.2 |
| Eu | 0.92 | 0.87 | 1.19 | 0.84 | 1.56 | 1.50 | 0.93 | 0.52 | 0.63 | 0.53 | 0.95 | 0.18 | 0.40 | 0.37 |
| Gd | 8.96 | 3.80 | 7.05 | 4.33 | 6.01 | 28.3 | 5.52 | 2.57 | 6.09 | 4.69 | 6.02 | 1.24 | 1.26 | 1.54 |
| Tb | 1.28 | 0.46 | 1.03 | 0.61 | 0.74 | 2.69 | 0.74 | 0.32 | 1.00 | 0.76 | 0.79 | 0.22 | 0.22 | 0.27 |
| Dy | 6.19 | 2.21 | 5.06 | 3.41 | 3.48 | 9.44 | 3.53 | 1.64 | 5.21 | 4.46 | 3.99 | 1.48 | 1.40 | 1.73 |
| Ho | 1.19 | 0.40 | 0.99 | 0.65 | 0.63 | 1.53 | 0.67 | 0.31 | 1.02 | 0.86 | 0.72 | 0.32 | 0.28 | 0.37 |
| Er | 3.52 | 1.03 | 2.91 | 1.97 | 1.73 | 4.22 | 1.86 | 0.93 | 2.95 | 2.50 | 1.97 | 0.97 | 0.86 | 1.09 |
| Tm | 0.61 | 0.15 | 0.51 | 0.32 | 0.24 | 0.55 | 0.35 | 0.15 | 0.53 | 0.39 | 0.31 | 0.15 | 0.16 | 0.17 |
| Yb | 4.01 | 0.96 | 3.51 | 2.37 | 1.60 | 3.66 | 2.39 | 1.09 | 3.40 | 2.52 | 2.00 | 0.96 | 1.26 | 1.08 |
| Lu | 0.60 | 0.14 | 0.52 | 0.38 | 0.23 | 0.52 | 0.39 | 0.17 | 0.51 | 0.38 | 0.30 | 0.15 | 0.20 | 0.17 |
| Y | 38.5 | 11.6 | 31.4 | 21.4 | 17.6 | 42.7 | 21.6 | 9.8 | 34.2 | 26.6 | 21.5 | 11.3 | 8.1 | 13.4 |
| REE | 362.1 | 184.8 | 383.0 | 190.5 | 274.5 | 1332 | 320.2 | 121.5 | 198.8 | 155.8 | 249.6 | 31.8 | 43.7 | 25.9 |
| δEu | 0.29 | 0.62 | 0.45 | 0.53 | 0.69 | 0.16 | 0.47 | 0.55 | 0.31 | 0.31 | 0.42 | 0.45 | 0.88 | 0.81 |
| L/H | 12.7 | 19.2 | 16.8 | 12.6 | 17.7 | 25.2 | 19.7 | 15.9 | 8.6 | 8.4 | 14.5 | 4.8 | 6.8 | 3.0 |
| (La/Yb) _n | 16.8 | 35.6 | 20 | 14.5 | 30.1 | 69.6 | 26.1 | 20.5 | 10.1 | 9.9 | 21.6 | 5.4 | 5.6 | 3.0 |
| (La/Sm) _n | 6.01 | 6.74 | 7.21 | 6.05 | 5.75 | 8.1 | 8.87 | 6.63 | 4.84 | 4.17 | 5.22 | 3.94 | 4.3 | 2.36 |
| (Gd/Yb) _n | 1.85 | 3.27 | 1.66 | 1.51 | 3.11 | 6.4 | 1.91 | 1.95 | 1.48 | 1.54 | 2.49 | 1.06 | 0.83 | 1.18 |
| Sm/Nd | 0.17 | 0.16 | 0.15 | 0.17 | 0.16 | 0.13 | 0.13 | 0.16 | 0.19 | 0.21 | 0.18 | 0.24 | 0.18 | 0.31 |
| Rb | 221.8 | 278.0 | 269.2 | 305.0 | 270.0 | 541.0 | 290.4 | 246.0 | 375.2 | 325.0 | 267.0 | 340.4 | 377.2 | 555.6 |

注:样品岩性同表1。

续表3

| 单元 | 店元 | | | 包体 | | | 横岗 | | | 上店元 | | | 排前 | | |
|-------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|--|
| | T302-1 | T340-1 | D6056-5 | D6058-7 | T340-2 | T302-3 | D6054-9 | T341-1 | T210-1 | T210-2 | T340-3 | D6054-5 | D6055-5 | D6056-3 | |
| Ba | 236.8 | 352.0 | 393.0 | 454.0 | 148.0 | 379.0 | 342.4 | 371.0 | 140.7 | 87.5 | 356.0 | 104.0 | 82.1 | 160.5 | |
| Th | 56.0 | 51.0 | 62.2 | 34.3 | 32.6 | 188.0 | 57.8 | 23.7 | 34.7 | 31.9 | 43.3 | 15.1 | 26.8 | 7.9 | |
| U | 29.19 | 13.7 | 21.01 | 19.4 | 7.58 | 18.0 | 12.99 | 16.9 | 35.37 | 28.2 | 24.5 | 13.15 | 14.98 | 13.68 | |
| Ta | 5.83 | 1.65 | 6.38 | 3.42 | 1.37 | 5.64 | 4.24 | 1.53 | 7.12 | 3.45 | 3.19 | 4.82 | 3.71 | 7.71 | |
| Nb | 39.9 | 18.6 | 43.8 | 34.7 | 29.8 | 58.7 | 33.6 | 10.1 | 44.0 | 31.8 | 26.4 | 26.2 | 20.2 | 20.1 | |
| Sr | 180.3 | 194.0 | 115.6 | 218.0 | 178.0 | 186.0 | 148.7 | 102.0 | 83.2 | 57.2 | 137.0 | 52.2 | 75.9 | 89.5 | |
| Zr | 216.7 | 150.0 | 219.3 | 151.0 | 216.0 | 374.0 | 227.0 | 86.8 | 172.9 | 136.0 | 185.0 | 48.0 | 31.0 | 33.8 | |
| Hf | 7.14 | 9.84 | 7.31 | 11.30 | 11.00 | 20.30 | 7.57 | 8.10 | 5.76 | 16.00 | 18.10 | 1.60 | 1.03 | 1.13 | |
| Ga | 22.1 | 17.4 | 19.8 | 16.8 | 17.7 | 28.2 | 17.6 | 10.4 | 19.5 | 15.5 | 16.8 | 15.8 | 16.1 | 18.9 | |
| Ni | 4.9 | 7.2 | 4.7 | 4.9 | 14.7 | 13.0 | 6.1 | 5.6 | 5.1 | 6.9 | 5.4 | 3.3 | 3.0 | 3.6 | |
| V | 26.0 | 30.4 | 37.6 | 20.1 | 65.1 | 74.3 | 34.9 | 8.1 | 25.5 | 20.9 | 21.3 | 2.2 | 5.2 | 6.0 | |
| Cr | 18.3 | 12.5 | 20.4 | 6.5 | 22.4 | 25.0 | 21.1 | 6.9 | 20.5 | 10.5 | 7.1 | 12.9 | 13.4 | 12.8 | |
| Co | 4.83 | 4.91 | 5.70 | 3.59 | 13.20 | 14.70 | 5.04 | 2.45 | 4.42 | 4.14 | 3.76 | 0.80 | 1.15 | 0.92 | |
| Sc | 6.06 | 5.29 | 7.59 | 5.54 | 9.45 | 15.50 | 6.51 | 2.01 | 7.96 | 4.84 | 4.51 | 3.11 | 1.81 | 1.58 | |
| Cu | 8.8 | 7.3 | 20.5 | 10.2 | 94.6 | 27.1 | 22 | 22.2 | 9.6 | 7.8 | 6.0 | 6.8 | 30.4 | 7.4 | |
| Pb | 47.4 | 64.0 | 57.3 | 64.9 | 29.5 | 38.0 | 52.4 | 73.1 | 67.8 | 59.1 | 58.5 | 131.7 | 86.5 | 156.2 | |
| Zn | 49.7 | 62.7 | 58.1 | 40.2 | 96.3 | 118 | 53.6 | 44.4 | 47.2 | 61.7 | 64.7 | 20.8 | 14.1 | 8.8 | |
| Rb/Sr | 1.23 | 1.43 | 2.33 | 1.40 | 1.52 | 2.91 | 1.95 | 2.41 | 4.51 | 5.68 | 1.95 | 6.52 | 4.97 | 6.21 | |
| Ba/Sr | 1.31 | 1.81 | 3.40 | 2.08 | 0.83 | 2.04 | 2.30 | 3.64 | 1.69 | 1.53 | 2.60 | 1.99 | 1.08 | 1.79 | |
| K/Rb | 114.5 | 157.4 | 121.8 | 129.3 | 57.2 | 57.24 | 135.2 | 160 | 103.8 | 103.4 | 152.3 | 121.2 | 124.8 | 120.4 | |
| Rb/Nb | 5.57 | 14.95 | 6.15 | 8.79 | 9.06 | 9.22 | 8.65 | 24.36 | 8.53 | 10.22 | 10.11 | 12.98 | 18.65 | 27.6 | |
| Sr/Y | 4.69 | 16.72 | 3.69 | 10.19 | 10.11 | 13.29 | 6.88 | 10.43 | 2.43 | 2.15 | 6.37 | 4.63 | 9.32 | 6.67 | |



Syn-COLG-同碰撞花岗岩; VAG-火山弧花岗岩; WPG-板内花岗岩; ORG-洋脊花岗岩

图6 花岗岩微量元素构造环境判别图解(据文献[24,25])

Fig. 6 Trace element tectonic discrimination diagrams of Xiankou pluton (after references [24,25])

铀源的研究上要跳出相山,要从区域地质—地球化学、区域成矿物质的时空历史演化方面进行分析才可能得出正确的判断^[9-10]。咸口富铀岩体的发现为相山铀矿田区域成矿物质来源提供了证据。

在华南许多产铀花岗岩为印支期花岗岩,并作为燕山晚期铀成矿作用的铀源^[28],咸口岩体与相山火山-侵入杂岩体在地表相距不到2 km,完全有可能为后期相山的大规模铀成矿提供铀源。另外相山铀矿田是否也具有与白面石铀矿和俄罗斯红石铀矿类似的变质岩与富铀花岗岩双基底有待进一步深入研究。咸口岩体的厘定为这一问题提供了一定的思路和支撑;咸口岩体可能仅是相山南部印支期富铀花岗岩体出露地表的一个窗口,在地下有可能存在一个大的印支期富铀花岗岩基底,在燕山期岩浆热液活动时,富铀花岗岩中的铀被活化、迁移而富集成矿。

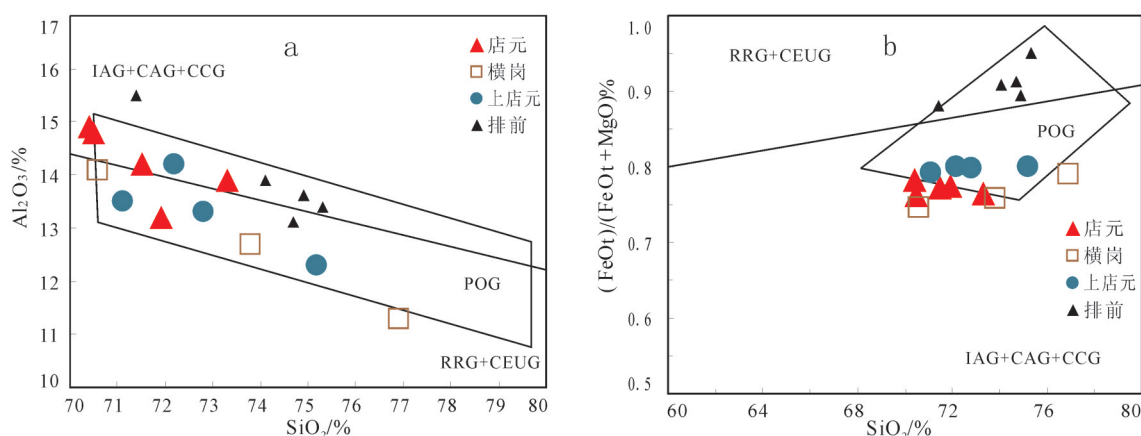
咸口岩体处于火山岩型铀成矿带与花岗岩型

铀成矿的交接部位,这一富铀岩体的存在,为在相山矿田南部外围咸口一招携一带寻找花岗岩型铀矿提供丰富的想象空间,并且在咸口岩体附近的罗山原已勘查发现了一小型铀矿床,因此在相山南部很有希望取得花岗岩型铀矿找矿的突破。

7 结论

(1)相山南部存在一套印支期富铀咸口岩体,为一复式花岗岩序列,具块状构造,具似斑状结构(除排前单元外),斑晶成分主要为钾长石(条纹长石),斑晶颗粒大,基质主要由钾长石、斜长石、石英、黑云母组成,粒径细粒—中粗粒;排前单元具碱性花岗岩特征;在店元单元和上店元单元中可见有岩浆混合形成的微粒—细粒闪长岩包体、富云包体。

(2)咸口岩体具富硅,高钾,弱过铝质,属高钾钙碱性系列;稀土元素配分型式具右倾斜特征,富轻稀土,轻稀土分馏比重稀土明显,铀亏损明显;微



IAG-岛弧花岗岩类;CAG-大陆弧花岗岩类;CCG-大陆碰撞花岗岩类;POG-后造山花岗岩类;RRG-与裂谷有关的花岗岩类;CEUG-与大陆的造陆抬升有关的花岗岩类

图7 咸口岩体主量元素构造环境判别图(据参考文献[26])

Fig. 7 Major element tectonic discrimination diagrams of Xiankou pluton (after reference [26])

量元素 Nb、Ce、Pr、Zr、Ba 明显亏损,而 Rb、Th、U、Pb、Ta、Nd、Hf 元素富集;Rb/Sr 比值变化大;岩体平均铀含量为 19.55×10^{-6} ,为板内后造山构造环境下形成的富铀花岗岩体。

(3) 咸口岩体铀的富集可能为相山矿田铀的大规模成矿打下前期准备,也可为后期成矿直接提供铀源。咸口富铀岩体的存在,为在相山南部寻找花岗岩型铀矿取得突破提供有利依据。

致谢: 本文在“江西 1:5 万 陀上、鹿冈、乐安县幅区域地质调查”和“相山火山盆地深部地质调查”2 项目组成员的帮助下完成,审稿专家及编辑部老师对论文提出了许多宝贵的修改意见,在此一并表示衷心感谢。

参考文献(References):

- [1] Chen Zhaobo. "Double mixing" genetic model of uranium deposition in volcanic rocks and relationship between China's Mesozoic vein-type Uranium deposits and Pacific plate tectonics, Metallogensis of Uranium[C]. Proceedings of the 26th IGC, Geoinstitute, Beograd, 1981.
- [2] 李学礼, 孙占学, 周文斌. 古水热系统与铀成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 2000.
Li Xueli, Sun Zhanxue, Zhou Wenbin. Ancient Hydrothermal Systems and Uranium Mineralization[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000 (in Chinese).
- [3] 邵飞. 相山矿田低温热水及其与铀矿化关系[J]. 地球科学, 2005, 30(2):206-210.
Shao Fei. Low-temperature hot-water in Xiangshan orefield and its relation with uranium mineralization[J]. Earth Science, 2005,

30(2):206-210(in Chinese with English abstract).

- [4] 杜乐天. 中国热液铀矿基本成矿规律和一般热液成矿学[M]. 北京: 原子能出版社, 2001.
Du Letian. Chinese Hydrothermal Uranium Mineralization Basic Regularity and General Hydrothermal Metallogeny[M]. Beijing, Atomic Energy Press, 2001(in Chinese).
- [5] 毛景文, 李晓峰, 张荣华, 等. 深部流体成矿系统[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
Mao Jingwen, Li Xiaofeng, Zhang Ronghua, et al. Deep Fluid Metallogenic System[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005 (in Chinese).
- [6] 陈繁荣, 沈渭洲, 王德滋, 等. 1220 铀矿田同位素地球化学及矿床成因研究[J]. 大地构造与成矿学, 1990, 14(1):69-77.
Chen Fanrong, Shen Weizhou, Wang Dezi, et al. Isotopic geochemistry of uranium ore-field NO.1220 and the implication to ore genesis[J]. Geotectonica et Metallogenia, 1990, 14(1): 69-77 (in Chinese with English abstract).
- [7] 范洪海, 凌洪飞, 王德滋, 等. 江西相山铀矿田成矿物质来源的 Nd、Sr、Pb 同位素证据[J]. 高校地质学报, 2001, 7(2):139-145.
Fan Honghai, Ling Hongfei, Wang Dezi, et al. Ore-forming material sources for Xiangshan uranium ore-field in Jiangxi Province: Evidence from Nd- Sr- Pb Isotopes[J]. Geological Journal of China Universities, 2001, 7(2): 139- 145(in Chinese with English abstract).
- [8] 孙占学. 相山铀矿田铀源的地球化学证据[J]. 矿物学报, 2004, 24(1): 19-24.
Sun Zhanxue. Uranium sources of the Xiangshan uranium ore-field: Geochemical evidence[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2004, 24(1):19-24(in Chinese with English abstract).
- [9] 邵飞, 陈晓明, 徐恒力, 等. 相山铀矿田成矿物质来源探讨[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2008, 31(1): 39-44.

- Shao Fei, Cheng Xiaoming, Xu Hengli, et al. Discussion of metallogenic substance source of Xiangshan uranium orefield[J]. Journal of East China Institute of Technology, 2008, 31(1): 39-44 (in Chinese with English abstract).
- [10] 邵飞. 水-岩相互作用及其与铀成矿关系研究——以相山铀矿田为例[D]. 湖北: 中国地质大学, 2007.
- Shao Fei. Study on Water-Rock Interaction and Its Relation with Uranium Metallogenesis: A Case Study in Xiangshan Uranium Orefield[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2007 (in Chinese with English abstract).
- [11] 张家诚, 李文范. 地学基本数据手册[M]. 北京: 海洋出版社, 1986.
- Zhang Jiachen, Li Wenfan. The Basic Data Manual to Geoscience[M]. Beijing: China Ocean Press, 1986 (in Chinese).
- [12] 路远发. GeoKit: 一个用VBA构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 2004, 33(5): 459-464.
- Lu Yuanfa. GeoKit——A Geochemical Toolkit for Microsoft excel[J]. Geochimica, 2004, 33(5): 459-464 (in Chinese with English abstract).
- [13] Chappell B W. Aluminum saturation in I- and S-type granite and the characterization of fractionated haplogranite[J]. Lithos, 1999, 46: 535-551.
- [14] 张岳桥, 徐先兵, 贾东, 等. 华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录[J]. 地学前缘, 2009, 16(1): 234-247.
- Zhang Yueqiao, Xu Xianbing, Jia Dong, et al. Deformation record of the change from Indosinian collision-related tectonic system to Yanshanian subduction-related tectonic system in South China during the Early Mesozoic[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(1): 234-247 (in Chinese with English abstract).
- [15] 张岳桥, 董树文, 李建华, 等. 华南中生代大地构造研究新进展[J]. 地球学报, 2012, 33(3): 257-279.
- Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Li Jianhua, et al. The new progress in the study of Mesozoic tectonic of south China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2012, 33(3): 257-279 (in Chinese with English abstract).
- [16] 徐先兵, 张岳桥, 贾东, 等. 华南早中生代大地构造过程[J]. 中国地质, 36(3): 573-593.
- Xu Xianbing, Zhang Yueqiao, Jia Dong, et al. Early Mesozoic geotectonic processes in South China[J]. Geology in China, 2009, 36(3): 573-593 (in Chinese with English abstract).
- [17] 董树文, 施炜, 张岳桥, 等. 大巴山晚中生代陆内造山构造应力场[J]. 地球学报, 2010, 31(6): 769-780.
- Dong Shuwen, Shi Wei, Zhang Yueqiao, et al. The tectonic stress field in the Dabashan orogen resulting from Late Mesozoic intra-continental orogeny[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2010, 31(6): 769-780 (in Chinese with English abstract).
- [18] Zhou X M, Sun T, Shen W Z, et al. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution [J]. Episodes, 2006, 29 (1): 26-33.
- [19] Wang Yuejun, Fan Weiming, Guo Feng, et al. U-Pb dating of early Mesozoic granodioritic intrusions in southeastern Hunan Province, South China and its petrogenetic implications[J]. Science in China(Series D), 2002, 45(3): 280-288.
- [20] Wang Yuejun, Fan Weiming, Liang Xinquan, et al. SHRIMP zircon U-Pb geochronology of Indosinian granites in Hunan Province and its petrogenetic implications[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(13): 1395-1403.
- [21] Wang Y J, Fan W M, Sun M, Liang X Q, et al. Geochronological, geochemical and geothermal constraints on petrogenesis of the Indosinian peraluminous granites in the South China Block: A case study in the Hunan Province[J]. Lithos, 2007, 96(3-4): 475-502.
- [22] 梁新权, 李献华, 丘元禧, 等. 华南印支期碰撞造山——十万大山盆地构造和沉积学证据[J]. 大地构造与成矿学, 2005, 29(1): 99-112.
- Liang Xinquan, Li Xianhua, Qu Yuanxi, et al. Indosinian Collisional Orogeny: Evidence from Structural and Sedimentary Geology in Shiwandashan Basin, South China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2005, 29(1): 99-112 (in Chinese with English abstract)
- [23] Liang X Q, Li X H. Late Permian to Middle Triassic sedimentary records in Shiwandashan Basin: Implication for the Indosinian Yunkai Orogenic Belt, South China[J]. Sediment Geol., 2005, 177: 297-320.
- [24] Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. J Petrology, 1984, 25: 956-983.
- [25] Pearce J A. Source and settings of granitic rocks[J]. Episodes, 1996, 19: 120-125.
- [26] Maniar P D and Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geol. Soc. Am. Bull., 1989, 101: 635-643.
- [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 Qinghui, Deng Zhenfu, Ma Daqian, et al. Granite Research Thinking and Method[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002 (in Chinese).
- [28] 陈培荣. 华南东部中生代岩浆作用的动力学背景及其与铀成矿关系[J]. 铀矿地质, 2004, 20(5): 266-270.
- Chen Peirong. Geodynamic setting of Mesozoic magmatism and its relationship to uranium metallogenesis in southeastern China[J]. Uranium Geology, 2004, 20(5): 266-270 (in Chinese with English abstract).