

# 北秦岭蓝田铀矿田产铀岩体的地球化学特征 及其对成矿的制约

陈佑纬,董少花,毕献武,胡瑞忠

(中国科学院地球化学研究所矿床国家重点实验室,贵州 贵阳 55002)

**摘要:** 牧护关岩体西部的二长花岗岩赋存着北秦岭最著名的花岗岩型铀矿田——蓝田铀矿田。笔者对该花岗岩开展了系统的元素地球化学研究,其结果显示牧护关二长花岗岩为富硅、富钾、富碱和高分异过铝质花岗岩;微量元素特征是花岗岩相对于原始地幔具有富集大离子元素 Rb、U、La、Nd、Sm,亏损 Ba、Sr、P、Ti 等特征;稀土元素分配模式为轻稀土富集的右倾型。铀矿石与二长花岗岩具有相似的稀土元素特征,暗示铀矿床的成矿物质可能主要来源于二长花岗岩。尽管牧护关二长花岗岩的 U 含量远低于一般产铀岩体,但铀在其中主要以活性的晶质铀矿形式存在,也能被活化迁移继而成矿。晶质铀矿形式存在的铀可能在花岗岩铀成矿中起着更重要的作用。

**关键词:** 晶质铀矿;地球化学;牧护关二长花岗岩;蓝田铀矿;北秦岭

中图分类号:P595

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2015)02-0084-11

## Geochemical Characteristics of Uranium-bearing Granite in Lantian Uranium Ore Field of North Qinling and Its Constraints on Uranium Mineralization

CHEN Youwei, DONG Shaohua, BI Xianwu, HU Ruizhong

(State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry,  
Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China)

**Abstract:** Lantian uranium ore field, as the most famous granitic-type uranium ore field in the north Qinling area, lies in the monzogranite of west Muhuguan granitic pluton. Systematic element geochemistry studies were carried out on the Muhuguan monzogranite by the authors. The results show that the Muhuguan monzogranite is highly rich in silicon, potassium, alkaline and differentiation peraluminous. In terms of trace elements, granite is richer in LILE such as Rb, U, La, Nd, Sm and deficient in Ba, Sr, P, Ti compared with primitive mantle. The distribution pattern of rare earth elements are rightward oblique with LREE enrichment. The uranium ore has similar REE characteristics with the monzogranite, suggesting that metallogenic material of the uranium deposit might come from the monzonitic granite. Although uranium content of the Muhuguan monzogranite is much lower than that of the general uranium-bearing granitic pluton, u-

收稿日期:2014-12-10;修回日期:2015-03-03

基金项目:国家自然科学基金“矿床地球化学国家重点实验室 125 项目群”(41103027,41473049)联合资助

作者简介:陈佑纬(1983-),男,副研究员,长期从事矿床地球化学工作。E-mail:chenyouwei@mail.gyig.ac.cn

uranium exists in Muhuguan monzogranite in the form of active uraninite, which can be activated to migrate and then mineralize. Uranium, which exists in the form of uraninite, may play a more important role in the mineralization of granitic-type uranium deposits.

**Key words:** uraninite; geochemistry; Muhuguan monzogranite; Lantian uranium deposit; north Qinling

秦岭造山带是中国境内重要的造山带之一,区内花岗岩类分布广泛,类型齐全,与花岗岩有关的成矿作用非常显著。已发现有各类矿化的岩体近百个,分布在不同的构造带中,并且形成一定的密集区,构成一定的成矿带或成矿区,发育了众多钼、钨、金、铜、铀、铅、锌、稀有金属等大型矿床,使秦岭造山带成为我国著名的贵金属和有色金属成矿带——“中部金属成矿带”。秦岭地处祁连-秦岭铀成矿省的东部,虽然规模不及已探明资源最丰富的华南铀矿省,但其内也赋存了许多铀矿床,铀资源储量也十分可观。其中花岗岩型铀矿由于成矿规模最大,易于冶炼,交通条件也较好,铀矿埋深较浅等特点,因此最有利于开发利用,其工业价值居全区之首(彭大明,1999)。

由于华南地区热液铀矿床较为集中及其成矿类型多样性等因素,以往对花岗岩型铀矿床的研究多集中于华南地区,而对于秦岭地区的花岗岩型铀矿床研究仍十分薄弱,特别是其成矿物质来源、成岩成矿年代、矿床成因等方面仍存在许多争议。因此,对秦岭地区花岗岩型铀矿床开展地球化学研究,对于提高秦岭地区花岗岩型铀矿床的认识水平,以及丰富发展热液铀成矿理论均有重要的意义。

蓝田铀矿田是秦岭成矿带重要的花岗岩型铀矿田,也是目前该成矿带研究程度相对较高,探明资源量最大的铀矿田。自发现该矿田以来,研究人员对蓝田铀矿田的铀矿化特征、控矿构造及矿化蚀变围岩等方面开展了较多工作(胡俊祯,1981;张聚杰等,1981;刘埃平等,2000;肖国贤等,2005;王江波等,2013;杨正坤,2013),而对蓝田铀矿相关的产铀岩体的研究多侧重于岩石学特征及成岩时代等工作(丁丽雪等,2010;王晓霞等,2011;王江波等,2013;刘锐等,2014),而对新鲜花岗岩元素地球化学特征及其铀成矿潜力的相关研究较少。这极大地制约了对该矿床的认识。因此,笔者将以该矿床相关的产铀花岗岩-牧护关二长花岗岩为研究对象,开展元素地球化学研究,并将其与华南著名的产铀花岗岩体-下庄花岗岩进行对比,探讨蓝田铀矿床的产

铀岩体元素地球化学特征及其对铀成矿的制约。

## 1 地质背景

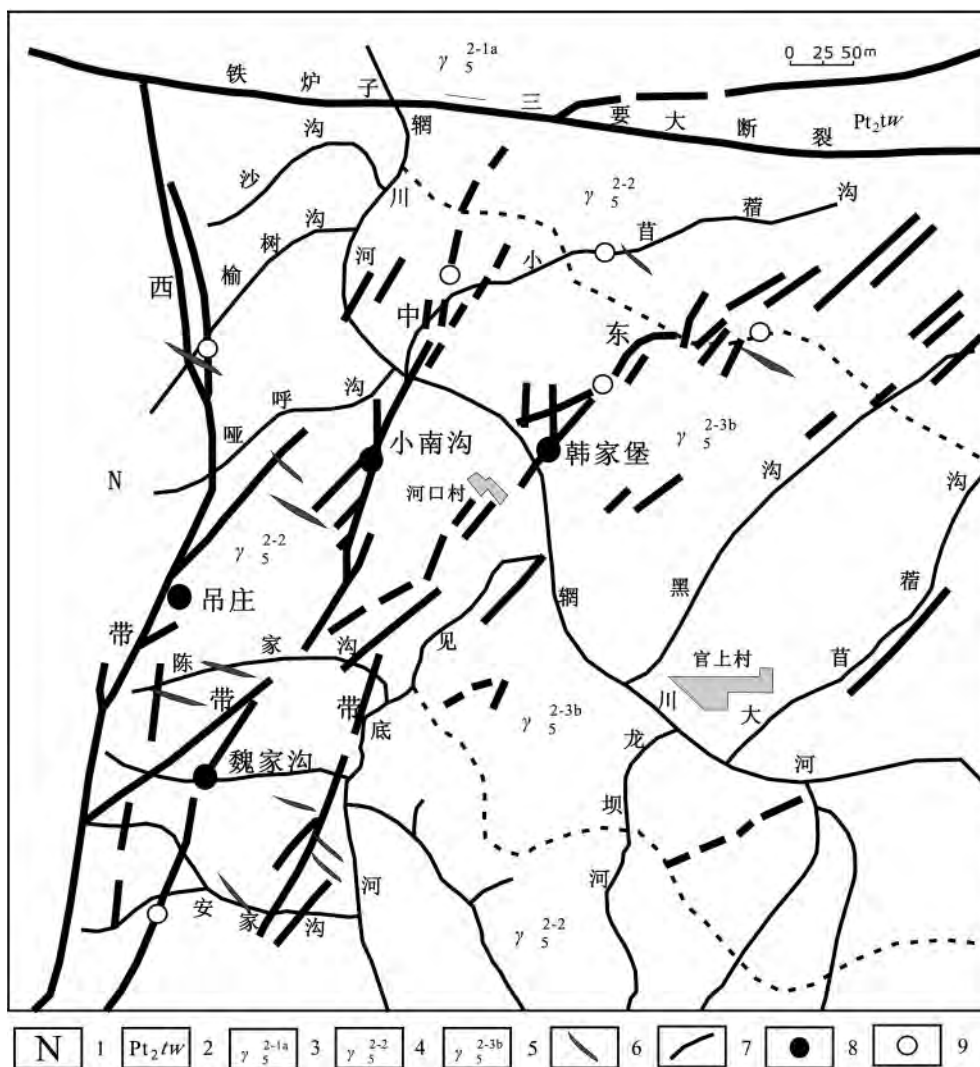
蓝田铀矿田大地构造位置处于华北地台南缘北秦岭构造带中段,近北西西向北秦岭构造带与北东向华山-蓝田-宁陕印支-燕山期岩浆岩带交汇区的牧护关岩体西北部边缘,属于莽岭-牧护关燕山期铜铁多金属成矿带。

蓝田铀矿田包括魏家沟、小南沟、韩家堡和吊庄4个矿床,面积12 km<sup>2</sup>,其矿床地质条件和矿化特征基本相同,矿床间距仅1~2 km,就整个矿田而言是一个中等品位、中等规模、采冶条件良好的花岗岩型铀矿(图1)。

铀矿床分布明显受此断裂带控制,其中北东向、北北东向断裂成为控矿或赋矿构造;而北西向、东西向断裂不发育,与铀矿化的关系不明显。铀矿化主要发育在断裂构造的破碎或碎裂部,矿田内所有矿体规模、形态严格受断裂构造制约。矿石矿物主要为沥青铀矿,还有少量铀黑、硅钙铀矿等;脉石矿物主要有石英、方石、萤石方铅矿,白铁矿等。矿石以碎裂结构,微粒浸染状结构为主,角砾状结构,脉状网脉状构造(张聚杰等,1981;刘埃平等,2000;王江波等,2013)。铀矿床主要赋存在牧护关岩体西北部的二长花岗岩中。

牧护关为中粗粒似斑状花岗闪长岩基,分布在岩体的西南部,出露面积约73 km<sup>2</sup>;第二次为中粗粒二长花岗岩基,构成复式岩基的主体,出露面积约150 km<sup>2</sup>;第三次为中细粒富黑云母花岗岩株,分布在岩体中部毛嘴山一带。在矿田内已发现的4个铀矿床均产于牧护关岩体的西北端第二次主侵入体燕山期肉红色、灰白色似斑状中粒二长花岗岩中(杨正坤,2013;王江波等,2013)。

本次研究选取401矿田的赋矿围岩——牧护关岩体中黑云母二长花岗岩为研究对象,开展元素地球化学研究。



1. 古近—新近系砂砾岩; 2. 中元古界陶湾群; 3. 燕山期蓝田花岗岩; 4. 牧护关补体分布区黑云母二长花岗岩; 5. 牧护关第二主体二长花岗岩; 6. 基性岩脉; 7. 断裂带; 8. 铀矿床; 9. 铀矿点

图1 蓝田铀矿田地质简图(据肖国贤等, 2005)

Fig 1 Geology sketch map of Lantian uranium ore field

## 2 岩石学特征

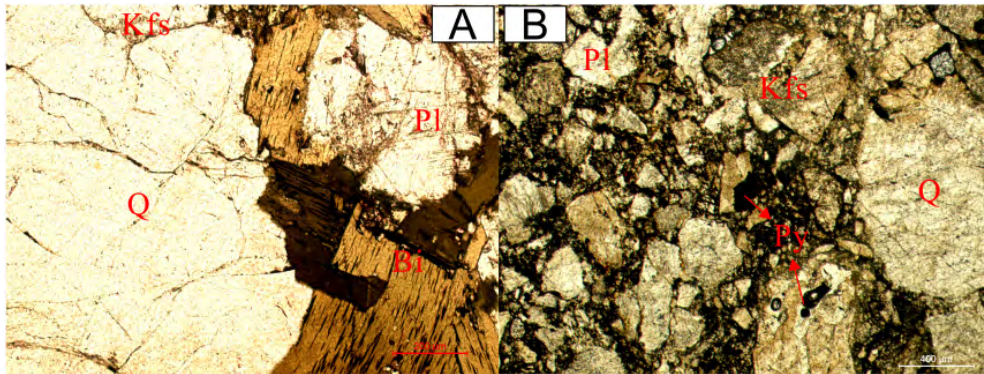
花岗岩采自矿区 104 矿床新鲜围岩及钻孔岩心, 岩性为中粗—中粗粒二长花岗岩, 粒度一般为 2~5mm。岩体呈灰白色, 淡肉红色, 似斑状结构, 块状构造; 主要矿物为钾长石、斜长石、石英以及少量黑云母(图 2A)。其中, 钾长石为微斜长石和条纹长石, 含量约为 23%~35%; 斜长石多为板状他形, 含量约为 30%~40%; 石英多为他形小颗粒, 含量约 30%~35%; 黑云母多呈黑褐色, 片状, 常在其内部及边缘伴生小颗粒石英, 含量约为 3%~5%; 副矿物有锆石、石榴子石、榍石、独居

石、磁铁矿、晶质铀矿及少量铀钍石。花岗岩普遍受到钾化、轻微白云母化、绿泥石化、高岭土化等蚀变。

矿石样品采自 104 矿区六、八中段, 矿石属于碎裂蚀变岩型(图 2B), 整体呈红化型矿石, 以赤铁矿—水云母—沥青铀矿组合为特点, 铀矿物为沥青铀矿, 其次是铀石, 呈浸染状和微脉浸染状分布在碎裂蚀变岩中; 脉石矿物主要有石英, 长石, 水云母, 赤铁矿及黏土矿物等。

## 3 分析方法

花岗岩的主量元素分析采用 X-射线荧光法,



Q. 石英; Bi. 黑云母; Kfs. 钾长石; Pl. 斜长石; Py. 黄铁矿  
图 2 花岗岩及矿石样品显微照片(A 为二长花岗岩, B 为碎裂蚀变岩型矿石)

Fig. 2 Micrograph of the granite and ore sample

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 X-射线荧光光谱实验室完成, 仪器型号为 Axios(PW4400), 分析误差小于 3%。

岩石及矿石样品的微量元素和稀土元素测试在中国科学院地球化学研究所矿床国家重点实验室 ICP-MS 分析室完成, 在 Perkinelmen 公司 ELAN DRc-e 型高分辨等离子质谱仪上进行, 精度高于 5%。

## 4 地球化学特征

### 4.1 主量元素特征

二长花岗岩的主量元素分析结果见表 1。由表 1 可知, 岩石化学成分主要有以下特征。①二长花岗岩具有较高的 SiO<sub>2</sub> 含量(72.91%~76.53%)和 K<sub>2</sub>O 含

量(4.04%~4.64%), 全碱含量 ALK(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)=7.28%~8.3%, K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O>1.2; 在 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 判别图上(图 3), 岩石在高钾钙碱性系列之中。可以看出二长花岗岩具有富硅、富碱和富钾的特点。这些特点均与华南著名的产铀岩体下庄二云母花岗岩相似。②在 ACNK-A/NK 关系图上(图 4), 二长花岗岩的铝饱和指数 ACNK>1, 部分样品的 ACNK>1.1, 同时其 TFeO/(TFeO+MgO) 值较低(0.73~0.91), 具有过铝质花岗岩的特征。③在主要氧化物的 Harker 图解上(图 5), 二长花岗岩的 SiO<sub>2</sub> 与 TiO<sub>2</sub>、TFeO、MgO、CaO、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TFMM(TiO<sub>2</sub>+TFeO+MgO+MnO) 等都具很好的负相关趋势, 说明二长花岗岩的富钙斜长石、辉石、磷灰石及钛铁矿等矿物的分离结晶作用明显。

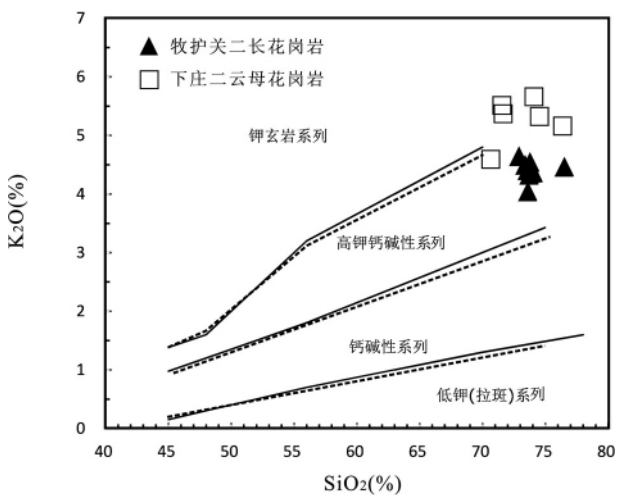


图 3 花岗岩 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 判别图解(底图据 Collsin et al., 1982)

Fig. 3 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O diagram of granites

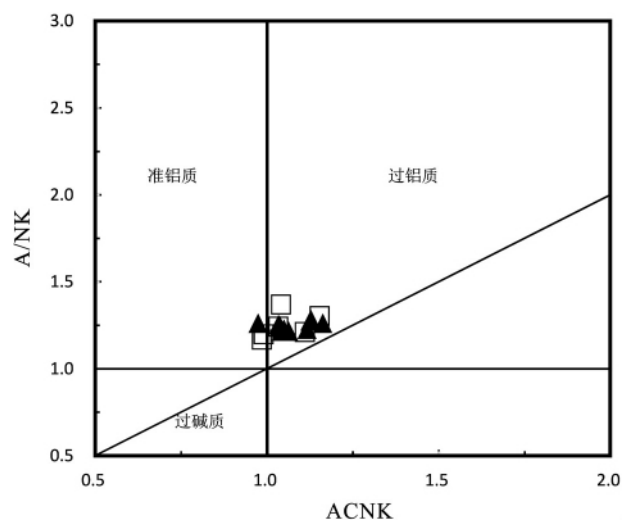


图 4 花岗岩 ACNK-A/NK 图解(图例同图 3)

Fig. 4 ACNK-A/NK diagram of granites

表1 花岗岩的主要元素成分表(%)

Tab. 1 The major composition of the granites

| 岩体名称                               | 牧护关二长花岗岩 |        |         |        |        |        |        |       |        |       | 下庄二云母花岗岩 |       |        |        |        |       |  |  |  |  |
|------------------------------------|----------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|----------|-------|--------|--------|--------|-------|--|--|--|--|
|                                    | YX-1     | YX-2   | YX-3    | YX-4   | YX-5   | MHG-1  | MHG-2  | MHG-3 | MHG-4  | XZ-01 | XZ-02    | XZ-03 | XZ-04  | XZ-05  | XZ-07  | XZ-11 |  |  |  |  |
| SiO <sub>2</sub>                   | 73.74    | 73.74  | 76.53   | 73.58  | 73.39  | 72.91  | 73.61  | 73.79 | 74.05  | 71.56 | 71.65    | 70.67 | 74.1   | 76.39  | 74.54  |       |  |  |  |  |
| TiO <sub>2</sub>                   | 0.08     | 0.1    | 0.09    | 0.11   | 0.11   | 0.08   | 0.09   | 0.1   | 0.1    | 0.21  | 0.25     | 0.32  | 0.14   | 0.1    | 0.12   |       |  |  |  |  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 12.85    | 12.84  | 12.72   | 12.68  | 12.72  | 13.53  | 12.23  | 13.76 | 13.28  | 13.6  | 13.72    | 13.86 | 14.24  | 12.6   | 12.91  |       |  |  |  |  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 1.15     | 1.46   | 1.31    | 1.97   | 1.46   | 1.57   | 1.39   | 1.26  | 1.45   | 0.21  | 0.22     | 0.39  | 0.22   | 0.21   | 0.19   |       |  |  |  |  |
| FeO                                | —        | —      | —       | —      | —      | —      | —      | —     | —      | 2     | 2.16     | 2.61  | 1.74   | 1.5    | 1.56   |       |  |  |  |  |
| MnO                                | 0.05     | 0.08   | 0.07    | 0.11   | 0.11   | 0.05   | 0.08   | 0.11  | 0.06   | 0.05  | 0.05     | 0.05  | 0.04   | 0.03   | 0.04   |       |  |  |  |  |
| MgO                                | 0.16     | 0.27   | 0.18    | 0.17   | 0.21   | 0.16   | 0.47   | 0.23  | 0.21   | 0.43  | 0.55     | 0.8   | 0.32   | 0.18   | 0.25   |       |  |  |  |  |
| CaO                                | 0.97     | 1.15   | 0.47    | 0.82   | 0.96   | 0.59   | 1.57   | 1.28  | 0.75   | 1.21  | 1.31     | 1.75  | 0.77   | 0.51   | 1.12   |       |  |  |  |  |
| Na <sub>2</sub> O                  | 3.53     | 3.41   | 3.2     | 3.45   | 3.41   | 3.66   | 3.24   | 3.69  | 3.46   | 3.04  | 3.44     | 3.14  | 2.93   | 2.94   | 3.23   |       |  |  |  |  |
| K <sub>2</sub> O                   | 4.32     | 4.33   | 4.46    | 4.4    | 4.49   | 4.64   | 4.04   | 4.54  | 4.36   | 5.51  | 5.37     | 4.59  | 5.66   | 5.16   | 5.32   |       |  |  |  |  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>      | 0.039    | 0.042  | 0.035   | 0.037  | 0.037  | 0.039  | 0.032  | 0.04  | 0.034  | 0.09  | 0.11     | 0.13  | 0.13   | 0.04   | 0.05   |       |  |  |  |  |
| LOI                                | 1.34     | 1.75   | 1.06    | 1.06   | 1.3    | 1.09   | 2.37   | 1.09  | 0.66   | 1.08  | 1.2      | 1.3   | 1.04   | 0.57   | 1.35   |       |  |  |  |  |
| Total                              | 98.229   | 99.172 | 100.125 | 98.387 | 98.197 | 98.319 | 99.122 | 99.89 | 98.414 | 98.99 | 100.03   | 99.61 | 101.33 | 100.23 | 100.68 |       |  |  |  |  |
| K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O | 1.22     | 1.27   | 1.39    | 1.28   | 1.32   | 1.27   | 1.25   | 1.23  | 1.26   | 1.81  | 1.56     | 1.46  | 1.93   | 1.76   | 1.65   |       |  |  |  |  |
| ACNK                               | 1.05     | 1.04   | 1.16    | 1.06   | 1.04   | 1.12   | 0.97   | 1.03  | 1.13   | 1.03  | 0.99     | 1.04  | 1.15   | 1.11   | 0.98   |       |  |  |  |  |
| A/NK                               | 1.23     | 1.25   | 1.26    | 1.22   | 1.22   | 1.23   | 1.26   | 1.25  | 1.28   | 1.24  | 1.20     | 1.37  | 1.30   | 1.21   | 1.17   |       |  |  |  |  |
| Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O | 7.85     | 7.74   | 7.66    | 7.85   | 7.90   | 8.30   | 7.28   | 8.23  | 7.82   | 8.55  | 8.81     | 7.73  | 8.59   | 8.10   | 8.55   |       |  |  |  |  |
| TFeO                               | 1.04     | 1.31   | 1.18    | 1.77   | 1.31   | 1.41   | 1.25   | 1.13  | 1.31   | 2.19  | 2.36     | 2.96  | 1.94   | 1.69   | 1.73   |       |  |  |  |  |
| TTMM                               | 2.20     | 2.78   | 1.86    | 2.80   | 2.52   | 2.20   | 3.32   | 2.68  | 2.30   | 3.92  | 4.33     | 5.64  | 3.16   | 2.42   | 3.15   |       |  |  |  |  |
| DI                                 | 92.51    | 91.05  | 93.70   | 91.98  | 92.02  | 93.13  | 89.34  | 90.85 | 92.24  | 88.47 | 88.06    | 83.53 | 90.31  | 92.85  | 91.01  |       |  |  |  |  |

注:下庄岩体数据引自刘埃平等(2000),ACNK = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO + Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O)分子数比,A/NK = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O),TEMM = (TFeO + MnO + MgO + TiO<sub>2</sub>),DI为分异指数。

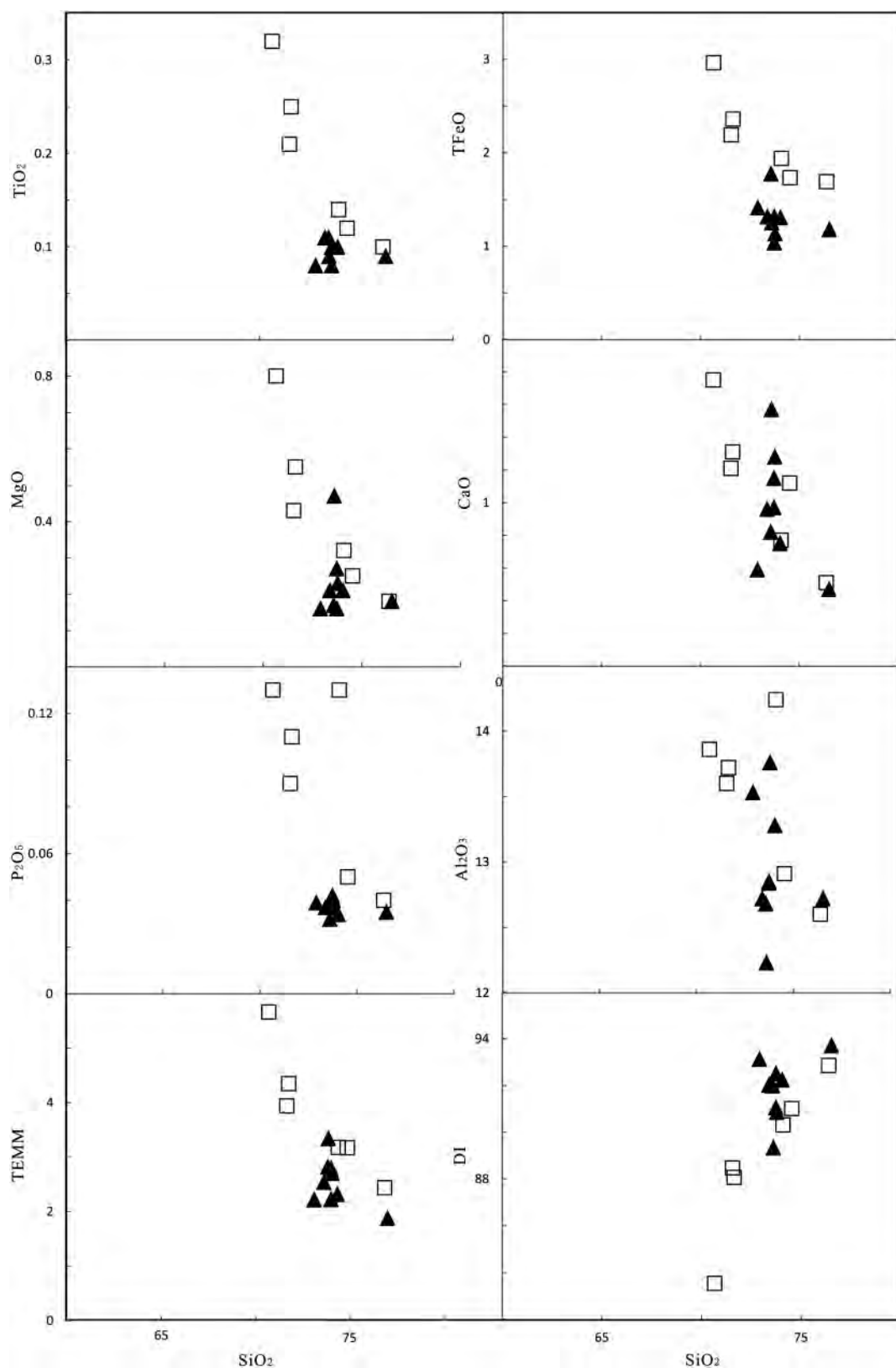


图 5 花岗岩 Harker 图解(图例同图 3)

Fig 5 Harker diagram of granites



### 4.2 微量元素特征

二长花岗岩微量元素分析结果见表2,在原始地幔标准化图上(图6)可以看出,二长花岗岩与下庄二云母花岗岩的微量元素蛛网图十分相似,相对于原始地幔,2花岗岩均富集大离子元素Rb、U、La、Nd、Sm,亏损Ba、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(Chesner and Ettliger, 1989; Mittelehldt and Miller, 1983)。

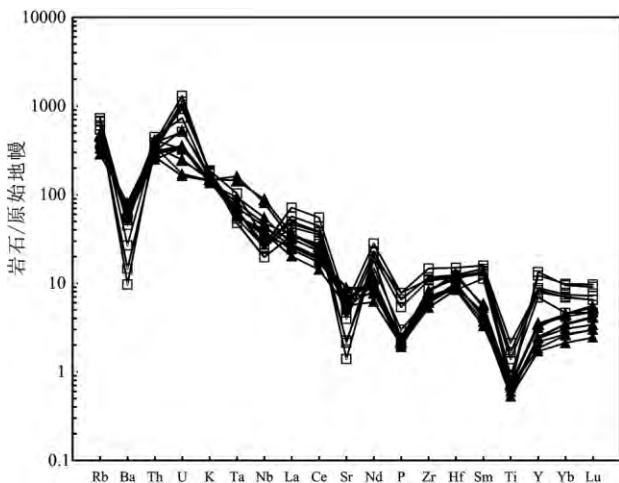


图6 花岗岩的原始地幔蛛网图(图例同图3)

Fig. 6 Primitive mantle-normalized trace element spider diagram of the granites

Nb/Ta 值常用来作为壳-幔作用的重要指示剂,在岩浆起源中得到了广泛的运用。二长花岗岩的Nb/Ta 值(8.68~12.48)较低,在 Nb/Ta=Nb 图解上(图7),二长花岗岩的投影点均位于上地壳平均值的右下方,也同样说明该二长花岗岩的源区为地壳物质。花岗岩的 Nb/Ta 值为 10.34~12.47,在 Nb/Ta-Nb 图解上也呈示其源区为地壳物质。

### 4.3 稀土元素特征

二长花岗岩和下庄花岗岩的的稀土元素分析结果见表2,主要表现为以下特点。

(1)二长花岗岩的稀土总量为  $56.72 \times 10^{-6} \sim 102.14 \times 10^{-6}$  (平均为  $80.7 \times 10^{-6}$ ),稀土配分模式图上表现为右倾的轻稀土富集型( $\sum LREE/\sum HREE$  为 8.5~13.33),轻重稀土分异明显( $La_N/Yb_N$  为 6.95~12.05),以及较为明显的负Eu异常( $\delta Eu$  为 0.53~0.74)。

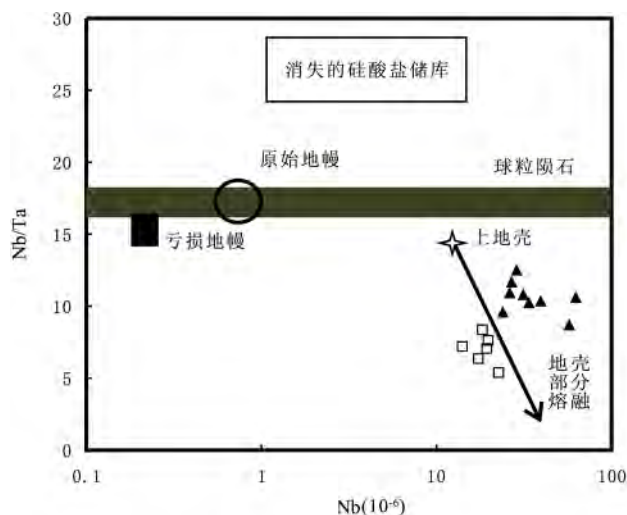


图7 花岗岩的 Nb-Nb/Ta 图解(底图据 Taylor and McLennan, 1985)

Fig. 7 Nb-Nb/Ta diagram of granites

(2)铀矿石的稀土元素总量相对较低,为  $42.7 \times 10^{-6} \sim 74.8 \times 10^{-6}$  (平均为  $57 \times 10^{-6}$ ),稀土配分模式图上(图8)同样表现为右倾的轻稀土富集型( $\sum LREE/\sum HREE$  为 3.10~12.15),轻重稀土分异明显( $La_N/Yb_N$  为 1.61~8.23),以及较为明显的负Eu异常( $\delta Eu$  为 0.64~0.73)。

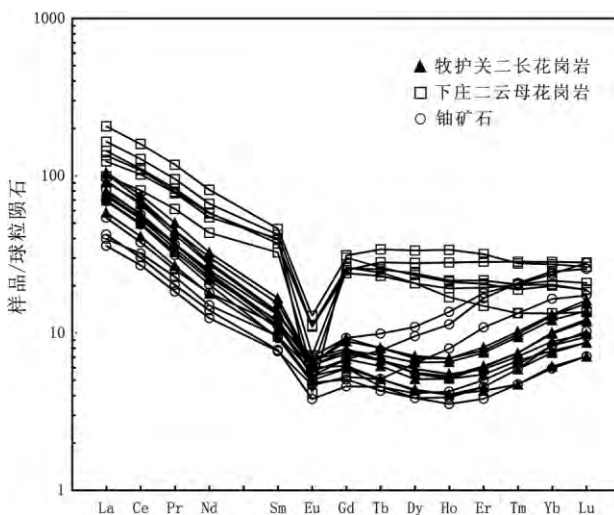


图8 花岗岩及铀矿石的稀土元素蛛网图

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns of the granites

可以看出,产铀岩体花岗岩和矿石的稀土元素特征相似,均具有较低的稀土元素总量,轻稀土富集,负Eu异常等特征。

表 2 花岗岩和矿石的微量元素特征表(10<sup>-6</sup>)  
Tab. 2 Trace elements data of the granites and ore(10<sup>-6</sup>)

| 岩体名称                             | 牧护关二长花岗岩 |        |        |        |        |        |        |        |        |       | 铀矿石   |       |       |       |       |        |        |        |        |        | 下庄二云母花岗岩 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|----------------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
|                                  | YX-1     | YX-2   | YX-3   | YX-4   | YX-5   | MHG-1  | MHG-2  | MHG-3  | MHG-4  | KS-1  | KS-2  | KS-3  | KS-4  | KS-5  | KS-6  | XZ-02  | XZ-03  | XZ-04  | XZ-05  | XZ-07  | XZ-11    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| La                               | 16.50    | 22.00  | 24.30  | 21.50  | 24.80  | 18.00  | 18.80  | 17.60  | 13.80  | 9.40  | 8.50  | 10.00 | 16.30 | 12.80 | 19.20 | 34.06  | 39.00  | 48.83  | 31.90  | 29.22  | 23.55    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Ce                               | 30.40    | 40.20  | 43.20  | 41.30  | 46.10  | 33.10  | 34.90  | 32.50  | 25.20  | 19.60 | 16.50 | 18.50 | 30.00 | 23.10 | 34.50 | 67.72  | 78.25  | 97.38  | 66.32  | 62.38  | 49.37    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Pr                               | 3.12     | 4.01   | 4.24   | 4.26   | 4.76   | 3.49   | 3.52   | 3.28   | 2.54   | 2.16  | 1.74  | 1.92  | 2.98  | 2.40  | 3.47  | 7.84   | 9.03   | 11.15  | 7.52   | 7.35   | 5.84     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Nd                               | 10.20    | 12.80  | 13.20  | 14.20  | 15.20  | 11.70  | 11.30  | 10.60  | 8.30   | 7.00  | 5.80  | 6.50  | 9.50  | 8.40  | 11.10 | 27.17  | 30.98  | 38.01  | 26.88  | 25.40  | 20.26    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Sm                               | 1.63     | 2.04   | 2.08   | 2.35   | 2.54   | 1.99   | 1.79   | 1.82   | 1.45   | 1.46  | 1.17  | 1.19  | 1.42  | 1.72  | 1.70  | 5.67   | 6.45   | 7.03   | 5.98   | 6.10   | 4.98     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Eu                               | 0.35     | 0.39   | 0.36   | 0.37   | 0.37   | 0.40   | 0.31   | 0.36   | 0.29   | 0.33  | 0.27  | 0.22  | 0.28  | 0.41  | 0.31  | 0.64   | 0.65   | 0.75   | 0.42   | 0.24   | 0.34     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Gd                               | 1.27     | 1.57   | 1.52   | 1.90   | 1.82   | 1.63   | 1.40   | 1.59   | 1.22   | 1.40  | 1.08  | 0.94  | 1.04  | 1.91  | 1.23  | 4.93   | 5.32   | 6.20   | 5.37   | 6.42   | 5.15     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Tb                               | 0.19     | 0.25   | 0.25   | 0.30   | 0.30   | 0.25   | 0.23   | 0.27   | 0.19   | 0.29  | 0.19  | 0.17  | 0.16  | 0.37  | 0.17  | 0.86   | 0.95   | 0.98   | 0.91   | 1.27   | 1.05     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Dy                               | 1.09     | 1.40   | 1.42   | 1.81   | 1.75   | 1.50   | 1.29   | 1.65   | 1.11   | 2.42  | 1.63  | 1.05  | 0.98  | 2.77  | 0.98  | 5.26   | 6.10   | 5.93   | 5.26   | 8.50   | 7.08     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Ho                               | 0.23     | 0.29   | 0.30   | 0.39   | 0.39   | 0.31   | 0.29   | 0.37   | 0.23   | 0.64  | 0.45  | 0.24  | 0.22  | 0.77  | 0.20  | 1.09   | 1.22   | 1.20   | 0.95   | 1.91   | 1.59     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Er                               | 0.71     | 0.90   | 1.02   | 1.34   | 1.28   | 0.97   | 1.00   | 1.24   | 0.75   | 2.74  | 1.79  | 0.83  | 0.75  | 2.96  | 0.63  | 3.21   | 3.57   | 3.41   | 2.45   | 5.26   | 4.70     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Tm                               | 0.12     | 0.17   | 0.19   | 0.26   | 0.25   | 0.18   | 0.19   | 0.24   | 0.15   | 0.53  | 0.34  | 0.16  | 0.15  | 0.52  | 0.12  | 0.52   | 0.52   | 0.48   | 0.34   | 0.71   | 0.73     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Yb                               | 1.04     | 1.31   | 1.68   | 2.22   | 2.19   | 1.50   | 1.71   | 2.05   | 1.27   | 4.19  | 2.80  | 1.41  | 1.42  | 4.03  | 1.01  | 3.45   | 3.66   | 3.39   | 2.26   | 4.65   | 4.82     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Lu                               | 0.18     | 0.22   | 0.30   | 0.41   | 0.39   | 0.25   | 0.31   | 0.35   | 0.22   | 0.65  | 0.44  | 0.24  | 0.26  | 0.71  | 0.18  | 0.48   | 0.53   | 0.48   | 0.34   | 0.67   | 0.71     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Y                                | 7.70     | 9.80   | 11.00  | 14.30  | 15.80  | 10.80  | 11.20  | 15.30  | 8.30   | 21.50 | 16.10 | 8.50  | 8.90  | 32.80 | 8.50  | 35.72  | 39.99  | 37.78  | 31.31  | 60.96  | 55.35    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Rb                               | 179.0    | 180.5  | 232.0  | 280.0  | 297.0  | 210.00 | 243.00 | 253.00 | 243.00 | —     | —     | —     | —     | —     | —     | 461.56 | 421.00 | 429.96 | 420.97 | 382.27 | 342.98   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Ba                               | 554.00   | 568.00 | 422.00 | 475.00 | 456.00 | 545.00 | 412.00 | 447.00 | 377.00 | —     | —     | —     | —     | —     | —     | 378.17 | 316.75 | 359.41 | 186.20 | 67.49  | 101.65   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Th                               | 22.60    | 29.40  | 26.20  | 35.00  | 29.60  | 26.10  | 24.30  | 25.50  | 21.10  | —     | —     | —     | —     | —     | —     | 29.38  | 32.83  | 37.86  | 31.39  | 32.70  | 26.10    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| U                                | 3.39     | 3.59   | 7.47   | 6.75   | 5.15   | 11.12  | 7.09   | 7.13   | 7.10   | —     | —     | —     | —     | —     | —     | 23.36  | 27.29  | 15.29  | 19.48  | 10.67  | 21.60    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Ta                               | 2.30     | 2.30   | 3.30   | 6.60   | 5.90   | 2.50   | 3.80   | 2.90   | 2.40   | —     | —     | —     | —     | —     | —     | 2.59   | 2.73   | 2.75   | 4.21   | 2.19   | 1.95     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Sr                               | 26.80    | 28.70  | 33.70  | 57.30  | 62.50  | 23.90  | 39.30  | 31.30  | 26.20  | —     | —     | —     | —     | —     | —     | 19.72  | 17.30  | 19.33  | 22.59  | 18.22  | 14.01    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Nd                               | 151.50   | 146.50 | 107.50 | 131.00 | 140.00 | 188.50 | 182.50 | 129.00 | 117.00 | —     | —     | —     | —     | —     | —     | 83.30  | 98.04  | 124.41 | 44.62  | 29.28  | 47.20    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Zr                               | 72.00    | 79.00  | 67.00  | 88.00  | 90.00  | 70.00  | 68.00  | 72.00  | 59.00  | —     | —     | —     | —     | —     | —     | 119.81 | 129.89 | 164.18 | 123.24 | 95.15  | 76.38    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Hf                               | 2.70     | 2.80   | 2.80   | 4.00   | 3.60   | 2.80   | 3.10   | 3.00   | 2.60   | —     | —     | —     | —     | —     | —     | 3.56   | 3.81   | 4.63   | 3.66   | 3.39   | 2.58     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ΣREE                             | 67.03    | 87.55  | 94.06  | 92.61  | 102.14 | 75.27  | 77.04  | 73.92  | 56.72  | 52.81 | 42.70 | 43.37 | 65.46 | 62.87 | 74.80 | 162.91 | 186.23 | 225.20 | 156.92 | 160.09 | 130.15   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| LREE                             | 62.20    | 81.44  | 87.38  | 83.98  | 93.77  | 68.68  | 70.62  | 66.16  | 51.58  | 39.95 | 33.98 | 38.33 | 60.48 | 48.83 | 70.28 | 143.10 | 164.36 | 203.14 | 139.02 | 130.69 | 104.33   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| HREE                             | 4.83     | 6.11   | 6.68   | 8.63   | 8.37   | 6.59   | 6.42   | 7.76   | 5.14   | 12.86 | 8.72  | 5.04  | 4.98  | 14.04 | 4.52  | 19.81  | 21.87  | 22.06  | 17.90  | 29.40  | 25.83    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| LREE/HREE                        | 12.88    | 13.33  | 13.08  | 9.73   | 11.20  | 10.42  | 11.00  | 8.53   | 10.04  | 3.11  | 3.90  | 7.61  | 12.14 | 3.48  | 15.55 | 7.22   | 7.52   | 9.21   | 7.77   | 4.45   | 4.04     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| L <sub>AN</sub> /Y <sub>BN</sub> | 11.38    | 12.05  | 10.38  | 6.95   | 8.12   | 8.61   | 7.89   | 6.16   | 7.79   | 1.61  | 2.18  | 5.09  | 8.23  | 2.28  | 13.64 | 7.08   | 7.65   | 10.34  | 10.10  | 4.50   | 3.51     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| δEu                              | 0.74     | 0.67   | 0.62   | 0.54   | 0.53   | 0.68   | 0.60   | 0.65   | 0.67   | 0.71  | 0.73  | 0.64  | 0.70  | 0.69  | 0.66  | 0.37   | 0.34   | 0.35   | 0.22   | 0.12   | 0.20     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| δCe                              | 1.04     | 1.05   | 1.04   | 1.06   | 1.04   | 1.02   | 1.05   | 1.05   | 1.04   | 1.07  | 1.05  | 1.04  | 1.06  | 1.02  | 1.04  | 1.02   | 1.02   | 1.02   | 1.05   | 1.04   | 1.03     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

注:下庄岩体数据引自 Chen et al., 2012。



## 5 讨论

上述地球化学特征表明,牧护关二长花岗岩与华南著名的产铀花岗岩体下庄二云母花岗岩具有相似的元素地球化学特征:主量元素上均为富硅、富钾、富碱及铝过饱和和高分异的过铝质花岗岩,微量元素上也具有相似的富集亏损特征,其稀土元素分配模式图上也均为轻稀土富集右倾型,但牧护关二长花岗岩岩体具有更低的 U 含量和稀土元素总量。

一直以来,有关产铀岩体的判断的研究一直是铀矿工作者的重点。受限于研究手段和技术条件,前人对产铀岩体的判断主要根据铀丰度的统计学数据,其结果显示产出铀矿的花岗岩体的 U 含量都显著高于一般花岗岩 U 含量( $3 \times 10^{-6}$ )的数倍。据统计产铀花岗岩的 U 含量绝大多数超过  $9 \times 10^{-6}$ ,一般在  $10 \times 10^{-6} \sim 30 \times 10^{-6}$  (杜乐天,1982;章邦桐,1992)。而蓝田铀矿相关的产铀花岗岩的 U 含量仅为  $3.39 \times 10^{-6}$ ,  $\sim 11.12 \times 10^{-6}$  (平均为  $6.53 \times 10^{-6}$ ),显然远低于一般产铀花岗岩的 U 含量,但如此低 U 含量的花岗岩也能产出具有一定规模的铀矿床,其花岗岩的铀成矿机制对于铀的成矿理论具有重要的意义。

近年来,越来越多的研究表明,U 的赋存形式是决定花岗岩成矿潜力的重要因素,因为 U 的赋存形式是决定岩石中活性 U (即浸出率大小)的主要因素,研究表明花岗岩中 U 的活化迁移的难易顺序为:晶质铀矿 > 副矿物 > 造岩矿物 (Cuney, 2009; Dahlkamp, 2010; 余达淦等, 2007)。尽管造岩矿物占了花岗岩中比重的绝大部分,但由于其中的 U 难以活化而对热液 U 成矿贡献较小 (章邦桐等, 2011)。由于晶质铀矿不仅具有很高的 U 含量,而且很容易就能将 U 释放出来。因此,许多学者认为产铀岩体中的铀主要是以晶质 U 矿形式存在,在受到流体交代时能释放出大量 U,为成矿提供丰富的物质来源 (El-naby and Hamdy, 2009; Chen et al, 2012; Tartèse et al., 2013; 杜乐天, 1982; 张成江, 1996; 余达淦等, 2007; 张少琴等, 2009; 陈佑纬等, 2009, 2010; 章邦桐等, 2011)。

U 的地球化学性质表明,U 在岩浆中是以具有较强的亲氧性的四价 U 形式存在,在岩浆中多与亲石元素结合,形成氧化物、硅酸盐和磷酸盐等

(Cuney, 2009; Lehmann, 2008)。随着岩浆的分异演化,U 不断地在熔体中富集,四价 U 离子首先与半径和电负性与四价 U 相近的离子。例如,  $\text{Th}^{4+}$ 、 $\text{Ce}^{4+}$ 、 $\text{Y}^{3+}$  等进行类质同象置换,与游离氧  $\text{O}^{2-}$  结合形成一系列含 U 的富 REE 副矿物。例如,独居石、钍石、锆石、褐帘石等,这些副矿物增多导致 U 分散,不利于 U 集中进入热液成矿。随着岩浆的进一步演化,温度以及氧逸度的降低,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 O,从而产生大量游离 O,不断富集的 U 满足富含 REE 的副矿物的需求之后,剩余的 U 与游离氧  $\text{O}^{2-}$  结合,形成以活性 U 形式存在的晶质铀矿析出,利于后期热液成矿 (王创铎和马永焕,1998; 王剑锋,1986)。

尽管蓝田铀矿床中产铀岩体花岗岩中的 U 含量较低,但其熔体中稀土元素较低,U 很快满足 REE 的需求之后,还能以晶质铀矿的形式沉淀出来,这与显微镜下观察到岩体中存在着少量晶质铀矿,以及产铀岩体具有较高的铀浸出率 (54.1%) 等的事实相一致 (胡俊祺,1981)。因此,认为尽管花岗岩中的 U 含量很低,但 U 在其中主要以活性的晶质铀矿形式存在,也能被活化迁移,继而成矿。赋矿岩体中 U 的高含量并不是铀成矿的必然条件,其中的晶质铀矿在花岗岩型铀矿床中起着更重要的作用。

## 6 结论

(1) 牧护关二长花岗岩与华南著名的产铀花岗岩体下庄二云母花岗岩具有相似的元素地球化学特征,主量元素上均为富硅、富钾、富碱及铝过饱和和高分异的过铝质花岗岩,微量元素也具有相似的富集亏损特征,其稀土元素分配模式图上也均为轻稀土富集右倾型,但牧护关二长花岗岩岩体具有更低的 U 含量和稀土元素总量。

(2) 尽管牧护关二长花岗岩中的 U 含量较低,但其中的 U 主要以晶质铀矿的形式存在,有利于后期热液活化迁移,因此能产出具有经济价值的铀矿床。

致谢:本次研究工作得到了陕西核工业地质局、中核蓝天铀业有限公司、核工业 203 研究所等相关

人员的帮助,在此一并感谢。

## 参考文献(References):

- 陈佑纬,毕献武,胡瑞忠,等. 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, 29(3): 106-114.
- CHEN Youwei, BI Xianwu, HU Ruizhong, et al Comparison of geochemical characteristic of uranium- and non-uranium-bearing Indosinian granites in Guidong composite pluton [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2009, 29(3): 106-114.
- 陈佑纬,毕献武,胡瑞忠,等. 贵东岩体黑云母成分特征及其对铀成矿的制约[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2010, 29(4): 355-363.
- CHEN Youwei, BI Xianwu, HU Ruizhong, et al The Geochemical Characteristics of Biotites and their Constraints on Uranium Mineralization in Guidong Pluton [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2010, 29(4): 355-363.
- 丁丽雪,马昌前,李建威,等. 华北克拉通南缘蓝田和牧护关花岗岩体: LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地球化学, 2010, 39(5): 401-413.
- DING Lixue, MA Changqian, LI Jianwei, et al LA-ICPMS zircon U-Pb ages of the Lantian and Muhuguan granitoid plutons, southern margin of the North China craton: Implications for tectonic setting[J]. Geochimica, 2010, 39(5): 401-413.
- 杜乐天. 花岗岩型铀矿的主要地质规律及成矿模式[A]. 花岗岩型铀矿文集[C]. 1982.
- DU Letian. The Geological and Metallogenic Model of the Granite-type Uranium Deposit[A]. The Proceedings of the Granite-type Uranium Deposit[C]. 1982.
- 刘埃平,金景福,钟子川. 401 矿区铀矿床地质地球化学特征及其地下堆浸评价[J]. 成都理工学院学报, 2000, 27(2): 172-178.
- LIU Aiping, JIN Jingfu, ZHONG Zichuan. Geological-Geochemical Characteristics and Underground Leaching Appreciation of Uranium Deposits in Orefield 401[J]. Journal of Chendu University of Technology, 2000, 27(2): 172-178.
- 刘锐,陈冕,田向盛,等. 东秦岭蓝田和牧护关岩体地球化学、锆石 SIMS-U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征: 岩石成因及构造意义[J]. 矿物学报, 2014, 34(4): 469-480.
- LIU Rui, CHEN Mi, TIAN Xiangsheng, et al Geochemical, Zircon SIMS U-Pb Geochronological and Hf Isotopic Study on Lantian and Muhuguan Plutons in Eastern Qinling, China: Petrogenesis and Tectonic Implications [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2014, 34(4): 469-480.
- 彭大明. 秦岭铀资源研究[J]. 铀矿地质, 1999, 15(3): 22-33.
- PENG Daming. Investigation on Uranium Resources of Qinling region [J]. Uranium Geology, 1999, 15(3): 22-33.
- 王创铎,马永焕. 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.
- 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.
- 王江波,李卫红,赖绍聪. 陕西蓝田铀矿田控矿因素与成矿作用过程探讨[J]. 西北地质, 2013, 46(1): 154-161.
- WANG Jiangbo, LI Weihong, LAI Shaocong. Discussion on Ore-Control Factors and Mineralization of the Lantian Uranium Field, Shaanxi [J]. Northwestern Geology, 2013, 46(1): 154-161.
- 王晓霞,王涛,齐秋菊,等. 秦岭晚中生代花岗岩时空分布、成因演变及构造意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1573-1593.
- WANG Xiaoxia, WANG Tao, QI Qiuju, et al. Temporal-spatial variations, origin and their tectonic significance of the Late Mesozoic granites in the Qinling, Central China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1573-1593.
- 肖国贤,朱焕巧. 401 矿区铀资源潜力及勘探方向[J]. 西北铀矿地质, 2005, 31(2): 24-27.
- XIAO Guoxian, ZHU Huanqiao. The Uranium Resource Potential and Expotation of orefield 401 [J]. Northwestern Uranium Geology, 2005, 31(2): 24-27.
- 杨正坤. 北秦岭成矿带蓝田铀矿田控矿构造地球化学特征和成矿模式研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- YANG Zhenkun. Lantian uranium ore field in North Qinling Mountains metallogenic belt of ore-controlling tectonic geochemistry characters and studying mineralization model [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- 余达途,吴仁贵,陈培荣. 铀资源地质学教程[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2007.
- YU Dagan, WU Rengui, CHEN Peirong. The geology of uranium resources [M]. Harbin: Harbin Engineering

- University Press, 2007.
- 张成江. 华南几个杂岩体中产铀与非产铀花岗岩的成因及其与铀成矿关系[J]. 成都理工学院学报, 1996, 23(4): 33-40.
- ZHANG Chengjiang. The Genesis of Uranium-and Non-Uranium-Bearing Granites from Several Complexes in South China and Their Relationship to Uranium Mineralization[J]. Journal of Chengdu Institute of Technology, 1996, 23(4):33-40
- 张聚杰. 401 矿田铀矿化的基本特征及主要控矿因素的研究[R]. 咸阳: 核工业二〇三研究所, 1981.
- ZHANG Jujie. The Characteristic and ore-controlling factors of the Orefields 401[R]. Xianyang: No. 203 Research Institute of Nuclear Industry, 1981.
- 张少琴, 朱文凤, 韦龙明. 产铀花岗岩体中的晶质铀矿的若干特征——以粤北石人嶂钨矿为例[J]. 中国矿业, 2009, 18(11): 104-106.
- ZHANG Shaoqin, ZHU Weifeng, WEI Longming. Some characteristics of urlichile in granite The wolframite of Shirenzhang in north of Guangdong as an example[J]. China Mining Magazine, 2009, 18(11): 104-106.
- 章邦桐. 华南两类花岗岩型铀矿床的地球化学识别标志及成因研究[J]. 华东地质学院学报, 1992, 15(2): 119-124.
- ZHANG Bangtong. Study on Geochemical Recognition Criterias and Genesis for two kinds of Granite-type Uranium Deposits in South China[J]. Journal of East China Geological Institute, 1992, 15(2): 119-124.
- 章邦桐, 吴俊奇, 凌洪飞, 等. 赣南富城花岗岩中显微-超显微晶质铀矿的厘定及成因[J]. 矿物学报, 2011, 31(2): 166-172.
- ZHANG Bangtong, WU junqi, Ling Honfei, et al. Detection of Micro and Super-Micro-Grained Uraninite in Fucheng Granite Pluton, Southern Jiangxi Province, China and Its Genetic Implication[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2011, 31(2): 166-172.
- CHEN Youwei, BI Xianwu, HU Ruizhong, et al. Element Geochemistry, Mineralogy, Geochronology and Zircon Hf Isotope of the Luxi and Xiazhuang Granites in Guangdong Province, China: Implications for U Mineralization[J]. Lithos, 2012, 150: 119-134.
- CHESSNER C A., ETTLINGER A D. Composition of Volcanic Allanite From the Toba Tuffs, Sumatra, Indonesia[J]. American Mineralogist, 1989, 74(7): 750-758.
- COLLINS W J, BEAMS S D, WHITE A J R. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1982, 80(2):189-200.
- CUNEY M. The Extreme Diversity of Uranium Deposits [J]. Mineralium Deposita, 2009, 44(1): 3-9.
- DAHLKAMP F J. Uranium Deposits of the World [M]. Springer, 2010.
- El-naby A, Hamdy H. High and Low Temperature Alteration of Uranium and Thorium Minerals, Um Ara Granites, South Eastern Desert, Egypt [J]. Ore Geology Reviews, 2009, 35(3): 436-446.
- LEHMANN B. Uranium Ore Deposits [J]. Rev. Econ. Geol. Ams Online, 2008: 16-26.
- MITTEFEHLDT D W, MILLER C F. Geochemistry of the Sweetwater Wash Pluton, California: Implications for "anomalous" Trace Element Behavior During Differentiation of Felsic Magmas [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1983, 47(1): 109-124.
- TARTESE R, BOULVAIS P, POUJOL M. Uranium Mobilization from the Variscan Questembert Syntectonic Granite During Fluid-Rock Interaction at Depth[J]. Economic Geology, 2013, 108(2): 379-386.
- TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Blackwell Scientific Pub., Palo Alto, CA, 1985.