

粤北下庄铀矿田脉石矿物 Sr、Nd、Pb 同位素地球化学研究

商朋强^{1,2,3} 胡瑞忠² 毕献武² 张国全² 田建吉⁴

(1. 中化地质矿山总局 地质研究院, 河北 涿州 072750; 2. 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, 贵州 贵阳 550002; 3. 中化地质矿山总局, 北京 100101; 4. 核工业北京地质研究院, 北京 100029)

摘要:下庄铀矿田为中国南岭地区重要的铀矿基地, 矿区内分布有规模大小不等的数个铀矿床。为解决近年来争议较多的该区铀矿床矿质和流体来源问题, 本次对下庄矿田铀矿床中的脉石矿物开展了系统的 Sr、Nd、Pb 同位素地球化学研究。结果表明, 本区与成矿有关的碳酸盐矿物富集放射性成因铅, 矿床中的 Pb 和 U 主要源于帽峰式花岗岩。Sr、Nd 同位素组成显示成矿流体主要为壳源, 南部矿区部分矿床的成矿流体在上升及矿质沉淀过程中与基性脉岩发生水-岩反应而使其形成的脉石矿物的 Sr、Nd 同位素组成具有壳幔两端元混合的特征。

关键词: Sr、Nd、Pb 同位素; 下庄铀矿田; 脉石矿物; 成矿物质; 成矿流体

中图分类号: P619.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2012)06-1847-10

含钙矿物(如方解石、白云石、白钨矿和萤石等)是许多热液矿床内常见的脉石矿物。近年来, 热液含钙矿物同位素地球化学已经成为研究许多具有重要经济价值的 Mo、Sn、U、Cu 热液矿床成因的重要方法和手段^[1-3]。粤北下庄铀矿田是南岭地区重要的花岗岩型热液铀矿产区, 含钙矿物(方解石、白云石和萤石)不仅是该矿床中主要的脉石矿物, 且在空间上与矿石矿物存在紧密的共生关系。因此, 开展含钙脉石矿物相关的同位素地球化学研究可以增强对该区铀矿床成因的认识。

对华南热液铀矿床特别是花岗岩型热液铀矿床成因的认识, 尽管有大量的研究讨论了矿床成因及成矿模式, 但一直存在较多的争议, 归结起来, 主要有两点: ①成矿热液中是否有地幔流体信息的显示, 以及幔源物质在铀迁移过程中发挥的作用? ②矿质来源的问题, 尽管花岗岩型铀矿中的矿质铀源于高铀含量的花岗岩已被大多数地质学者认同, 但源于何种类型花岗岩则鲜见讨论。矿床中相关矿物 Sr、

Nd、Pb 同位素是示踪热液矿床物质来源和流体来源的有力工具^[4-7]。本文以下庄铀矿田中典型花岗岩型铀矿床的研究为例, 开展了相关矿物的 Sr、Nd、Pb 同位素研究, 针对性地讨论了以上两个问题, 以期能解疑释惑。

1 地质背景

下庄铀矿田位于粤北贵东复式岩体的东部, 大地构造处于华南后加里东隆起边缘的湘、赣、粤后加里东褶皱隆起的南西翼与湘、桂、粤北海西—印支拗陷带的复合部位, 贵东—蕉岭东西向构造带与赣江北东向断裂带南缘延伸的断陷带的交接部位。

贵东岩体东部的岩性较复杂, 主体岩性为印支期鲁溪粗粒斑状黑云母花岗岩体、下庄中粒斑状黑云母花岗岩体、冒峰细粒二云母花岗岩体及燕山早期笋洞中粒黑云母花岗岩体(图 1), 各期次花岗岩均为过铝质花岗岩, 其中, 位于复式岩体东北部的冒峰岩体普遍受到了后期的碱交代蚀变作用。自中生

收稿日期: 2012-11-25; 改回日期: 2012-12-05

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-125)、国家杰出青年科学基金(49925309)资助。

作者简介: 商朋强, 男, 1980 年生, 高级工程师, 从事矿床学研究; E-mail: shang5551983@163.com。

代晚期以来,在岩体东部(矿区)先后有三次次(~140 Ma、~105 Ma、~90 Ma)^⑧的基性岩脉贯入,岩性主要为辉绿岩、辉绿玢岩及闪斜煌斑岩。

采样点所在矿区断裂构造极为发育,主要有北东向和东西向两组,其中矿体绝大部分赋存于北东向的硅化断裂及伴生的次生裂隙与近东西向的基性岩脉的交汇处。矿体多呈板状、脉状、网脉状、透镜状

及柱状,矿区北部矿床矿体多产于花岗岩体内,而南部矿床矿体多位于基性脉岩体与北东向断裂的交汇处(交点型铀矿)。铀矿物以沥青铀矿为主,金属矿物有黄铁矿、赤铁矿、方铅矿和针铁矿等,脉石矿物主要有石英、萤石及方解石等。围岩蚀变在成矿前期以微斜长石化、钠长石化和绿泥石化为主,成矿期主要为硅化、萤石化、水云母化和碳酸盐化,成矿后期以

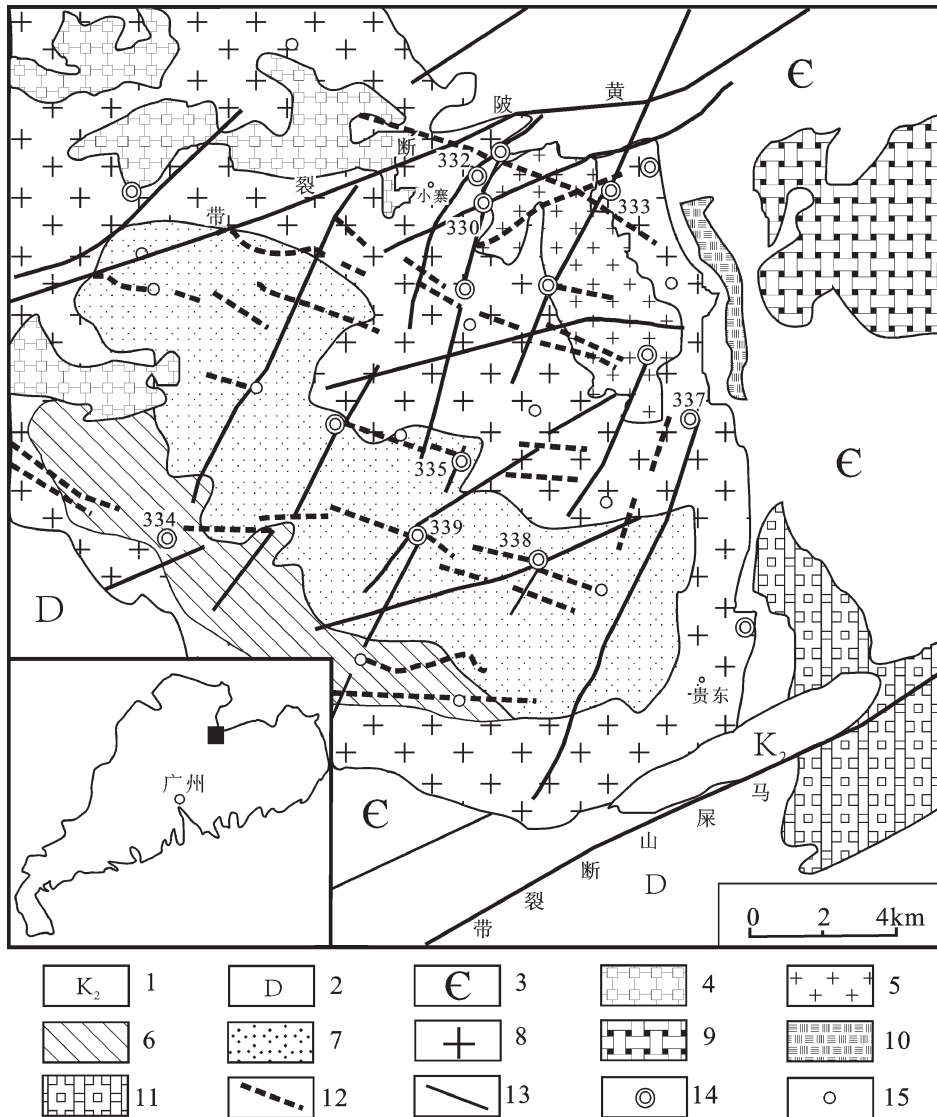


图1 下庄铀矿田地质略图

- 1—上白垩统砾岩、砂砾岩;2—泥盆系砂页岩;3—寒武系浅变质砂页岩;4—竹筒尖岩体;5—帽峰岩体;6—鲁溪岩体;
- 7—笋洞岩体;8—下庄岩体;9—大吉山岩体;10—加里东期片麻状花岗岩;11—海西期片麻状花岗岩;
- 12—晚中生代基性岩脉;13—断裂;14—矿床;15—矿点、矿化点

Fig.1 Geological sketch map of the Xiazhuang uranium orefield

- 1—Upper Cretaceous conglomerate and granulite;2—Devonian sandy shale;3—Cambrian low grade metamorphic sandy shale;
- 4—Zhutongjiao rock body;5—Maofeng rock body;6—Luxi rock body;7—Sundong rock body;8—Xiazhuang rock body;9—Dajishan rock body;
- 10—Caledonian gneissic granite;11—Hercynian gneissic granite;12—Late Mesozoic basic dike;13—Fault;14—Uranium deposit;15—Ore spot

碳酸盐化和粘土化为主。

2 样品及分析方法

据采样位置,本区可划分为南部矿区和北部矿区,两区所采样品有所差异:北部 330(希望)、332(新桥)铀矿床的方解石多为浅肉红色,产于花岗岩水云母化、硅化带中,与灰色微晶石英、水云母共生,浅色方解石两侧发育梳状石英,碳酸盐化发育于矿体底部;南部矿区(335、338、339)的碳酸盐化规模较大,基性脉岩中碳酸盐化发育,矿石中常见肉红色碳酸盐脉与脉状沥青铀矿共生,矿石品位较高。本次研究所采集萤石样品为成矿期紫黑色-紫色萤石。

Pb 同位素分析由核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成,Pb 同位素测量采用热表面电离质谱(仪器型号为 MAT261),对 1 μ g 铅 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 测量精度 $\leq 0.005\%$,NBS981 测量值(2σ): $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 2.1652465 \pm 0.000069$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 0.9145100 \pm 0.000059$, $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 0.0591995 \pm 0.000013$ 。Sr、Nd 同位素样品化学分离和同位素比值测量由中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素地球化学实验室完成,测量仪器为德国 Finnigan 公司 MAT-262 热电离质谱

计,采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 和 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 校正测得的 Nd 和 Sr 同位素比值,Rb-Sr 和 Sm-Nd 的全流程本底分别为 100 pg 和 50 pg 左右,浓度(或 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 和 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值)误差小于 0.5%。

3 分析结果

3.1 Pb 同位素

有关华南地区热液铀矿中 Pb 同位素的研究,大多数学者一般用矿石中常见的金属矿物——黄铁矿作为研究对象^[9-11]。对下庄铀矿田有关铀矿床,近年来亦开展过黄铁矿的 Pb 同位素组成研究工作^[12-14],但由于多数铀矿床中黄铁矿 U、Th 含量相对较高,使得其在扣除放射性成因铅时产生的误差较大,因此其对原岩年龄的计算不够准确,对成矿物质来源的判别也会产生失误。笔者对开展 Pb 同位素研究工作成矿期碳酸盐矿物样品中的 U、Th 和 Pb 含量分析显示(表 1),本文中绝大部分与成矿相关的碳酸盐矿物 U、Th 含量较低,可以满足 Pb 同位素研究的要求。

本次碳酸盐矿物 Pb 同位素组成分析结果(表 1)显示,碳酸盐矿物的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 组成

表 1 下庄矿田部分铀矿床碳酸盐矿物 Pb 同位素组成

Table 1 Pb isotope compositions of carbonates from the Xiazhuang uranium orefield

| 样品号 | 采样位置 | 测试矿物 | Pb/ 10^{-6} | Th/ 10^{-6} | U/ 10^{-6} | $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ |
|--------|------|---------|---------------|---------------|--------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| XW-5 | 330 | 浅红色方解石 | 10.5 | 0.073 | 0.908 | 18.456 | 15.667 | 38.741 |
| XW-17 | 330 | 浅红色方解石 | 2.76 | 0.071 | 0.242 | 18.788 | 15.697 | 38.747 |
| XW-20 | 330 | 白色方解石 | 1.09 | 0.049 | 0.914 | 18.435 | 15.698 | 38.963 |
| XZ-1 | 335 | 肉红色方解石 | 39.4 | 0.014 | 0.823 | 18.835 | 15.711 | 39.003 |
| XZ-5 | 335 | 白色方解石 | 95.6 | 0.013 | 31.8 | 19.523 | 15.755 | 39.106 |
| XRZ-4 | 338 | 浅红色方解石 | 114 | 0.006 | 0.084 | 20.564 | 15.805 | 38.952 |
| XRZ-5 | 338 | 团粒状白云石 | 98.3 | 0.004 | 1.24 | 21.640 | 15.858 | 39.000 |
| XRZ-7 | 338 | 白色方解石 | 21.9 | 未测出 | 0.919 | 20.211 | 15.790 | 38.923 |
| XRZ-9 | 338 | 团粒状白云石 | 40.8 | 0.016 | 1.61 | 19.403 | 15.735 | 38.961 |
| XRZ-13 | 338 | 团粒状白云石 | 138 | 0.093 | 2.06 | 18.853 | 15.736 | 39.027 |
| SJW-2 | 339 | 肉红色方解石 | 8.74 | 0.019 | 0.243 | 19.196 | 15.704 | 39.066 |
| SJW-3 | 339 | 肉红色方解石 | 7.95 | 0.013 | 2.45 | 19.329 | 15.708 | 39.070 |
| SJW-10 | 339 | 白色方解石 | 6.65 | 0.024 | 1.90 | 18.420 | 15.659 | 38.741 |
| SJW-27 | 339 | 浅肉红色方解石 | 4.79 | 未测出 | 0.694 | 19.397 | 15.742 | 39.026 |

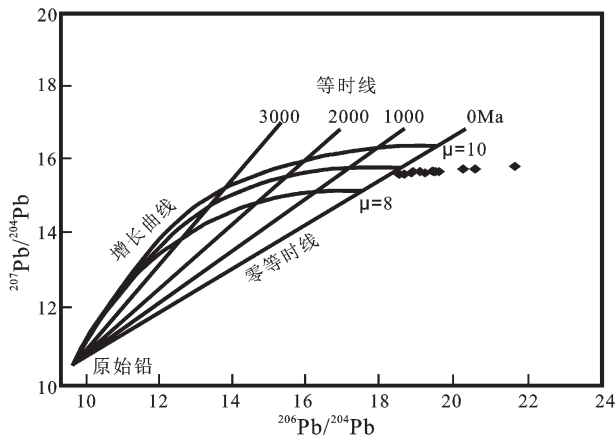


图 2 下庄矿田部分铀矿床的碳酸盐矿物 Holmes-Houtemans 图解

Fig.2 Holmes-Houtemans diagram for carbonates from the Xiazhuang uranium orefield

变化较大, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值 18.435~21.6640, 离差 3.205 (均值 19.361), $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值 15.858~15.659, 离差 0.200(均值 15.733), 而 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值 (38.741~39.070),

离差 0.329, 均值 38.952) 变化比较稳定。

以上碳酸盐矿物的 Pb 同位素组成特征表明, 尽管经过了放射性成因铅的扣除, 该区碳酸盐矿物仍富集放射性成因 Pb (^{206}Pb 和 ^{207}Pb)。在 Holmes-Houtemans 图(图 2)中, 样品铅同位素投影位于零等时线右侧, 而且呈明显的线性排列, 这表明矿床中的铅并非是均一的单阶段正常铅, 而是明显属于异常铅, 反映成矿流体中的铅来源于富铀的地质体。这是铀成矿热液的一个重要特征。

3.2 Sr、Nd 同位素

矿区热液碳酸盐矿物和成矿期萤石样品的 Sr、Nd 同位素分析结果列于表 2, 其中样号为 XW-1、XW-7、SJW-2、SJW-20 和 SJW-25 的样品的 Rb、Sr、Sm 和 Nd 含量采用 ICP-MS 分析, Rb 含量低于检测限, Sr 含量变化在 $32.4 \times 10^{-6} \sim 225 \times 10^{-6}$, 具有较低的 Rb/Sr 值, 使得样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 组成可直接代表成矿流体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的初始比值, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 为据

表 2 下庄铀矿田部分矿床中萤石和碳酸盐矿物 Sr、Nd 同位素组成

Table 2 Sr and Nd isotope compositions of fluorites and carbonates from the Xiazhuang uranium orefield

| 地区及样号 | | Rb/ 10^{-6} | Sr/ 10^{-6} | $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ | $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(2s)$ | $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ |
|---------------|---------------|-----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 北部矿区 | XW-1 | <0.1 | 40.8 | — | 0.724512(11) | 0.724512 |
| | XW-7 | <0.1 | 38.7 | — | 0.750679(14) | 0.750679 |
| | XW-17 | 0.00338 | 83.8 | 0.00338 | 0.720886(14) | 0.720882 |
| | SJW-2 | <0.1 | 225 | — | 0.721354(15) | 0.721354 |
| | SJW-20 | <0.1 | 31.7 | — | 0.723756(15) | 0.723756 |
| 南部矿区 | SJW-25 | <0.1 | 32.4 | — | 0.728140(12) | 0.72814 |
| | XRZ-4 | 0.00002 | 563 | 0.00002 | 0.715790(13) | 0.71579 |
| | XRZ-13 | 0.00021 | 353 | 0.00021 | 0.716849(14) | 0.716848 |
| | XJW-3 | 0.00092 | 179 | 0.00092 | 0.721451(14) | 0.72145 |
| | SJW-27 | 0.00015 | 119 | 0.00015 | 0.721321(14) | 0.72132 |
| Sm/ 10^{-6} | Nd/ 10^{-6} | $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ | $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(2s)$ | $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ | $T_{\text{DM}}(\text{Ma})$ | |
| 2.981 | 10.2 | 0.18544 | 0.512057(14) | -11.2 | 1793 | |
| 4.12 | 13.85 | 0.188787 | 0.512021(12) | -12 | 1852 | |
| 3.091 | 6.64 | 0.281384 | 0.512049(14) | -12.3 | 1881 | |
| 10.94 | 28.41 | 0.244167 | 0.512343(14) | -6.2 | 1393 | |
| 9.302 | 31.21 | 0.221228 | 0.512368(12) | -5.5 | 1334 | |
| 3.027 | 7.447 | 0.257888 | 0.512510(11) | -3.1 | 1140 | |
| 1.135 | 2.342 | 0.292918 | 0.512302(26) | -7.5 | 1499 | |
| 1.155 | 3.922 | 0.177988 | 0.512749(14) | 2.4 | 693 | |
| 5.965 | 13.03 | 0.276732 | 0.512388(12) | -5.7 | 1349 | |
| 0.88 | 2.574 | 0.206684 | 0.512556(13) | -1.7 | 1023 | |

天然样品中同位素比值推算所得。表中计算所用初始值取 $\lambda_{\text{Rb}}=1.41 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$ 、 $\lambda_{\text{Sm}}=6.54 \times 10^{-12} \text{a}^{-1}$; t 为成矿年龄, 330 矿床取 76 Ma^[15], 南部的 338 和 339 矿床取 82 Ma^[16]; $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{UR}}=0.7045$ 和 $(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_{\text{UR}}=0.0816$ ^[17], $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.5123638$ 和 $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.1967$ ^[18]。由表可知:

① 北部 330(希望)矿床脉石矿物的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 0.720 882~0.750 679, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -12.3~-11.2, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值总体位于较高值, 且变化较为稳定, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值较低, 变化范围较小(-11.2~-12.3); 南部矿区的 339 和 338 矿床脉石矿物的 Sr、Nd 同位素组成特征相似, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 0.715 790~0.728 140, 与张展适等^[19]分析的该矿区方解石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(0.717~0.737, 均值 0.723)相近, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化较大(-7.5~2.4, 均值-3.9)。

② 同一矿床中碳酸盐矿物与萤石的 Sr、Nd 同位素组成没有明显差别, 不同产状、不同期次的碳酸盐矿物和萤石 Sr、Nd 同位素组成差别也不太明显, 表明同一矿床中脉石矿物具有同源性。

4 讨论

4.1 Pb 及矿质来源

花岗岩中的铀主要赋存于黑云母及其他副矿物中, 对花岗岩型铀矿已有岩石学、矿物学、地球化学等方面的研究表明, 该类型铀矿的矿质(铀)来源于已固结的花岗岩似无疑义。贵东岩体东部各期次花岗岩体以下庄岩体、笋洞岩体及帽峰岩体铀含量最高, 均为富铀花岗岩, 区内绝大部分铀矿床均产于三类花岗岩体中。金景福和胡瑞忠(1990)、张成江(1990)、张展适等(2005)、Lu J J et al.(2006)和陈佑伟等(2009)众多学者对区内的富铀花岗岩及铀成矿关系均开展过不同方面的研究^[19-22], 但侧重于花岗岩岩石学和铀矿物学特征研究, 而对源岩 Pb 同位素特征及对铀成矿制约机制的讨论较少涉及, 从而制约了对该区铀成矿演化的认识。

根据本次分析数据及其他文献数据, 在图 2 铅构造模式图^[23]中, 列出了碳酸盐矿物、矿区内基性脉岩、笋洞花岗岩以及南岭地区基底变质岩的 Pb 同位素组成^[24]范围。矿区内基性脉岩的铅同素组成被解释为其源区是富集地幔受俯冲带流体交代形成^[25,26], 笋洞岩体钾长石的 Pb 同位素组成位于上地壳演化线上, 为典型的壳源 S 型花岗岩, 而帽峰岩体钾长石 Pb

同位素组成由于受后期碱交代流体影响, 富铀矿物释放的放射性成因铅(^{207}Pb 、 ^{206}Pb)被分配至钾长石中, 导致其 Pb 同位素具有现今的组成特征。

综合分析本次采样点所在矿床地质特征, 矿床中成矿物质 U 及金属 Pb 可能有几种来源: ①基性脉岩; ②矿区花岗岩; ③基底变质岩; ④上覆地层。由于基性脉岩中铀和铅含量均很低, 且本区铀成矿为上升热液流体成矿, 所以成矿物质 U 及金属 Pb 来自于基性脉岩和上覆地层被排除。变质岩中的 Pb 在水-岩作用过程中易被淋滤进入流体^[27], 基底变质岩有可能为矿化流体中 Pb 的源区, 但据对华南地区基底的 Pb 同位素的研究^[24], 本区变质基底的 Pb 同位素($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 及 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)组成变化较大(图 3), 这与本区热液碳酸盐中 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值变化较小相矛盾, 因此 Pb 亦不可能来自于基底变质岩。

据上述分析, 排除了其他各种可能性, 成矿流体中的 Pb 应来自于花岗岩, 尽管这种花岗岩是否为矿体围岩仍需进一步讨论, 但可以肯定的是这种源区花岗岩在铀丢失之前曾受到过至少一次的低 Th/U 值流体的交代作用, 使得花岗岩中的铀活化为容易被浸取出的铀。

朱炳泉等研究发现 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 最能反映源区变化, 而 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 只对成矿时代有灵敏的反映, 据此建立了铅同位素的 $\Delta\gamma - \Delta\beta$ 成因分类^[28]。在 Pb 同位素的 $\Delta\gamma - \Delta\beta$ 成因分类图解中(图 4), 本区碳酸盐矿物主要落入上地壳铅与俯冲带铅的混合部位, 并且表现出 $\Delta\beta$ 变化范围较大, 而 $\Delta\gamma$ 变化比较稳定的特征, 其展布范围与帽峰花岗岩相似, 而与笋洞花岗岩明显不同。以上特征表明, 碳酸盐矿物中 Pb 可能来自于与帽峰式花岗岩性质相似的花岗质岩石, 而不是主要来自于矿体围岩笋洞岩体花岗岩(或下庄岩体花岗岩), 暗示成矿物质(U)也可能主要来自与 Pb 同源的花岗岩体。

4.2 流体来源

4.2.1 Sr 同位素组成

前人的大量研究认为, 脉石矿物碳酸盐和萤石 Sr-Nd 同位素组成是示踪成矿流体来源的重要手段之一^[2,29-32], 由于 Sr 与 Ca 相似的地球化学特征, 两者易于发生类质同象置换, 而 Rb 则相反, 不易与 Ca 发生类质同象, 因而碳酸盐矿物和萤石是相对富 Sr 而贫 Rb 的矿物, 笔者测定了下庄矿田中 18 件碳

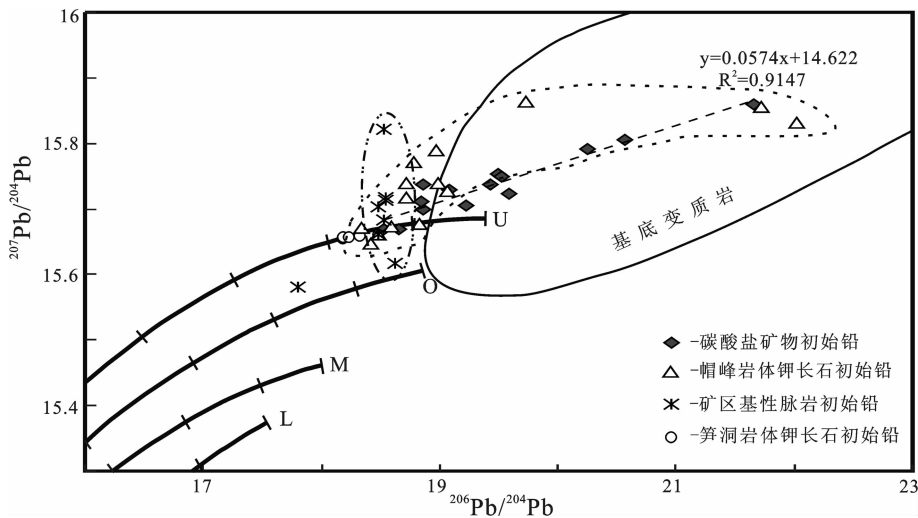


图3 下庄铀矿田部分矿床碳酸盐矿物 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解
(U—上地壳,O—造山带,M—地幔,L—下地壳)

Fig.3 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram for carbonates from the Xiazhuang uranium orefield
(U— Upper crust, O—Orogenic belt, M—Mantle, L—Lower crust)

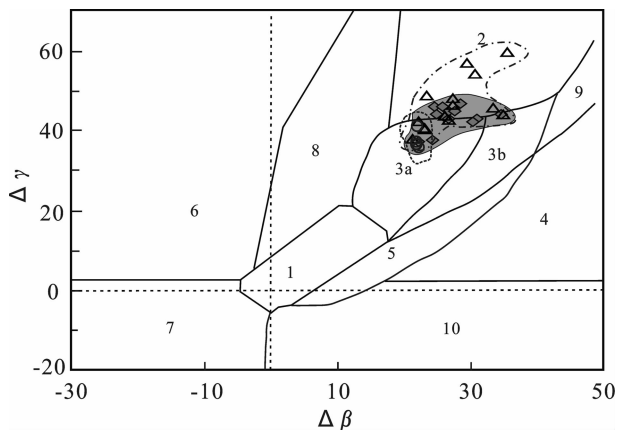


图4 下庄铀矿田碳酸盐矿物铅同位素的 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 成因分类图解(据朱炳泉等,1998;图例同图3)

1—地幔源铅;2—上地壳源铅;3—上地壳与地幔混合的俯冲带铅(3a.岩浆作用;3b.沉积作用);4—化学沉积型铅;5—海底热水作用铅;6—中深变质作用铅;7—深变质下地壳铅;8—造山带铅;9—古老页岩上地壳铅;10—退变质铅

Fig.4 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ diagram of genetic classification for carbonates from the Xiazhuang uranium orefield (after Zhu et al., legends as for Fig. 3)

1—Mantle lead; 2—Supracrustal lead; 3—Subducted lead from mixing of supracrustal and mantle lead (3a. Magmatism; 3b. Sedimentation); 4—Chemical deposit lead; 5—Submarine hydrothermal lead; 6—Medium-deep metamorphic lead; 7—Deep metamorphic lower crust lead; 8—Orogenic belt lead; 9—Ancient shale upper crust lead; 10—Retrograde metamorphic lead

酸盐矿物和萤石样品的微量元素含量,其中 Sr 含量为 $31.7 \times 10^{-6} \sim 514 \times 10^{-6}$, 而 Rb 含量均低于检测限。

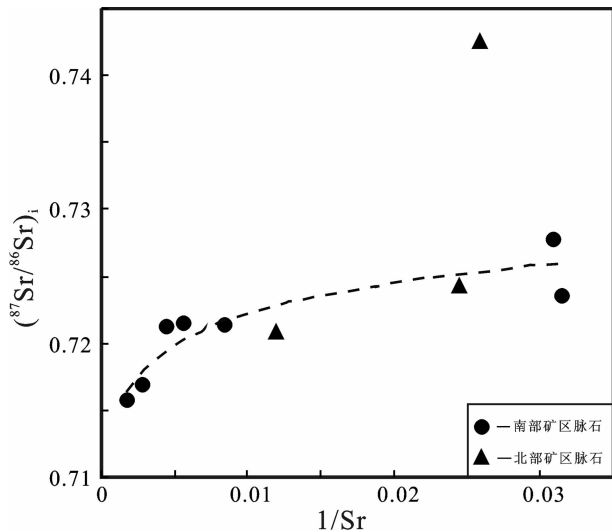


图5 下庄铀矿田脉石矿物 $1/\text{Sr}$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解

Fig.5 $1/\text{Sr}$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ diagram for gangue minerals from the Xiazhuang uranium orefield

正因为碳酸盐矿物和萤石为相对富 Sr 而贫 Rb,在成矿过程中这种矿物的 Sr 同位素组成基本不受 ^{87}Rb 衰变的影响,较好地保存了成矿流体本身的 Sr 同位素组成信息。然而,用 Sr 同位素组成探讨成矿流体的来源,必需考虑流体流经的路径、沉淀环境及 Sr 元素本身的性质。

Sr 在地球化学中属大离子亲石元素,其在由热液作用引起的水-岩反应过程中易溶于热液中从高 Sr 值的围岩中带出,从而进入流体随其迁移,流体

迁移距离愈长,迁移和矿质沉淀环境变化愈大,流体中 Sr 同位素记录的原始流体的信息愈少。本次研究所涉及的铀矿床大体上可分为矿田北部的 330 (希望)矿床和南部的 338、339 铀矿床。330 矿床中的萤石和方解石主要采自下庄岩体花岗岩为围岩的矿化带中,南部矿床中的萤石和碳酸盐矿物则采自近东西走向的基性脉岩与北北东向的构造相交接的矿化带中。

对比矿区主要围岩显示,北部希望矿床萤石和碳酸盐矿物的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值范围(0.720882~0.750679)与华南典型的陆壳改造型花岗岩^[24,33-34]范围一致,也与笋洞花岗岩的范围^[35]一致,而与矿区基性岩脉^[8,29]有明显区别,表明成矿流体源于花岗岩又在花岗岩(下庄岩体或帽峰岩体)中沉淀。南部的 338 和 339 矿床的萤石、碳酸盐矿物的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值范围(0.715 790~0.728 140)则介于矿区笋洞花岗岩与基性脉岩之间。前人对该区矿床中的方解石的 Sr 同位素地球化学研究认为,成矿流体源于深部幔源流体与壳源流体混合作用^[17],而笔者认为,这种部分样品的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值低于产铀花岗岩现象可能为深部壳源流体在矿质沉淀过程中与基性脉岩间水-岩反应所致,这一观点可从 $1/\text{Sr}-(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图中(图 5) $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 与 $1/\text{Sr}$ 成良好的正相关关系可得到证实,来自高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值、低 Sr 含量的富铀流体与低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值、高 Sr 含量的基性脉岩间的水-岩反应使南部矿床脉石矿物的 Sr 同位素组成具壳幔两端元混合的特征。

另外,由于 Sr 与 Ca 相似的地球化学性质,在碳酸盐矿物和萤石中两元素可相互替代,因而在脉石矿物的 Sr 同位素组成可用来大致判别 Ca 的来源^[36-37]。北部矿区的希望铀矿脉石矿物 Ca 为壳源,而南部矿区的仙人嶂和石角围铀矿脉石矿物除有壳源 Ca 外,基性脉岩中的 Ca 也可能在流体沉淀中参与形成脉石矿物。

4.2.2 Nd 同位素组成

下庄铀矿田本次分析的脉石矿物 Sm/Nd 值变化不大, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 值变化在 0.177 988~0.292 918。在 $^{143}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} - ^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 图(文中略)上未能构成很好的等时线,反映了流体中初始同位素组成可能并不均一。

Nd 在地球化学中属大离子亲石镧系稀土元素,其在热液活动中的性质与其他稀土元素相似。前文已经论述,本研究区内热液铀成矿过程中水-岩作用

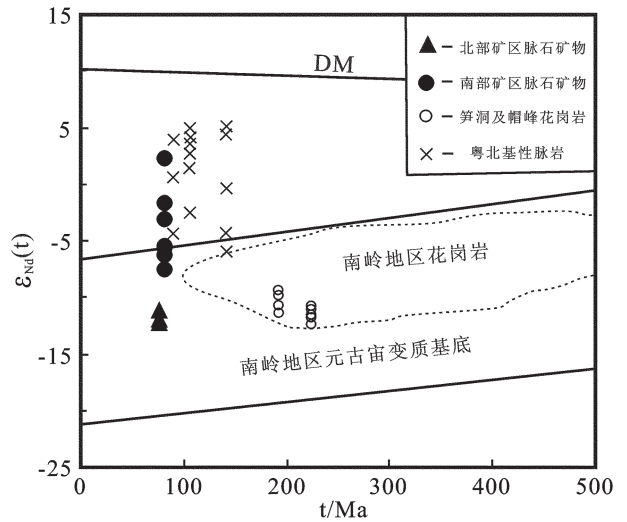


图 6 下庄矿田脉石矿物的 $t-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解
(图中粤北基性岩数据据李献华等,1997^[8];笋洞及帽峰花岗岩数据据凌洪飞等,2004,2005^[35,39];南岭花岗岩数据据袁忠信和张宗清,1992^[40])

Fig.6 $t-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram for gangue minerals from the Xiaozhuang uranium orefield

使得围岩中稀土元素部分转入了热液流体,而 Nd 也不例外,因此,脉石矿物的 Nd 同位素组成必定反映了流体途经围岩的部分 Nd 同位素组成特征。

本次分析样品中,北部希望矿床样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为-11.2~-12.3,位于华南地区改造型花岗岩的范围之内,也与本区产铀花岗岩(笋洞花岗岩、帽峰花岗岩)的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值范围一致,其 $T_{2\text{DM}}$ (1 793~1 881 Ma)与华夏地块结晶基底的模式年龄(1.8~2.2Ga)^[38]吻合,表明该矿床成矿流体可能源于壳源的基底变质岩或改造型花岗岩,而流体流经围岩和沉淀环境都为具有较低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值的壳源花岗岩。南部矿床中的碳酸盐矿物和萤石的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为-7.5~2.4,变化范围较大,且与希望矿床脉石矿物的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值有明显差别(图 6),其值位于华南地区改造型花岗岩与该区基性脉岩(-4.4~5.2,均值 3.6)之间,由公式计算的 $T_{2\text{DM}}$ (693~1 499Ma)明显小于华夏地块结晶基底的模式年龄。该区矿床中脉石矿物较高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值可能由来自壳源的成矿流体在矿质沉淀过程中与幔源基性脉岩发生水-岩交换所致,而非幔源流体与壳源流体的混合引起。

5 结论

(1)碳酸盐矿物 Pb 同位素组成可以有效示踪铀成矿物质来源,下庄矿田铀矿床中碳酸盐矿物 Pb

同位素组成研究显示,成矿物质铀源于帽峰式花岗岩性质相似的花岗质岩石。

(2)下庄矿田北部铀矿区矿床的成矿流体主要为壳源,Sr、Nd 同位素组成未显示幔源流体的信息。

(3)下庄矿田南部铀矿区铀矿床的成矿流体也主要为壳源,成矿流体在上升及沉淀过程中与基性脉岩发生水-岩反应而使其形成的脉石矿物的 Sr、Nd 同位素组成具有壳幔两端元混合的特征。

致谢:野外采样得到核工业 290 研究所和韶关中核金宏铀业有限公司的大力支持,室内工作得到中国科学院地球化学研究所张乾研究员、刘燊副研究员和中国地质科学院袁顺达副研究员等的帮助,在此一并致谢!

参考文献(References):

- [1] Simmons S F, Sawkins F J, Schlutter D J. Mantle-derived helium in two Peruvian hydrothermal ore deposits [J]. *Nature*, 1987, 329: 429-432.
- [2] Menuge J F, Feely M, O'Reily C. Origin and granite alteration effects of hydrothermal fluid: isotopic evidence from fluorite veins, Co. Galway, Ireland [J]. *Mineralium Deposita*, 1997, 32:34-43.
- [3] 彭建堂, 胡瑞忠, 蒋国豪. 萤石 Sm-Nd 同位素体系对晴隆铀矿床成矿时代和物源的制约[J]. *岩石学报*, 2003, 19(4):785-791.
Peng Jiantang, Hu Ruizhong, Jiang Guohao. Samarium - Neodymium isotope system of fluorites from the Qinglong antimony deposit, Guizhou Province: Constraints on the mineralizing age and ore-forming materials' sources [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(4):785-791 (in Chinese with English abstract).
- [4] Relvas J, Tassinari C, Munhá J, et al. Multiple sources for ore-forming fluids in the Neves Corvo VHMS Deposit of the Iberian Pyrite Belt (Portugal): strontium, neodymium and lead isotope evidence [J]. *Mineralium Deposita*, 2001, 36:416-427.
- [5] Stendal H, Frei R, Hamilton M. The Palaeoproterozoic Kangerluluk gold-copper mineralization (southeast Greenland): Pb and Nd isotopic constraints on its timing and genesis [J]. *Mineralium Deposita*, 2001, 36:177-188.
- [6] Buhn B, Schneider J, Dulski P, et al. Fluid-rock interaction during progressive migration of carbonatitic fluids, derived from small-scale trace element and Sr, Pb isotope distribution in hydrothermal fluorite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67:4577-4595.
- [7] 万博, 张连昌. 新疆阿尔泰山缘泥盆纪多金属成矿带 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学与构造背景探讨[J]. *岩石学报*, 2006, 22(1):145-152.
Wan Bo, Zhang Lianchang. Sr-Nd-Pb isotope geochemistry and tectonic setting of Devonian polymetallic metallogenic belt on the Southern margin of Altai, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22 (1):145-152(in Chinese with English abstract).
- [8] 李献华, 胡瑞忠, 饶冰. 粤北白垩纪基性脉岩的年代学和地球化学[J]. *地球化学*, 1997, 26(2):14-31.
Li Xianhua, Hu Ruizhong, Rao Bing. Geochronology and geochemistry of Cretaceous mafic dikes from northern Guangdong, SE China [J]. *Geochimica*, 1997, 26(2):14-31 (in Chinese with English abstract).
- [9] 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).
- [10] 张祖还, 章邦桐. 华南产铀花岗岩及有关铀矿床研究[M]. 北京: 原子能出版社, 1991:1-258.
Zhang Zuhuan, Zhang Bangtong. On the Uranium-bearing Granites and their Related Uranium Deposits in South China [M]. Beijing: Atomic Press, 1991:1-258 (in Chinese with English abstract).
- [11] 卢武长, 王玉生. 福建 570 矿区同位素地球化学研究[J]. *矿物岩石*, 1991, 11(2):65-71
Lu Wuchang, Wang Yusheng. Isotopic geochemical investigations of the 570 ore area, Fujian [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 1991, 11(2):65-71(in Chinese with English abstract).
- [12] Lu J J, Shen W Z, Gao J F. Isotopic geochemistry of the Xiwang uranium deposit in Wengyuan, China [J]. *Geochim Comsmoch Acta*, 2006:A372.
- [13] 叶海敏, 沈渭洲, 凌洪飞, 等. 粤北仙石铀矿床的铅、碳、硫同位素研究[J]. *高校地质学报*, 2005, 11(2):276-280.
Ye Haimin, Shen Weizhou, Ling Hongfei, et al. Lead, carbon and sulfur isotopic composition of the Xianshi uranium deposit, northern Guangdong Province [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2005, 11 (2):276-280 (in Chinese with English abstract).
- [14] 朱捌, 凌洪飞, 沈渭洲, 等. 粤北石土岭铀矿床同位素地球化学研究[J]. *矿床地质*, 2006, 25(1):71-82.
Zhu Ba, Ling Hongfei, Shen Weizhou, et al. Isotopic geochemistry of Shituling uranium deposit, northern Guangdong Province, China [J]. *Mineral Deposit*, 2006, 25 (1):71-82 (in Chinese with English abstract).
- [15] 吴烈勤, 谭正中, 刘汝洲, 等. 粤北下庄铀矿田成矿时代探讨[J]. *铀矿地质*, 2003, 19(1):28-33.
Wu Lieqin, Tan Zhengzhong, Liu Ruzhou, et al. Discussion on uranium ore-formantion age in Xia Zhuang ore-field, northern Guangdong [J]. *Uranium Geology*, 2003, 19(3):28-33(in Chinese with English abstract).
- [16] 邓平, 沈渭洲, 凌洪飞, 等. 地幔流体与铀成矿作用——以下庄矿田仙石铀矿床为例[J]. *地球化学*, 2003, 32(6):520-528.

- Deng Ping, Shen Weizhou, Ling Hongfei, et al. Uranium mineralization related to mantle fluid: A case study of the Xianshi deposit in the Xiazhuang uranium orefield [J]. *Geochimica*, 2003, 32(6):520-528(in Chinese with English abstract).
- [17] Depaolo D J. Implications of correlated Nd and Sr isotopic variations for the chemical evolution of the crust and mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1979, 43:201-211.
- [18] Jacobson S B, Wasserburg J G. Sm-Nd isotopic evolution of chondrites [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1980, 50:139-155.
- [19] 张展适, 华仁民, 邓平, 等. 诸广-下庄铀矿集区成矿过程中水-岩作用的地质地球化学特征 [J]. *地球化学*, 2005, 34 (5):483-494.
- Zhang Zhanshi, Hua Renmin, Deng Ping, et al. Geological and geochemical characteristics of water-rock interaction in the processes of uranium mineralization in Zhuguang-Xiazhuang uranium ore-concentrated district [J]. *Geochimica*, 2005, 34(5):483-494 (in Chinese with English abstract).
- [20] 金景福, 胡瑞忠. 希望铀矿床物质来源探讨 [J]. *矿床地质*, 1990, 9(2):141-148.
- Jin Jingfu, Hu Ruizhong. A tentative discussion on material sources of the Xiwang uranium deposit [J]. *Mineral Deposit*, 1990, 9(2):141-148 (in Chinese with English abstract).
- [21] 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(3):10-17.
- Zhang Chengjiang. The features of uraninite in Guidong granite complex and its significance to search for uranium deposit [J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, 1990, 17 (3):10-17(in Chinese with English abstract).
- [22] 陈佑伟, 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(in Chinese with English abstract).
- [23] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics—The model [J]. *Tectonophysics*. 1981, 75:135-162.
- [24] 张理刚, 刘敬秀, 王可法. 东亚岩石圈块体地质—上地幔、基底和花岗岩同位素地球化学及其动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1995:1-252.
- Zhang Ligang, Liu Jingxiu, Wang Kefa. *Geology of Eastern Asia Lithosphere Block—Pb Isotopic Geochemistry and Its Geodynamics for Upper Mantle, Basement and Granites* [M]. Beijing: Science Press, 1995:1-252 (in Chinese with English abstract).
- [25] Ling H F, Shen W Z, Deng P, et al. Geochemical characteristics and genesis of the Luxi-Xianrenzhang diabase Dikes in Xiazhuang uranium orefield, northern Guangdong Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(4):497-506.
- [26] 陆建军, 吴烈勤, 凌洪飞, 等. 粤北下庄铀矿田黄陂-张光营辉绿岩脉的成因元素地球化学和 Nd-Sr-Pb-O 同位素证据[J]. *岩石学报*, 2006, 22(2):397-406.
- Lu Jianjun, Wu Lieqin, Ling Hongfei, et al. The origin of the Huanpi-Zhangguangying diabase dykes in the Xiazhuang uranium ore district of northern Guangdong province: evidence from trace elements and Nd-Sr-Pb-O isotopes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(2):397-406(in Chinese with English abstract).
- [27] Nie F J, Bjarlykke A. Lead and sulfur isotope studies of the Wulashan quartz-K feldspar and quartz vein gold deposit, southwestern Inner Mongolia, People's Republic of China [J]. *Economic Geology*, 1994, 89:1289-1305.
- [28] 朱炳泉, 等. 地球科学中同位素体系理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998:1-330.
- Zhu Bingquan, et al. *The Theory of Isotopic Systems and its Applications in Geosciences* [M]. Beijing: Science Press, 1998:1-330(in Chinese with English abstract).
- [29] Carignan J, Gariépy C, Hillaire-Marcel C. Hydrothermal fluids during Mesozoic reactivation of the St. Lawrence rift system, Canada: C, O, Sr and Pb isotopic characterization. *Chemical Geology*, 1997, 137:1-21.
- [30] Voicu G, Bardoux M, Stevenson R, et al. Nd and Sr isotope study of hydrothermal scheelite and host rocks at Omai, Guiana Shield: implications for ore fluid source and flow path during the formation of orogenic gold deposits [J]. *Minerium Deposita*, 2000, 35:302-314.
- [31] Jiang Y H, Ling H F, Jiang S Y, et al. Trace element and Sr-Nd isotope geochemistry of fluorite from the Xiangshan uranium deposit, Southeast China [J]. *Economic Geology*, 2006, 101:1613-1622.
- [32] 刘建明, 叶杰, 徐九华, 等. 胶东金矿床碳酸盐矿物的碳-氧和铈-钕同位素地球化学研究[J]. *岩石学报*, 2003, 19(4):775-784.
- Liu Jianming, Ye Jie, Xu Jiuhua, et al. C-O and Sr-Nd geochemistry of carbonate minerals from gold deposits in East Shandong, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19 (4):775-784 (in Chinese with English abstract).
- [33] 沈渭洲, 凌洪飞, 李武显, 等. 中国东南部花岗岩类 Nd-Sr 同位素研究[J]. *高校地质学报*, 1999, 5(1):22-32.
- Shen Weizhou, Ling Hongfei, Li Wuxian, et al. Study on the Nd-Sr isotopic compositions of granitoids in SE china [J]. *Geological Journal of China Universities*, 1999, 5 (1):22-32 (in Chinese with English abstract).
- [34] 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):1209-1218.
- Sun Tao, Zhou Xinmin, Chen Peirong, et al. Strongly peraluminous granites of Mesozoic in Eastern Nanling Range southern China—Petrogenesis and implications for tectonics [J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 33 (12):1209-1218 (in Chinese).
- [35] 凌洪飞, 沈渭洲, 邓平, 等. 粤北笋洞花岗岩的形成时代、地球化

- 学特征与成因[J].岩石学报, 2004, 20(3):413-424.
- Ling Hongfei, Shen Weizhou, Deng Ping, et al. Age, geochemistry and Petrogenesis of the Sundong granite, northern Guangdong province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(3): 413-424 (in Chinese with English abstract).
- [36] Ruiz J, Kesler S E. Strontium isotope geochemistry of fluorite mineralization associated with fluorine-rich igneous rocks from the Sierra Madre occidental, Mexico: possible exploration significance [J]. *Economic Geology*, 1985, 80:33-42.
- [37] Barbieri M, Bellanca A. Use of strontium isotopes to determine the source of hydrothermal fluorite and barite from northwestern Sicily (Italy) [J]. *Chemical Geology*, 1987, 66:273-278.
- [38] 陈江峰, 江博明. Nd, Sr, Pb 同位素示踪和中国东南大陆地壳演化 [C]//郑永飞. 化学地球动力学. 北京: 科学出版社, 1999:262-287. Chen Jiangfeng, Jiang Boming. Nd, Sr, Pb isotope tracers and evolution of continental crust of SE China [C]//Zheng Yongfei (ed.). *Chemical Geodynamics*. Beijing: Science Press, 1999:262-287(in Chinese with English abstract).
- [39] 凌洪飞, 沈渭洲, 邓平, 等. 粤北帽峰花岗岩体地球化学特征及成因研究[J]. 岩石学报, 2005, 21(3):677-687. Ling Hongfei, Shen Weizhou, Deng Ping, et al. Study of the geochemistry and petrogenesis of the Maofeng granite, northern Guangdong Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(2): 677-687(in Chinese with English abstract).
- [40] 袁忠信, 张宗清. 南岭花岗岩类岩石 Sm、Nd 同位素特征及岩石成因探讨[J]. 地质论评, 1992, 38(1):1-15. Yuan Zhongxin, Zhang Zongqing. Sm-Nd isotopic characteristics of granitoids in the Nanling region and their petro-genetic analysis [J]. *Geological Review*, 1992, 38(1):1-15(in Chinese with English abstract).

Sr, Nd and Pb isotopic geochemistry of gangue minerals in the Xiazhuang uranium orefield, northern Guangdong Province

SHANG Peng-qiang^{1,2,3}, HU Rui-zhong², BI Xian-wu², ZHANG Guo-quan², TIAN Jian-ji⁴

- (1. *Geological Institute, Bureau of Mining and Geology of China Chemical Industry, Zhuozhou 072750, Hebei, China*;
2. *State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China*; 3. *Bureau of Mining and Geology of China Chemical Industry, Beijing 100101, China*;
4. *Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China*)

Abstract: The Xiazhuang uranium orefield is an important uranium producing area in Nanling region, where there exist many ore deposits. To solve the much controversial problems of the origin of uranium and the ore-forming fluid, this research is focused on Sr, Nd and Pb isotopic geochemistry of the gangue minerals. The results show that the carbonate has rich radioactive lead. The lead and uranium mainly came from such granitic rock bodies as Maofeng granite. The compositions of Sr and Nd isotope show that the ore-forming fluid was mainly derived from the crust. The water-rock interaction between the ore-forming fluid and the basic dike rock during the upward migration of the ore-forming fluid and the precipitation of uranium formed the feature of binary composition of the gangue minerals.

Key words: Sr, Nd and Pb isotope; Xiazhuang uranium orefield; gangue minerals; metallogenic materials, ore-forming fluid

About the first author: SHANG Peng-qiang, male, born in 1980, senior engineer, engages in the study of mineral deposits; E-mail: shang5551983@163.com.