

花岗岩型热液铀矿床 C,O 同位素研究

——以粤北下庄铀矿田为例

商朋强^{1,2}, 胡瑞忠¹, 毕献武¹,
刘雷^{1,2}, 张国全^{1,2}

- (1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学重点实验室, 贵州 贵阳 550002;
2. 中国科学院北京研究生院, 北京 100039)

【摘要】 下庄矿田是华南重要的热液铀矿产区, 区内控矿条件复杂。研究选取下庄矿田部分矿床内热液碳酸盐样品并测定其 C,O 同位素组成: 测定矿田北部的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 -7.6‰ ~ -8.4‰ , $\delta^{18}\text{C}_{\text{SMOW}}$ 为 12.1‰ ~ 13.2‰ , 而矿田南部测波动范围较大 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 则为 -3.1‰ ~ -8.5‰ , $\delta\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为 10.4‰ ~ 14.1‰ 。进一步研究结果表明, 成矿流体中矿化剂 ΣCO_2 主要来源于中新世与区域深大断裂有关的幔源脱气作用, 同时伴有壳源有机碳来源; 成矿同时期伴随的强烈流体脱气(CO_2)作用对矿质沉淀至关重要。

【关键词】 下庄铀矿田; 碳酸盐; C,O 同位素; 矿化剂

中图分类号: P619.14 文献标识码: A

文章编号: 1001-6872(2006)03-0071-06

0 引言

热液矿床碳酸盐 C,O 同位素组成不仅可以用来示踪流体来源, 而且还能反映成矿流体的热力学演化^[1~3]。花岗岩型热液铀矿床中的 U 在成矿流体中主要以碳酸铀酰络合离子 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2]^{2-}$ 和 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ 形式迁移^[4,5], 而 ΣCO_2 作为热液从铀源

花岗岩中浸取铀的主要矿化剂, 其对铀成矿的制约贯穿了始终。因而应用 C,O 稳定同位素方法对 ΣCO_2 在该类型铀矿成矿中的作用加以探讨对于了解其成矿机制具有重要意义。

下庄铀矿田是我国最大的花岗岩型铀矿田之一, 我国发现的第一个花岗岩型铀矿——希望矿床就位于其中。该矿田具有成矿规模大、矿床类型多且成矿明显受北东向张性断裂控制等特征。自勘探开

发以来,先后针对该区岩浆活动、控矿因素及矿床成因等方面进行了不同程度的分析、研究^[6~10],而对于矿化剂 ΣCO_2 在成矿中的作用机制尚待商榷。本次研究旨在揭示本区通过开展矿田内部分矿床的 C、O 同位素组成及其对成矿的制约机制的研究,铀矿成矿流体中矿化剂 ΣCO_2 的来源及作用机理。

1 地质背景

南岭地区是我国重要的铀矿区之一,铀矿床多赋存于中生代花岗岩或与其围岩的接触带中,且据已有的研究,该区铀矿多与中生代发育的北东向断陷带或断陷盆地有着紧密联系^[12,13]。下庄矿田处于南岭花岗岩带南段的贵东复式岩体东部,区域上位于华南后加里东褶皱隆起带与海西-印支期拗陷带的交界部位,区域上受近北东向的中生代黄陂石英断裂带-马屎山断裂带控制,岩体的东南侧发育有数个 K-E 断陷盆地(图 1)。

贵东岩体东部侵入于寒武系和泥盆系地层中。寒武系地层的岩性为浅变质石英砂岩、含碳石英砂岩、千枚状页岩和炭质页岩,属过铝质岩石,泥盆系地层主要为砂页岩类岩石,地层中的铀含量比较高。组成贵东岩体东部的岩性较复杂,主体岩性为鲁溪岩体的粗粒斑状黑云母花岗岩、下庄岩体的中粒斑状黑云母花岗岩及细粒白云母花岗岩(冒峰式岩体),后期侵入的中酸性岩浆岩分别为中细粒二云母花岗岩(司前式岩体),各期次的花岗岩均为过铝质花岗岩,其中,冒峰式岩体受到了后期的碱交代蚀变^[7]。鲁溪岩体、下庄岩体、司前岩体和冒峰岩体据最新的锆石 U-Pb 年龄分别为 239 Ma \pm 5 Ma, 235.8 Ma \pm 7.6 Ma, 151 Ma \pm 11 Ma 和 219.6 Ma \pm 0.9 Ma^[7,14]。自中生代晚期以来,在岩体东部(矿区)先后有 3 期次(\sim 140 Ma、 \sim 105 Ma、 \sim 90 Ma)^[7]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。

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,而南部矿床矿体多受到基性脉岩体控制。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,脉石矿物主要有玉髓、石英、萤石及方解石等。围岩蚀变矿前期以微斜长石化、钠长石化和绿泥石化为主,

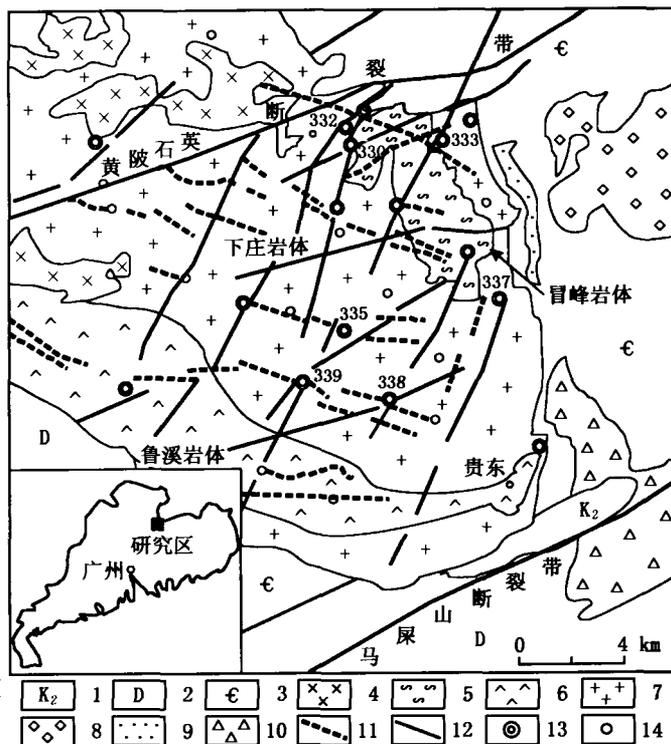


图 1 下庄矿田地质示意图(据核工业 741 矿,2003)

1. 白垩系上统砾岩、砂砾岩; 2. 泥盆系砂页岩; 3. 寒武系浅变质砂页岩; 4. 中细粒二云母花岗岩; 5. 细粒白云母花岗岩; 6. 粗粒斑状黑云母二长花岗岩; 7. 中粒斑状黑云母花岗岩; 8. 中粒片麻状黑云母花岗岩; 9. 加里东期片麻状花岗岩; 10. 海西期片麻状花岗岩; 11. 晚中生代基性岩脉; 12. 断裂; 13. 矿床; 14. 矿点、矿化点

Fig. 1 Geological sketch of Xiazhuang uranium ore field

成矿期主要为硅化、萤石化、水云母化和碳酸盐化,矿后期以碳酸盐化和粘土化为主。

2 样品采集及分析方法

碳酸盐为下庄铀矿田比较重要的脉石矿物,据本次采集的样品可将其分为与成矿无关的发育于基性脉岩裂隙内的后期细脉状白色方解石、成矿早期肉红色碳酸盐及成矿晚期的脉状浅色碳酸盐。在矿区的南部和北部所采样品有所差异:北部 330(希望)、332(新桥)的成矿晚期碳酸盐多为浅肉红色,产于花岗岩水云母化、绿泥石化带中,多与灰色微晶石英、水云母及绿泥石共生,晚期浅色碳酸盐两侧发育梳状石英,碳酸盐化发育于矿体底部;南部矿区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。

室内将所采集碳酸盐样品逐级破碎、过筛,使粒级至 40 目 \sim 60 目,然后在双目镜下挑选,使其纯度达到 98% 以上。碳酸盐的 C、O 同位素组成的分析

由中国地质科学院矿产资源研究所完成。分析采用 100%磷酸法,质谱计型号 MAT 251 EM,分析精度 ±0.2%。计算 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$ 时,采用 Friedman & O'Neil^[13] 的公式: $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = 1.030\ 86\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} + 30.86$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 为全氧值, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为碳酸盐碳同位素组成。

3 分析结果及讨论

3.1 C、O 同位素组成

从矿区热液碳酸盐 C、O 同位素组成分析结果(表 1)可以看出该区碳酸盐同位素组成有以下特征:

①矿田北部的矿床包括 330, 332; 其碳酸盐 C、O 同位素组成相对均一, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值介于 $-7.6\text{‰} \sim -8.8\text{‰}$ 、均值 -8.4‰ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值介于 $12.1\text{‰} \sim 13.2\text{‰}$ 、均值 12.9‰ ; 矿田南部矿床包括 339(石角围)、338(仙人嶂)及 335 矿床,其碳酸盐 C、O 同位素组成与北部矿床相比波动范围较大, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 $-3.1\text{‰} \sim -8.5\text{‰}$, 极差 -5.4‰ , 均值 -5.8‰ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值为 $10.4\text{‰} \sim 14.1\text{‰}$, 均值 12.2‰ 。成矿期和成矿晚期形成的碳酸盐的 C、O 同位素组成没有明显差别,碳同位素组成虽然南北部的矿床有所差别,但总体稳定在岩浆或幔源碳范围之内。

表 1 下庄铀矿田碳酸盐碳氧同位素组成

Table 1 $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of carbonate in Xiaozhuang uranium ore field

样号	采样位置	描述	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$		
北区碳酸盐	1	330	晚期浅红色块状	-8.6	12.7	
	2	330	晚期白色脉状	-8.6	13	
	3	330	晚期浅红色脉状	-8.7	13	
	4	330	晚期浅红色脉状	-8.7	13.2	
	5	330	晚期白色脉状	-7.6	12.7	
	6	332	晚期白色细脉状	-7.7	13.3	
	7	332	晚期浅肉红色脉状	-8.8	12.1	
	8	335	晚期肉红色脉状	-5	13	
	9	335	晚期白色脉状	-6.2	13.7	
	10	335	晚期白色块状	-8.1	12.5	
南区碳酸盐	11	338	晚期白色块状	-6.5	13.2	
	12	338	晚期肉红色团粒状	-6.4	10.9	
	13	338	早期白色块状	-6.2	13.5	
	14	338	晚期肉红色团粒状	-3.4	13.4	
	15	338	晚期白色块状	-7.3	10.6	
	16	338	晚期肉红色团粒状	-3.9	11.7	
	17	339	成矿期肉红色	-5	10.6	
	18	339	成矿期肉红色脉状	-5.1	10.8	
	19	339	晚期期白色块状	-5	11	
	20	339	早期白色块状	-4.7	10.5	
	21	339	早期肉红色块状	-5.3	10.4	
	其他	22	333	白色细脉(基性脉岩裂隙间)	-14.5	20.3
	其他	23	332	白色细脉(基性脉岩裂隙间)	-15	21.5

注:除 12, 11, 16 号样品的测试对象为白云石,其余均为方解石

②采于矿田北部基性岩脉中离矿体较远的白色方解石脉可被认为是与铀成矿无关的后期方解石脉。其 C、O 同位素组成($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 分别为 -14.5‰ , -15.0‰ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 分别为 20.3‰ , 21.5‰)与成矿

有关的碳酸盐有着明显的区别,与法国中央高原地区铀矿床中与沥青铀矿密切相关的碱交代岩中富 CO_2 包裹体(被认为大气降水成因)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值^[16]相似。这种显著亏损 $\delta^{13}\text{C}$ 的低温方解石可能为大气降水沿断裂裂隙下渗并与围岩发生水-岩反应沉淀形成。

3.2 讨论

3.2.1 矿化剂来源探讨 对花岗岩型铀矿已有的研究表明,该类铀矿的矿质(沥青铀矿)来源于已固结的花岗岩似乎已无可争议,流体中的水主要来自大气降水亦被多数学者认同^[10,17]。但对于花岗岩型热液铀矿床中的矿化剂 ΣCO_2 来源问题,争议颇大, Ruzicka V 认为世界上大多数脉状铀矿的 ΣCO_2 与大气降水和围岩作用有关^[18]。而目前流行的有 3 个基本观点,即矿化剂分别源于花岗岩本身^[17,19]、围岩地层^[20]及幔源脱气作用^[4,6,21],也有学者认为不同地质背景的矿床矿化剂可能为不同来源^[22]。持矿化剂来源于花岗岩本身观点的学者认为,与成矿密切相关碳酸盐碳同位素值与花岗岩浆的碳同位素组成相似,热液铀成矿过程中,花岗岩岩浆期后富矿化剂 ΣCO_2 的热液或淋滤了花岗岩中碳酸盐的大气降水成因热液浸取花岗岩中的铀,一定物理化学条件下,于一定部位富集成矿;由于部分花岗岩型铀矿赋存于与花岗岩接触的地层中,加之成矿时的方解石的碳同位素组成与围岩地层中的相似,研究外接触带花岗岩型铀矿的学者认为其中的碳主要来自地层中。总之,以上各观点虽然可以解释部分地质现象,但还有一些问题无法解释。

关于下庄矿田矿化剂 ΣCO_2 来源问题在文献^[4,6,10]中有所论述,且均认为其应该来自幔源脱气作用。综合前人数据,在统计下庄铀矿区与成矿有关的碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值发现其稳定于 $-3.1\text{‰} \sim -9.2\text{‰}$ 之间(图 2),又据已有的包裹体测温数据^[23,24]显示,本区与成矿有关的碳酸盐的形成温度 $110\text{C} \sim 220\text{C}$,经计算与这些碳酸盐平衡的成矿流体中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值约为 $-2.51\text{‰} \sim -11.09\text{‰}$,北部矿床竟达到 $-9.9\text{‰} \sim -11.09\text{‰}$ 。成矿流体中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值虽然介于岩浆-地幔碳与有机碳之间而倾向于岩浆-地幔碳占优(图 3),说明了碳应不可能为单一来源。根据分析,矿床中未见与矿石共生的变质成因的石墨,围岩蚀变为中低温的蚀变,故矿化剂 ΣCO_2 主要来自于变质成因并不可能。因此这个结果中的一个端元 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低的碳应来自大气降水或其淋滤带来的地层有机碳,那么另一端元的岩浆-地幔碳应来自何处呢?据此次对下庄矿田的研究,虽然华南花岗岩中碳

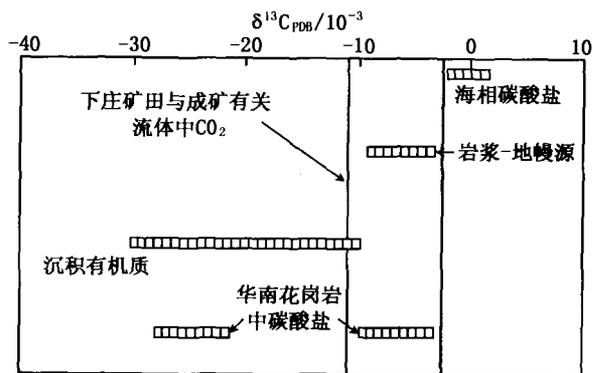


图3 下庄矿田成矿流体中CO₂与不同来源碳的δ¹³C比较(华南花岗岩碳酸盐碳同位素据[25])

Fig. 3 δ¹⁸O vs δ¹³C diagram of calcite from Xiaozhuang uranium ore field
碳酸盐的δ¹³C值[25]与所测之δ¹³C值相似,但其中的矿化剂ΣCO₂亦不可能主要来自围岩花岗岩,理由如下:

(1)成岩成矿时差的存在:华南地区花岗岩型铀矿床普遍存在矿岩时差,本区亦不例外。研究采样点所在范围铀成矿时间绝大部分位于54.5 Ma~90.0 Ma之间(石角围有一个样品测定为125 Ma)^[6,11],而围岩花岗岩成岩时代前已述及,两者之间时差至少为56 Ma,远远超过了岩浆活动所能影响的最大时限。且据铀成矿与区内岩石(花岗岩、基性脉岩)已有的年代学研究表明,本区铀成矿与花岗岩浆活动之间还存在着多次以基性岩浆活动为标志的地壳拉张事件。本区花岗岩岩浆分异出的岩浆流体明显贫CO₂和HCO₃⁻^[26],即使花岗岩浆可以分异出足以致矿的富矿化剂热液,也会早于成矿前消耗殆尽;(2)热液铀成矿实验表明,纯水和其它阴离子形成的热液在热液铀成矿前所需物理化学条件下从花岗岩中浸取铀的能力远低于富ΣCO₂或HCO₃⁻的热液^[27]。大量流体包裹体成分分析业已证实,形成花岗岩型

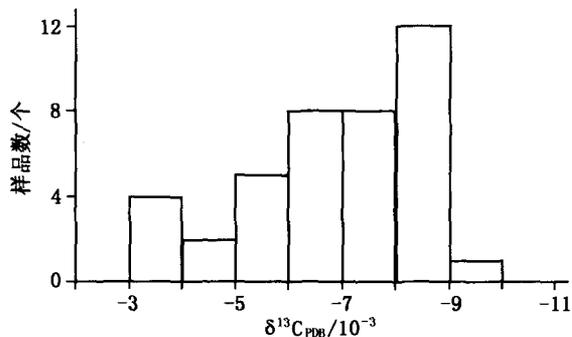


图2 下庄矿田与成矿有关碳酸盐δ¹³C值统计直方图(部分数据来自文献[4,6,10])

Fig. 2 δ¹³C histogram of carbonate related to mineralization in Xiaozhuang uranium ore field

铀矿的矿前期热液是高度富集ΣCO₂的热液,仅凭大气降水及裂隙水溶解花岗岩中的微量碳酸盐难以形成成矿所需的富矿化剂热液,而未发生矿化时循环于深部的热液是贫矿化剂、贫铀的热液。

据以上分析,认为该区铀成矿流体中矿化剂ΣCO₂有部分来自于有机碳,但主要来源为幔源。首先,下庄矿田与成矿有关的方解石的δ¹³C值(均值-6.4‰)与幔源δ¹³C值^[28](-3‰~-9‰)基本一致;其次,矿田范围内存在与矿化(U-Pb年龄~138 Ma,~81 Ma)^[6,11]同期次的来自于富集地幔(?)基性岩浆活动(~140 Ma,~90 Ma),而基性脉岩的侵入代表了地壳的强烈拉张事件。而从区域上看,华南地区白垩纪-第三纪岩石圈6阶段强烈拉张期(135 Ma~140 Ma,~124 Ma,~105 Ma,~90 Ma,70 Ma~75 Ma,45 Ma~55 Ma)^[29,30]中的四个阶段(135 Ma~140 Ma,~124 Ma,~90 Ma,70 Ma~75 Ma)在下庄矿田均发育不同程度的铀矿化。铀矿化时代与地壳拉张期(基性岩浆活动期)高度的一致性暗示幔源物质或热动力参与该区铀成矿的可能性;最后,据镜下观察结合前人研究认为,成矿前发育于矿床深部的碱质交代作用,伴随较强烈的碳酸盐化作用,而碱交代作用是地幔流体特有的一种交代形式^[31]。以上分析显示,该区铀成矿的矿化剂ΣCO₂应主要来源于幔源,其形成是由于中生代华南地区地壳强烈拉张事件产生的区域性深大断裂导通了地幔,使幔源脱气成因的ΣCO₂沿深大断裂上升,从而参与该区热液铀矿床的形成。

3.2.2 C,O同位素演化机制 前已述及,本区铀成矿所需矿化剂ΣCO₂主要来自深部与张性断裂有关的幔源脱气作用,与成矿有关的碳酸盐碳同位素组成位于岩浆碳范围之内,而氧同位素组成较原始碳酸盐高。假定成矿早期碳酸盐形成温度为200℃,成矿晚期温度为130℃,据碳酸盐矿物-流体氧同位素分馏系数 $[1000 \ln \alpha_{\text{方解石-水}} = 2.78 \times 10^6 / T^2 - 3.39]$ (0~700℃)^[32],计算值与成矿期碳酸盐平衡的流体的δ¹⁸O为1.37‰~4.37‰,矿后期流体δ¹⁸O为-3.21‰~0.01‰。成矿流体中的水主要由循环的大气降水(经水-岩同位素交换)组成,可能有深部流体的参与。流体的氧同位素值随成矿演化而逐渐降低,这是由于温度降低与大气降水不断加入耦合作用所致。

矿床内碳酸盐矿物的沉淀可能有以下几种情况造成:①流体与围岩的水-岩反应;②热液脱气作用;③流体混合作用^[33]。从碳-氧同位素相关图解中(图2)可以看出,本区与成矿有关碳酸盐碳-氧同位素组

成可分两组,北区碳酸盐C、O同位素组成具有明显近水平的负相关关系,而南区碳酸盐C、O同位素组成相对分散。显然,南北两区碳酸盐经历了不同的沉淀过程。围岩强酸性花岗岩中的碳酸盐含量甚微,水-岩反应虽然可以改变流体的氧同位素组成,却无法使其中的 CO_2 和 HCO_3^- 达到饱和致使碳酸盐沉淀;流体包裹体及野外地质观察证实,碳酸盐成矿阶段及成矿后期流体发生沸腾作用^[18,23],这是热液脱气作用一个明显标志,当 CO_2 从流体中丢失时,溶液的pH值升高,碳酸盐变得过饱和,结果就会引起碳酸盐的沉淀。

对于北区,碳酸盐形成之前流体为大气降水流体与深源流体的混合,形成了稳定的C、O同位素组成,成矿晚期形成了较为低温的方解石。铀成矿晚期,流体中 CO_2 形式应以 HCO_3^- 为主。利用 CO_2 从流体中脱气有关批式模型公式(batch degassing-precipitation model)^[33]:

设成矿流体脱气比分别为0.1和0.05,两值对应流体的初始 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 $[(-9.8\text{‰}, 4.0\text{‰}), (-8.8\text{‰}, 4.0\text{‰})]$ 及 $[(-10.3\text{‰}, 4.0\text{‰}), (-9.1\text{‰}, 4.0\text{‰})]$ 。计算采用文献^[32~34]分馏系数,得如图4所示碳酸盐沉淀模式图。由图4中可知,所测数据值与理论计算具有很好的一致性,证明本区几个铀矿床形成过程中 CO_2 脱气作用是致使矿质沉淀的一种重要机制。

矿区南部的碳酸盐C、O同位素组成相对分散,暗示在成矿过程中有其他来源碳的参与。野外观察得知,本区矿脉绝大部分位于基性脉岩内,而基性脉岩相对于围岩花岗岩其碳酸盐含量大大增加。表明成矿流体在发生脱气前或脱气同时与 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高的基性脉岩($\delta^{13}\text{C} \approx -3\text{‰} \sim -5\text{‰}$)发生了水岩交换

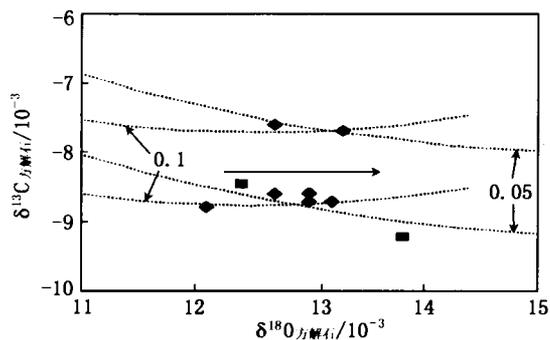


图4 下庄矿田北区与成矿有关的方解石从热液中沉淀模式图(图中代表数据据文献^[9])

Fig. 4 Model of carbonate precipitation from hydrothermal fluids in Xiaozhuang ore field

及碳的交换反应,使得该区C、O同位素组成较为复杂。

4 结 论

矿化剂 ΣCO_2 在热液铀成矿中的作用近来已经成为众多学者关注的热点。尽管其它矿化剂(F、 SiO_2 等)在华南热液铀矿成矿中的作用亦不可忽视,但由于 ΣCO_2 在热液铀成矿中起主导性制约作用,因此探讨其在铀成矿中的行为具有特别的意义。

4.1 下庄铀矿田成矿流体中 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于岩浆-地幔碳与有机碳之间,而倾向于前者占优。矿化剂 ΣCO_2 有部分来源于有机碳,但主要来源于沿深大断裂上升的幔源脱气成因的 ΣCO_2 。

4.2 通过对矿区北部部分铀矿床碳酸盐沉淀的模拟,证明了脱气作用在本区铀成矿过程中的重要性。且这一研究对华南大部分热液铀矿床具有适用性。

参考文献

- [1] Taylor B E. Carbon-oxygen isotope geochemistry of ore-forming fluids[A]. In: Kyser T K, ed. *Geochemistry of Low Temperature Fluids. Mineral. Assoc. Can. Short Course*[C]. Mineralogical Society of Canada, Toronto, 1987, 13: 337-445.
- [2] Spangenberg J, Fontboté L, Sharp Z D, et al. Carbon and oxygen isotope study of hydrothermal carbonates in the zinc-lead deposits of the San Vicente district, central Peru: a quantitative modeling on mixing processes and CO_2 degassing[J]. *Chemical Geology*, 1996, 133: 289-315.
- [3] Choi S G, Kim S T, Lee J G. Stable isotope systematics of Ulsan Fe-W skarn deposit, Korea[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2003, 78-79: 601-606.
- [4] 胡瑞忠, 李朝阳, 倪师军, 等. 华南花岗岩型铀矿床成矿热液中 ΣCO_2 来源研究[J]. *中国科学(B辑)*, 1993, 23(2): 189-196.
- [5] Chen P R, Zhang B T, Zhang Z H. Speciation and precipitation of uranium complexes in hydrothermal solutions related to granite-type uranium deposits[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 1992, 11(3): 252-259.
- [6] 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.
- [7] 徐夕生, 邓平, S. Y. O' Reilly, 等. 华南粤东杂岩体单颗粒锆石激光探针 ICPMS U-Pb 定年及成岩意义[J]. *科学通报*, 2003, 48(12): 1328-1334.
- [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.
- [9] 胡瑞忠. 希望铀矿床成矿机理[D]. 成都地质学院放射性地质系, 1987.
- [10] 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, 1-189.
- [11] 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.
- [12] 陈跃辉, 陈肇博, 陈祖伊, 等. 华东南中生代伸展构造与铀成矿作用[M]. 北京: 原子能出版社, 1997, 186-235.

- [13] 邓平,舒良树,谭正中,诸广-贵东大型铀矿聚集区富铀矿成矿地质条件[J]. *地质论评*, 1997, 49(5): 486-494.
- [14] 凌洪飞,沈渭洲,邓平,等. 粤北冒峰岩体的地球化学特征及其成因研究[A]. *岩体岩研究发展战略研讨会暨第三届花岗岩成因与地壳演化学术讨论会*[C], 2005, 54-56.
- [15] Freidman I, and O'neil J R. Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest[A]. In: Fleischer M, ed. *Data of geochemistry-Sixth Edition*[C]. Geology Survey Professional Paper, 1977, 117.
- [16] Laurent Turpin, Jacques L. Leroy and Simon M. F. Sheppard. Isotopic systematics (O, H, C, Sr, Nd) of superimposed barren and U-bearing hydrothermal systems in a Hercynian granite Massif Central, France[J]. *Chemical Geology*, 1990, 88: 85-98.
- [17] Min M Z, Luo X Z, Du G S, et al. Mineralogical and geochemical constraints on the genesis of the granite-hosted Huanggao uranium deposit, SE China[J]. *Ore Geology reviews*, 1999, 14: 105-127.
- [18] Ruzicka V. Vein uranium deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 1993, 8: 247-276.
- [19] 覃慕陶,刘师先. 南岭花岗岩型和火山岩型铀矿床[M]. 北京:地质出版社, 1998.
- [20] 闵茂中,孔令福,江仪. 3701 铀矿床成因的同位素地球化学研究[J]. *沉积学报*, 1989, 7(1), 81-89.
- [21] 倪师军. 302 铀矿床垂直分带模式[D]. 成都:成都地质学院放射性地质系, 1990.
- [22] 章邦桐,沈渭洲. 成矿物质与成矿液来源、成矿热源及成矿机制的探讨[A]. *华南产铀花岗岩及有关铀矿床研究*[C]. 北京:原子能出版社, 186-216.
- [23] 陈安福,赵洪波. 夏庄铀矿床矿物包裹体研究[J]. *地球化学*, 1986, 15(2): 174-182.
- [24] 王学成. 贵东岩体地球化学特征及 339 矿床成因研究[D]. 南京大学地质系, 1986.
- [25] Zhao Z F, Zheng Y F, Wei C S, et al. Carbon concentration and isotope composition of granites from Southeast China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth(A)*, 2001, 26(9-10): 821-833.
- [26] 戚华文,胡瑞忠. 华南花岗岩浆期后热液与铀成矿热液的初步对比[J]. *矿物学报*, 2000, 20(4): 401-405.
- [27] 刘正义. 铀的溶解实验研究[A]. 见:赵斌,王声远,吴厚泽等,编. *高温高压实验地球化学*[M]. 北京:科学出版社, 1995, 142-166.
- [28] Ohmoto H. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. *Economic Geology*, 1972, 67: 551-578.
- [29] Li X H. Cretaceous and lithospheric extension in Southeast China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18: 293-305.
- [30] 胡瑞忠,毕献武,苏文超,等. 华南白垩-第三纪地壳拉伸与铀成矿的关系[J]. *地学前缘*, 2004, 11(1): 153-160.
- [31] 杜乐天. *烃碱流体地球化学-重论热液作用与岩浆作用*[M]. 北京:科学出版社, 1996, 1-552.
- [32] O'Neil J R, Clayton R N, Mayeda T K. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates[J]. *Journal of Chemical Physics*, 1969, 51: 5 547-5 558.
- [33] Zheng Y F. Carbon-oxygen isotopic covariation in hydrothermal calcite during degassing of CO₂: A quantitative evaluation and application to the Kushikino gold mining area in Japan[J]. *Mineralium Deposita*, 1990, 25: 246-250.
- [34] Ohmoto H, Rye R O. Isotopes of sulfur and carbon[A]. In: Bernes H L, ed. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*[C]. 2nd Edition. New York: John Wiley and Sons. 1979, 509-567.

STUDY ON CARBON AND OXYGEN ISOTOPES IN GRANITE-TYPE HYDROTHERMAL URANIUM DEPOSITS: A CASE OF THE XIAZHUANG URANIUM ORE FIELD IN NORTHERN GUANGDONG

SHANG Peng-qiang^{1,2}, HU Rui-zhong¹, BI Xian-wu¹,
LIU Lei^{1,2}, ZHANG Guo-quan^{1,2}

1. Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry,
Chinese Academy of Science, Guiyang 550002, China;
2. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China

Abstract: The Xiazhuang uranium ore field is one of the most important ore fields with complex mineralization conditions. In this study, some carbonate samples in deposits are used to analyse carbon and oxygen isotopic composition. It is indicated that the mineralizer mainly comes from mantle degassing related to the regional deep faults, and part of carbon comes from organic matter in the crust. Strong fluid degassing occurred in uranium mineralization plays an important role in precipitation of pitchblende.

Key words: Xiazhuang uranium ore field; carbonate; carbon and oxygen isotopes; mineralizer

ISSN 1001-6872(2006)03-0071-06; CODEN: KUYAE2

Synopsis of the first author: Shang Pengqiang, male, 26 years old, a doctoral candidate of mineralogy, petrology and mineral deposit. Now he is engaged in the research of hydrothermal uranium.