

# 幔源挥发性组分参与 302 铀矿床成矿作用的 氦同位素证据

张国全<sup>1,2</sup>, 胡瑞忠<sup>1\*</sup>, 蒋国豪<sup>1</sup>, 刘 燊<sup>1</sup>, 朱维光<sup>1</sup>,  
田建吉<sup>1</sup>, 双 燕<sup>3</sup>, 范效仁<sup>2</sup>

(1. 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; 2. 浙江省有色金属地质勘查局, 浙江绍兴 312000; 3. 重庆地质矿产研究院, 重庆 400042)

**摘 要:** 对取自 302 铀矿床井下与沥青铀矿矿石共生的 9 件紫黑色萤石、肉红色方解石样品进行了流体包裹体的 He 同位素测定,  $^3\text{He}/^4\text{He}$  测定值为 0.03 ~ 0.57 Ra (绝大部分在 0.11 ~ 0.25 Ra 之间), 位于地幔与地壳的氦同位素值范围之间, 显示成矿流体中的氦同位素具有壳、幔两个端元混合的特点, 表明有大量幔源挥发性组分参与铀成矿作用。该矿床碳同位素值与流体包裹体证据均表明, 地幔挥发性组分确实大规模参与了铀成矿作用。研究显示, 几乎华南所有的热液铀矿床都形成于白垩纪—古近纪, 且这些矿床的碳同位素组成均显示成矿流体中的矿化剂  $\text{CO}_2$  来自地幔, 暗示它们成矿时具有相似的成矿动力学背景: 可能均与华南中—新生代岩石圈伸展作用所控制的幔源挥发性组分具有密切的关系。

**关键词:** 氦同位素; 成矿流体; 302 铀矿床; 热液铀矿床; 华南

中图分类号: P597; P619.14

文献标识码: A

文章编号: 0379-1726(2010)04-0386-10

## Mantle-derived volatile components involved in uranium mineralization: Evidence from He isotopes of the No. 302 uranium deposit

ZHANG Guo-quan<sup>1,2</sup>, HU Rui-zhong<sup>1\*</sup>, JIANG Guo-hao<sup>1</sup>, LIU Shen<sup>1</sup>, ZHU Wei-guang<sup>1</sup>,  
TIAN Jian-ji<sup>1</sup>, SHUANG Yan<sup>3</sup> and FAN Xiao-ren<sup>2</sup>

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. Zhejiang Geological Exploration Bureau for Non-Ferrous Metals, Shaoxing 312000, China;

3. Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, China

**Abstract:** Helium isotopic compositions from fluid inclusions of 9 pieces of atropurpureus fluorite and pale red calcite intergrowth with pitchblende ores, collected from the underground of the No. 302 uranium deposit, have been determined. The results show that  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios range from 0.03 Ra to 0.57 Ra, with most of ratios varying from 0.11 Ra to 0.25 Ra. These values are significantly lower than that of the Earth's mantle, and higher than that of the crust, indicating that He in the ore-forming fluids is a mixture of mantle- and crust-derived components, and that there were many mantle-derived volatile components involved in uranium mineralization. Recent studies revealed that most of hydrothermal uranium deposits in South China occurred during the Cretaceous to the Paleogene. Previous carbon isotope and fluid inclusion studies suggested that the  $\text{CO}_2$  as mineralization agent in the ore-forming fluid was derived from the mantle. Therefore, it suggests that most U deposits in South China formed under similar metallogenic geodynamic settings, and possibly has a genetic link with mantle-derived volatile matters, which were controlled by the Mesozoic to the Cenozoic lithosphere extension. Therefore, uranium mineralization and lithosphere extension were closely connected by mantle-derived volatile components.

**Key words:** helium isotope; ore-forming fluid; the No. 302 uranium deposit; hydrothermal uranium deposit; South China

收稿日期(Received): 2009-01-06; 改回日期(Revised): 2009-08-20; 接受日期(Accepted): 2009-10-09

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-125, KZCX2-102-3); 国家自然科学基金重点项目(40634020)

作者简介: 张国全(1978-), 男, 博士, 矿物、岩石、矿床学专业, 从事矿床研究、勘探工作。E-mail: zhgq003@163.com

\* 通讯作者(Corresponding author): HU Rui-zhong, E-mail: huruizhong@vip.gyig.ac.cn, Tel: +86-851-5891497

## 0 引言

自 Zartman *et al.*<sup>[1]</sup> 最早利用稀有气体同位素示踪地壳现代流体的来源及其水-岩相互作用以来, 该方法在对火山喷气活动、油气来源、油气运移方向和成矿古流体等方面的研究中取得了长足进展。由于氦在大气降水、地幔和地壳中具有极不相同的同位素组成, 地壳氦 ( $^3\text{He}/^4\text{He} = 0.01 \sim 0.05 \text{ R/Ra}$ ) 和地幔氦 ( $^3\text{He}/^4\text{He} = 6 \sim 9 \text{ R/Ra}$ ) 的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值存在近 1000 倍的差异 (其中 R 为样品的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值, Ra 为大气的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值)<sup>[2]</sup>, 即使地壳流体中有少量幔源氦的加入也可以很容易地判别出来。因此, 氦同位素地球化学成为研究地质流体来源的一种有效的方法, 为研究地质流体来源与多源流体混合效应及成矿作用等提供了非常有效的示踪剂, 特别是在识别地幔流体参与各种金属矿床成矿作用方面得到了广泛的应用<sup>[3]</sup>。例如: 对秘鲁 Casapalca Ag-Pb-Zn-Cu 和 Pasto Bueno W- 贱金属矿床<sup>[4]</sup>、韩国 Dae Hwa W-Mo 矿床及苏格兰与 I 型花岗岩有关的金矿和铅锌矿<sup>[2]</sup>、墨西哥新生代浅成低温热液矿床<sup>[5]</sup>; 中国与碱性侵入岩有关的铜、金矿床<sup>[6-10]</sup>、胶东金矿区<sup>[11]</sup>、东坪金矿床和郯庐断裂带旁侧的万古金矿<sup>[12-13]</sup>以及湘南锡矿床<sup>[14]</sup>等矿床的研究, 都显示成矿流体具有地幔流体的性质。但并非所有的矿床都如此, 如英国 Pennines 山脉北部与 S 型花岗岩有关的铅锌矿就没有幔源气体参与的迹象<sup>[15]</sup>, 我国阿尔泰元古宇变质岩地层中的含铜石英脉型矿化和金顶 Pb-Zn 矿床也没有幔源流体显示<sup>[16-17]</sup>; 新疆萨瓦亚尔顿、布隆及四川大渡河三个金矿虽有地幔流体参与成矿, 但份额太小, 成矿流体仍以地壳流体为主<sup>[18-20]</sup>。

华南是我国著名的热液铀矿产区, 从东南沿海到内陆, 各类型铀矿床呈现出明显的分带特征: 东成矿区主要以火山岩型为主; 中成矿区以花岗岩型为主; 西成矿区以碳硅泥岩型铀矿床为主。多年来众多学者不同角度的研究均认为这些不同种类的铀矿床统一受某种因素的制约<sup>[21-27]</sup>, 如构造-岩浆-热事件、矿化剂-岩石圈伸展等因素。目前对华南热液铀矿床的稀有气体同位素研究开展得相对较少, 且主要集中在相山火山岩型铀矿田和下庄花岗岩型铀矿田<sup>[28-30]</sup>。本文拟叙述 302 铀矿床的氦同位素组成特征, 并试图揭示成矿流体中挥发性组分 (矿化剂等) 的来源, 为探讨该矿床的成矿机理以及华南中-

新生代岩石圈伸展与热液铀矿床的耦合机制、铀成矿作用发生的必然性提供依据。

## 1 地质概况

我国南岭地区是世界闻名的滨太平洋金属成矿带的重要组成部分, 发现了大批大型、超大型 W、Sn、Bi、Cu、Pb、Zn、Fe、U、REE 等稀有、有色金属矿产以及放射性元素矿床, 是我国稀有、有色金属和放射性元素矿产最集中的产区<sup>[31]</sup>。302 铀矿床位于南岭中东段诸广岩体南部, 长江铀矿田东部矿区内 (图 1), 是该区内现已探明的最大热液铀矿床, 也是南岭地区多金属成矿带内最为重要的矿床之一。此矿床与区内下庄、百顺、澜河、白面石、河草坑、鹿井和桃山等铀矿田 (床) 构成了南岭地区独具特色的铀成矿带。该矿床处于南岭东西向构造-岩浆作用带的中东段, 湘赣粤后加里东隆起与湘桂粤北海西-印支拗陷带的交接处, 是吴川-四会区域深断裂向北延伸通过的部位。

## 2 矿床地质特征

302 铀矿床所在区内岩浆活动频繁, 具有多期次、多阶段侵入的特点。如图 2 所示, 矿床位于长江铀矿田东部 NE 向棉花坑断裂和 NW 向油洞断裂夹持部位, 围岩主要为黑云母花岗岩和中粒斑状二云母花岗岩等。现代高精度测试结果证实, 其赋矿围岩与下庄铀矿田相似, 均存在大面积印支期花岗岩<sup>[33-35]</sup>。研究显示, 燕山期岩浆作用并没有明显的铀成矿专属性; 而印支期花岗岩却具有清晰的铀成矿专属性, 它可以作为铀的主要来源<sup>[33, 36-38]</sup>。

该矿床所在区内断裂破碎带广泛分布, 具有多次活动的特点, 主要有 NE 向、NW 向、NNW 向及近 EW 向四组。铀矿化主要赋存于花岗岩体内部 NNW 向的硅化断裂破碎带内, 主要有 9 号、8 号、7 号、8-1 号等破碎蚀变带, 尤以 9 号带规模最大, 控制的矿体也最多。一般在构造带膨胀、扭曲或分枝复合, 岩石破碎, 蚀变发育的部位, 矿化情况较好。矿体的分布、规模、形态和产状严格受构造蚀变破碎带控制, 产出最高标高为海拔 455 m, 最低海拔为 -647 m (尚未尖灭), 具有纵向延伸大的特点。浅部矿体不连续, 形态、产状变化大, 呈脉状、透镜状、豆荚状产出, 尖灭再现; 中深部矿体厚度大, 较连续, 形态稳定, 呈脉状或扁豆状产出。主要有角砾状和硅化碎裂花岗

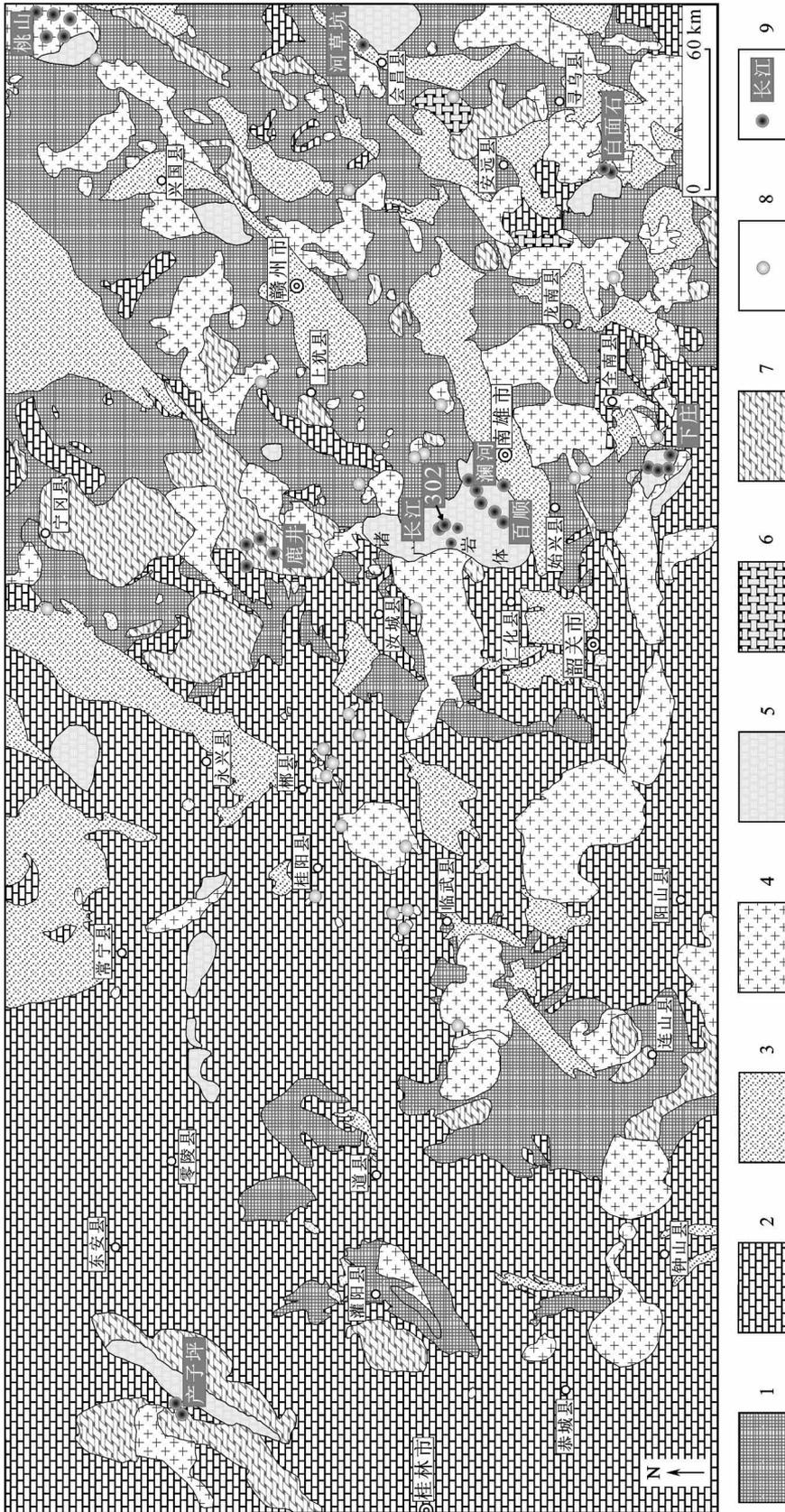


图1 南岭地区地质和主要铀、钨-锡矿床分布图(据毛景文等<sup>[32]</sup>及孙涛<sup>[33]</sup>补充修改)

Fig. 1 Geology and distribution of the major uranium and tungsten-tin ore deposits in the Nanling area (modified after Mao *et al.* <sup>[32]</sup> and Sun <sup>[33]</sup>)

1. 前奥陶纪碎屑岩; 2. 志留纪-三叠纪碳酸盐岩; 3. 侏罗纪-白垩纪碎屑岩、火山岩和红层; 4. 燕山期花岗岩; 5. 印支期花岗岩; 6. 海西期花岗岩; 7. 加里东期花岗岩; 8. 铌-钽矿床; 9. 铀矿床。

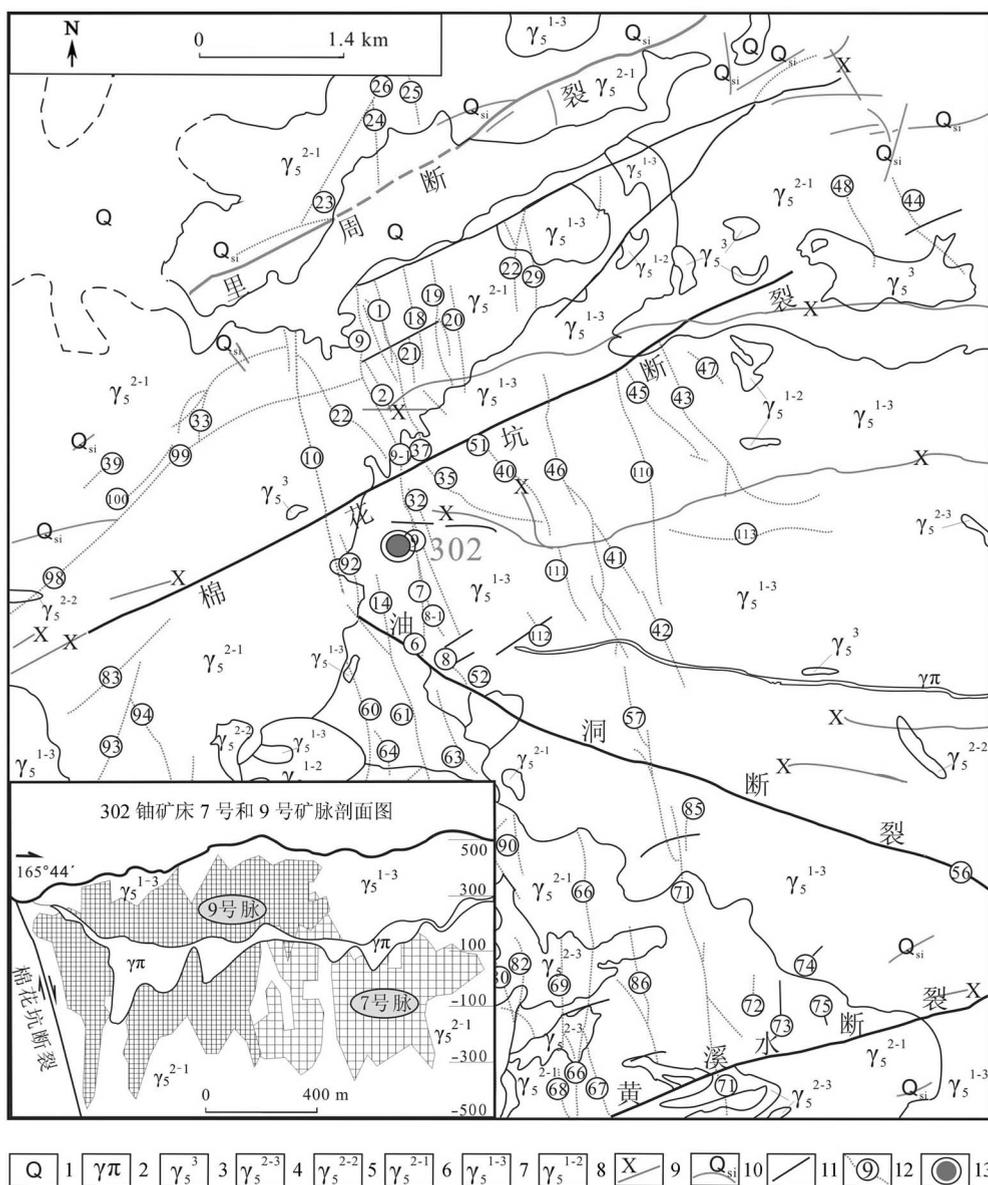


图 2 长江铀矿田东部地质图及 302 铀矿床 7 号和 9 号矿脉剖面图  
(据广东省地质矿产局 705 地质大队及 302 铀矿床内部资料修改)

Fig. 2 Geological sketch map of the eastern part of the Changjiang uranium ore field and the perpendicular projection map of the major orebodies of veins No. 7 and No. 9

1. 第四系; 2. 花岗斑岩脉; 3. 细粒二云母花岗岩或含石榴子石二云母花岗岩; 4. 细粒或中粒二云母花岗岩; 5. 中粒黑云母花岗岩或黑云母花岗岩; 6. 中粒黑云母花岗岩; 7. 中粒斑状二云母花岗岩; 8. 中粒斑状二长花岗岩; 9. 中基性岩脉; 10. 硅化脉; 11. 断裂带; 12. 含矿脉(破碎带)及编号; 13. 铀矿床。

岩型两种矿石。矿石结构有变余碎裂结构、变余碎裂花岗结构、变余角砾状结构及变余碎斑结构。矿石构造有浸染状构造、条带状构造、角砾状构造和不规则状构造等。常见的矿物共生组合主要有沥青铀矿-赤铁矿-红色微晶石英-方解石、沥青铀矿-紫黑色萤石和沥青铀矿-胶黄铁矿-灰黑色微晶石英三种,其中前者占绝大多数,为主要开采对象,后者(沥青铀矿-胶黄铁矿-灰黑色微晶石英)仅为局部分布的富沥青铀矿脉。主要矿石矿物(沥青铀矿)多

呈浸染状、微细脉和短细脉状,常与石英、赤铁矿、黄铁矿和萤石等共生;其次,钙铀云母、铜铀云母、硅铀矿和磷铀矿等少量次生铀矿物常呈浸染状、团块状分布于蚀变强烈的地带。脉石矿物大都呈脉状分布在构造蚀变带内,主要有石英、萤石和方解石等。

矿床热液蚀变普遍发育,受断裂构造带控制,分布在构造破碎带内及两侧围岩次级裂隙发育地段。热液蚀变在空间上具有明显的水平分带现象,由构造蚀变带中心向两侧依次发育硅化→赤铁矿化→绢

(水)云母化→绿泥石化→高岭土化,蚀变的强度亦由中心向两侧减弱;在垂直方向上存在萤石在上、方解石在下的分带特征。与铀矿化关系密切的蚀变主要有硅化、赤铁矿化、黄铁矿化、绢(水)云母化、绿泥石化、碳酸盐化、萤石化和钾钠长石化碱交代等。

### 3 样品分析方法及结果

黄铁矿被认为是用于稀有气体研究最理想的样品,但在本矿床中与铀矿石共生的黄铁矿大都呈胶状结构,放射性 $^4\text{He}$ 异常高(可能与其晶型不好,大量 $^4\text{He}$ 进入黄铁矿裂隙中有关,所测试的结果掩盖了其真实值),难以挑出理想的样品用于稀有气体同位素分析。因此本文将重点选择与铀矿石共生、晶型完好且未见后期改造痕迹的成矿期萤石和方解石用压碎法测试流体包裹体中的氦同位素组成。研究的所有样品均采自该矿床井下250~0 m标高的各个采场或坑道。

氦、氩同位素组成在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稀有气体同位素分析室分析。采用真空压碎法提取稀有气体,然后用分辨率大于800、能将 $^3\text{He}^+$ 和 $\text{HD}^+$ 完全分离的全金属稀有气体质谱计测定其同位素组成。具体步骤如下:(1)称取约50~500 mg已在超声波丙酮溶液中洗净并烘干过的样品(粒径0.5~1.5 mm)装入螺旋式压碎装置;(2)将装入压碎装置并已连接到气体提取处理系统中的样品烘烤( $< 150\text{ }^\circ\text{C}$ )约12 h以除

去被样品表面吸附的大气,与此同时把气体提取和处理系统抽取至所需要的高真空;(3)在高真空( $10^{-6}\sim 10^{-7}\text{ Pa}$ )条件下压碎样品,使矿物流体包裹体中的气体释放至气体提取和处理系统中,继而纯化所提取的气体;(4)将纯化后的氦送入质谱计做同位素分析。氦同位素浓度误差优于10%。

302 铀矿床萤石和方解石中流体包裹体的氦同位素组成见表1。由表1可见,该矿床方解石、萤石流体包裹体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值变化较小,为0.03~0.57 Ra (Ra代表大气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值,为 $1.40\times 10^{-6}$ ),绝大部分在0.11~0.25 Ra之间,高于地壳氦同位素组成,但低于幔源氦同位素值。

## 4 讨论

### 4.1 所选样品的可行性

胡瑞忠等<sup>[7]</sup>的研究表明:石英流体包裹体中的氦虽然因大量扩散而丢失,但其同位素分馏效应非常小,其同位素组成没有明显的变化,当流体包裹体初始氦的扩散丢失高达99%时,残留氦的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值仅比初始值降低约5% (在测试误差范围内)。萤石和方解石的情况可能与石英相类似, Simmons *et al.*<sup>[41]</sup>、Stuart *et al.*<sup>[15]</sup>、Yamamoto *et al.*<sup>[39]</sup>、赵葵东等<sup>[40]</sup>以及田世洪等<sup>[41]</sup>都分别成功利用萤石和方解石探讨成矿流体的稀有气体同位素组成。因此,利用萤石和方解石探讨成矿流体中的稀有气体来源

表1 302 铀矿床萤石、方解石中流体包裹体的氦同位素组成

Table 1 He isotopic composition of fluid inclusions in fluorites and calcites from the No. 302 uranium deposit

样品	样号	压碎次数	压碎量(g)	$^4\text{He}\times 10^{-7}\text{ (cm}^3\text{)}$	$^3\text{He}\times 10^{-14}\text{ (cm}^3\text{)}$	$^3\text{He}/^4\text{He}\times 10^{-7}$	$^3\text{He}/^4\text{He(Ra)}$
萤石	2-43		0.35	0.23	1.60	$7.02\pm 0.49$	$0.57\pm 0.04$
萤石	3-28		0.39	1.52	5.06	$3.32\pm 0.07$	$0.25\pm 0.01$
萤石	3-02	1		17.08	31.31	$1.83\pm 0.01$	$0.14\pm 0.01$
萤石	3-02	2		6.52	12.57	$1.93\pm 0.03$	$0.15\pm 0.01$
萤石	3-02	总量	0.50	23.60	43.89	$1.86\pm 0.01$	$0.14\pm 0.01$
萤石	3-51	1		24.61	19.10	$0.78\pm 0.01$	$0.06\pm 0.01$
萤石	3-51	2		1.19	2.25	$1.89\pm 0.19$	$0.11\pm 0.01$
萤石	3-51	总量	0.39	25.80	21.36	$0.83\pm 0.01$	$0.07\pm 0.01$
萤石	3-48		0.40	12.65	5.50	$0.43\pm 0.01$	$0.03\pm 0.01$
萤石	3-49		0.43	15.08	23.92	$1.59\pm 0.02$	$0.12\pm 0.01$
萤石	3-50		0.37	88.15	48.33	$0.55\pm 0.03$	$0.04\pm 0.01$
方解石	2-15		0.36	1.96	5.55	$2.83\pm 0.14$	$0.18\pm 0.01$
方解石	3-26'		0.62	6.98	11.78	$1.69\pm 0.04$	$0.14\pm 0.01$

注:“压碎量”指样品被压碎至小于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的部分;未扣除放射成因的 $^4\text{He}$ ;“ $^3\text{He}/^4\text{He(Ra)}$ ”表示样品 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值与大气 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值之比( $1\text{ Ra}=1.40\times 10^{-6}$ )。

也是一种可行的途径。虽然采用压碎法测试的结果是不同期次流体包裹体氦同位素的平均组成, 但与本矿床铀矿石共生的紫黑色萤石、肉红色方解石主要以孤立椭圆状原生包裹体为主, 考虑到所研究的矿床为铀矿床, 流体包裹体中含有丰富的 U、Th 放射性元素, 必须由 U、Th 的含量扣除放射成因  $^4\text{He}$  含量后才能得到比较接近真实成矿流体的氦同位素组成, 由于未测得样品中流体包裹体的 U、Th 的含量, 故本次测试结果仅能代表矿床形成时成矿流体的氦同位素组成趋势, 只能粗略地示踪成矿流体中的氦同位素来源。但可以肯定, 如果扣除放射成因  $^4\text{He}$  的影响, 初始成矿流体中的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值绝对比我们直接测试的结果要大得多。

#### 4.2 流体包裹体氦同位素组成的影响因素

热液流体中的稀有气体可能有以下来源: 空气、大气饱和水 (ASW)、地幔和地壳<sup>[10, 42]</sup>。空气中的氦含量较低, 不足以对热液流体产生明显的影响<sup>[43-44]</sup>。大气饱和水包括大气降水和海水, 其典型的氦同位素组成为:  $^3\text{He}/^4\text{He} = 1 \text{ Ra}$ , 由于研究区为岩浆岩地区, 因此海水来源被排除。在地壳岩石中由于 U、Th 衰变产生的放射成因  $^4\text{He}$  被扩散进入大气降水形成的地下水、热液流体及油气井, 其  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值为  $0.01 \sim 0.1 \text{ Ra}$ <sup>[45-48]</sup>。由于本矿床  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值 ( $0.03 \sim 0.57 \text{ Ra}$ ) 超出了大气降水来源的地质流体氦同位素组成范围, 故成矿流体中的氦不可能是地质流体单一来源的。地幔是地球  $^3\text{He}$  的主要储库,  $^3\text{He}/^4\text{He}$  的特征值为  $6 \sim 9 \text{ Ra}$ 。地壳产生的  $^3\text{He}$  主要由反应式  $6\text{Li}(n, \alpha) \rightarrow 3\text{H}(\beta) ^3\text{He}$ <sup>[49]</sup> 决定, 但研究区却没有发现含 Li 的矿物。地壳岩石中宇宙成因的  $^3\text{He}$  主要产生在地表 1.5 m 范围内, 并且在不到 100 年的时间内宇宙成因的同位素值可忽略不计<sup>[50]</sup>。由于本次测试的样品均采自地下深处且其形成时间远远超过 100 年, 因此宇宙成因的  $^3\text{He}$  也被排除在外。上述讨论暗示本矿床成矿流体中的氦可能来自地幔和地壳。

#### 4.3 流体包裹体中氦气体的来源

如表 1 所示, 302 铀矿床绝大多数成矿流体样品的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值介于地幔值与地壳值之间, 高于地壳值, 但低

于地幔值, 表明铀成矿时成矿流体中的氦同位素由这两者混合而成。已有研究表明, 成矿流体发生沸腾,  $^3\text{He}$  优先进入气相而散失, 导致残余流体中的  $^3\text{He}$  含量相对降低; 地壳氦对地幔氦的“稀释”也可以导致  $^3\text{He}$  含量降低<sup>[2, 4]</sup>。本矿床流体包裹体研究显示成矿前期流体存在明显的沸腾现象<sup>[51]</sup> (另文发表), 铀成矿正是在大气降水成因的地下水去矿化剂  $\text{CO}_2$  后进行的, 因此流体沸腾、地壳氦对地幔氦的“稀释”都有可能使铀成矿时流体的氦同位素比值降低。此外, 本次研究的矿床流体包裹体中含有丰富的 U、Th 放射性元素, 由这些放射性元素产生的  $^4\text{He}$  也是影响成矿流体中  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值降低的一个重要原因。因此, 扣除这些影响因素后成矿流体中的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值应该会比本次实验的测试值大不少, 尤其是成矿前期流体的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值可能会更接近地幔端元的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值。从氦同位素组成演化图 (图 3) 上可见, 矿床内几个代表成矿期流体的萤石和方解石脉的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比值绝大多数投在  $10^{-6} \sim 10^{-7}$  之间, 位于地壳与地幔组成的过渡带内, 具有一个大致从地幔向地壳演化的趋势, 这也说明 302 铀矿床成矿时流体的氦同位素具有地壳、地幔两种端元的特征。

#### 4.4 地质意义

众所周知, 矿化剂  $\Sigma \text{CO}_2$  在热液铀矿床的形成

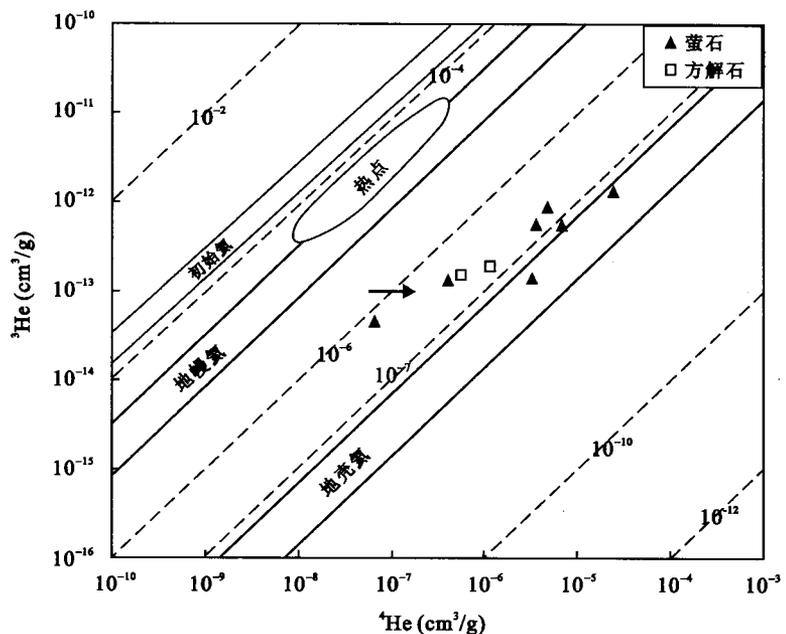


图 3 302 铀矿床 He 同位素组成演化图 (底图据 Mamyrin *et al.*<sup>[52]</sup>)  
Fig. 3 Helium isotopic composition and evolution in the No. 302 uranium deposit  
(base diagram after Mamyrin *et al.*<sup>[52]</sup>)

过程中对铀的迁移、沉淀都起到了非常重要的作用。研究表明,302 铀矿床成矿流体中的水主要由贫 CO<sub>2</sub> 的大气降水构成; 流体包裹体显示该矿床中与沥青铀矿共生的脉石矿物含有丰富的富 CO<sub>2</sub> 包裹体,从成矿前期到成矿期,富 CO<sub>2</sub> 包裹体数量逐渐降低,至成矿期后则不含富 CO<sub>2</sub> 包裹体,这些结果暗示在铀成矿过程中成矿热液存在一个加气-去气的过程(另文发表)。对该矿床 20 件成矿期方解石的碳同位素研究发现,其  $\delta^{13}\text{C}$  值基本位于  $-3\text{‰}$  ~  $-9\text{‰}$  之间,与幔源碳同位素值相吻合,暗示成矿流体中的矿化剂  $\Sigma\text{CO}_2$  源自受控于岩石圈伸展导致的地幔去气<sup>[53]</sup>。因此,结合前面的氦同位素结果推断,地幔挥发性组分(稀有气体、CO<sub>2</sub> 等)曾大规模地参与该矿床的成矿过程。

胡瑞忠等<sup>[26]</sup>统计了华南热液铀矿床成矿年龄的大量数据,结果表明该区铀矿床几乎全集中在白垩-古近纪,不同类型的铀矿床大致有几个相同的主成矿期,且这些不同种类铀矿床的成矿时代不受赋矿围岩的岩性、时代以及所处的大地构造单元等局部因素控制。铀成矿是在区域上断陷盆地的出现和基性脉岩侵入之后形成的,绝大多数铀成矿区与 K-E 断陷盆地或断陷带相伴生,铀矿化年龄与赋矿主岩存在较大的年龄差。前人研究表明晚中生代华南板块处于板内伸展-裂谷的构造环境<sup>[54-56]</sup>。岩石圈伸展作用分别控制了华南地区断陷盆地、基性脉岩以及 A 型花岗岩的产出。对代表岩石圈伸展作用的基性脉岩、A 型花岗岩的年龄测定发现,该地区主要存在 6 次重要的多阶段(145 ~ 135 Ma、125 ~ 115 Ma、110 ~ 100 Ma、95 ~ 85 Ma、75 ~ 70 Ma、55 ~ 45 Ma)岩石圈伸展的地球动力学事件<sup>[27, 55, 57-59]</sup>,而且各个阶段岩石圈伸展的时限分别与铀矿床的成矿时代具有良好的对应关系<sup>[59]</sup>。具体到 302 铀矿床,其角砾状矿石和硅化碎裂花岗岩型矿石的成矿年龄分别为 127 Ma 和 54 Ma 左右(笔者未发表数据),与该区地壳拉张期形成的第 2 和第 6 两期幔源基性脉岩的时代基本对应。多年来对该地区各种类型铀矿床的 C、H、O、稀有气体同位素组成以及成矿物质来源等的研究清晰地表明,幔源挥发性组分(矿化剂等)参与到贫矿化剂的大气成因地下水中,萃取围岩中的成矿物质(铀等),从而形成铀矿床<sup>[25, 26, 28, 29, 36, 59-62]</sup>。由此可见,华南热液铀成矿区并非偶然形成的,它们统一受岩石圈伸展事件控制的幔源挥发性组分所控制。

## 5 结 论

(1) 302 铀矿床中与沥青铀矿共生的萤石、方解石流体包裹体中 <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比值为 0.03 ~ 0.57 Ra, 该值基本能反映流体包裹体被捕获时成矿流体初始氦同位素组成的演化趋势。

(2) 该矿床成矿流体的氦同位素组成显示的壳幔混合的特征、富含富 CO<sub>2</sub> 包裹体以及幔源碳同位素组成,反映了在铀成矿过程中有大量幔源挥发性组分(稀有气体、CO<sub>2</sub> 等)参与成矿作用。

(3) 华南热液铀成矿作用与岩石圈伸展事件的同期性以及这些矿床相似的碳、氦同位素组成反映了它们具有相似的成矿动力学背景,成矿作用均统一受幔源挥发性组分所控制。

野外工作得到了核工业 290 研究所及 302 矿部有关人员的热心帮助; 中国科学院地球化学研究所钟宏研究员、彭建堂研究员和中国地质科学院矿产资源研究所袁顺达博士均曾给予了不同形式的指导和帮助; 匿名审稿专家提供的修改意见使笔者受益匪浅,在此一并致以诚挚的谢意!

## 参考文献(References):

- [1] Zartman R E, Wasserburg G J, Reynolds J H. Helium, argon, and carbon in some natural gases [J]. *J Geophys Res*, 1961, 66(1): 277-306.
- [2] Stuart F M, Burnard P G, Taylor R P, Turner G. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluids: He-Ar isotopes in fluid inclusions from Dae Hwa W-Mo mineralisation, South Korea [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59(22): 4663-4673.
- [3] Ozima M, Podosek F A. *Noble Gas Geochemistry* (2nd ed) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002: 1-216.
- [4] Simmons S F, Sawkins F J, Schlutter D J. Mantle-derived helium in two Peruvian hydrothermal ore deposits [J]. *Nature*, 1987, 329(6138): 429-432.
- [5] Simmons S F, Gemmill J B, Sawkins F J. The Santo Nino silver-lead-zinc vein, Fresnillo district, Zacatecas, Mexico: part II. Physical and chemical nature of ore-forming solutions [J]. *Econ Geol*, 1988, 83(8): 1619-1641.
- [6] 胡瑞忠, 毕献武, 邵树勋, Turner G, Burnard P G. 云南马厂箐铜矿床氦同位素组成研究 [J]. *科学通报*, 1997, 42(14): 1542-1545.  
Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Shao Shuxun, Turner G, Burnard P G. Helium isotopic compositions in the Machangqing copper deposit, Yunnan Province [J]. *Chinese Sci Bull*, 1997, 42(14): 1542-1545 (in Chinese).

- [7] 胡瑞忠, 毕献武, Turner G, Burnard P G. 哀牢山金矿成矿流体 He 和 Ar 同位素地球化学[J]. 中国科学(D 辑), 1999, 29(4): 321 - 330.  
Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Turner G, Burnard P G. Helium and argon isotope geochemistry of the ore-forming fluid for gold deposits in Ailaoshan metallogenic belt [J]. Sci China (D), 1999, 29(4): 321 - 330 (in Chinese).
- [8] Hu Ruizhong, Burnard P G, Turner G, Bi Xianwu. Helium and argon isotope systematics in fluid inclusions of Machangqing copper deposit in west Yunnan province, China [J]. Chem Geol, 1998, 146(1/2): 55 - 63.
- [9] Hu Ruizhong, Burnard P G, Bi Xianwu, Zhou Meifu, Pen Jiantang, Su Wenchao, Wu Kaixing. Helium and argon isotope geochemistry of alkaline intrusion-associated gold and copper deposits along the Red River-Jinshajiang fault belt, SW China [J]. Chem Geol, 2004, 203(3/4): 305 - 317.
- [10] Burnard P G, Hu R Z, Turner G, Bi X W. Mantle, crustal and atmospheric noble gases in Ailaoshan Gold deposits, Yunnan Province, China [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1999, 63(10): 1595 - 1604.
- [11] 张连昌, 沈远超, 李厚民, 曾庆栋, 李光明, 刘铁兵. 胶东地区金矿床流体包裹体的 He、Ar 同位素组成及成矿流体来源示踪[J]. 岩石学报, 2002, 18(4): 559 - 565.  
Zhang Lian-chang, Shen Yuan-chao, Li Hou-min, Zeng Qing-dong, Li Guang-ming, Liu Tie-bing. Helium and argon isotopic compositions of fluid inclusions and tracing to the source of ore-forming fluids for Jiaodong gold deposits [J]. Acta Petrol Sinica, 2002, 18(4): 559 - 565 (in Chinese with English abstract).
- [12] Mao J W, Kerrich R, Li H Y, Li Y H. High  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios in the Wangu gold deposit, Hunan Province, China: Implications for mantle fluids along the Tanlu deep fault zone [J]. Geochem J, 2002, 36(3): 197 - 208.
- [13] Mao Jingwen, Li Yinqing, Goldfarb R, He Ying and Zaw K. Fluid inclusion and noble gas studies of the Dongping gold deposit, Hebei Province, China: A mantle connection for mineralization? [J]. Econ Geol, 2003, 98(3): 517 - 534.
- [14] Li Zhao-li, Hu Rui-zhong, Yang Jing-sui, Peng Jian-tang, Li Xiao-min, Bi Xian-wu. He, Pb and S isotopic constraints on the relationship between the A-type Qitianling granite and the Furong tin deposit, Hunan Province, China [J]. Lithos, 2007, 97(1/2): 161 - 173.
- [15] Stuart F M, Turner G. The abundance and isotopic composition of the noble gases in ancient fluids [J]. Chem Geol, 1992, 101(1/2): 97 - 109.
- [16] 王登红, 陈毓川, 李红阳, 徐志刚, 李天德. 阿尔泰山带地幔脱气的氦同位素研究[J]. 科学通报, 1998, 43(23): 2541 - 2543.  
Wang Denghong, Chen Yuchuan, Li Hongyang, Xu Zhigang, Li Tiande. Helium isotopic study on mantle degassing in the Altay orogenic zone [J]. Chinese Sci Bull, 1998, 43(23): 2541 - 2543 (in Chinese).
- [17] Hu Ruizhong, Turner G, Burnard P G, Zhong Hong, Ye Zaojun, Bi Xianwu. Helium and argon isotopic geochemistry of Jinding superlarge Pb-Zn deposit [J]. Sci China (D), 1998, 41(4): 442 - 448.
- [18] 杨富全, 王义天, 毛景文, 杜红星. 新疆阿合奇县布隆石英重晶石脉型金矿地质特征和硫、氮、氩同位素研究[J]. 地质论评, 2004, 50(1): 87 - 98.  
Yang Fu-quan, Wang Yi-tian, Mao Jing-wen, Du Hong-xing. Geological features and S, He and Ar isotopic studies of the Bulong quartz-barite vein-type gold deposit in Akqi county, Xinjiang [J]. Geol Rev, 2004, 50(1): 87 - 98 (in Chinese with English abstract).
- [19] 杨富全, 毛景文, 王义天, 赵财胜, 叶会寿, 陈文. 新疆萨瓦亚尔顿金矿床年代学、氦氮碳氧同位素特征及其地质意义[J]. 地质论评, 2006, 52(3): 341 - 351.  
Yang Fu-quan, Mao Jing-wen, Wang Yi-tian, Zhao Cai-sheng, Ye Hui-shou, Chen Wen. Chronology and geochemical characteristics of helium, argon, carbon and oxygen isotope in fluid inclusion of the Sawayaerdun gold deposit, Xinjiang, Northwestern China and their significance [J]. Geol Rev, 2006, 52(3): 341 - 351 (in Chinese with English abstract).
- [20] 李晓峰, 毛景文, 王登红, 罗辅助. 四川大渡河金矿田成矿流体来源的氦氩硫氢氧同位素示踪[J]. 地质学报, 2004, 78(2): 203 - 210.  
Li Xiao-feng, Mao Jing-wen, Wang Deng-hong, Luo Fu-xun. Helium and argon isotope systematics in fluid inclusion of the gold deposits along the Daduhe River, Sichuan Province, southwestern China [J]. Acta Geol Sinica, 2004, 78(2): 203 - 210 (in Chinese with English abstract).
- [21] 童航寿. 华南铀矿省铀矿构造造成矿作用及其时空演化[J]. 铀矿地质, 1990, 6(5): 265 - 273.  
Tong Hang-shou. Tectonic metallogenesis of uranium and its time-space evolution in uranium metallogenic province of South China [J]. Uran Geol, 1990, 6(5): 265 - 273 (in Chinese with English abstract).
- [22] 余达淦. 伸展构造与铀成矿作用[J]. 铀矿地质, 1994, 10(3): 129 - 137, 160.  
Yu Da-gan. Extensional tectonics and uranium metallogenesis [J]. Uran Geol, 1994, 10(3): 129 - 137, 160 (in Chinese with English abstract).
- [23] 杜乐天, 王玉明. 华南花岗岩型、火山岩型、碳硅泥岩型、砂岩型铀成矿机理的统一性[J]. 放射性地质, 1984, 6(3): 1 - 10.  
Du Le-tian, Wang Yu-ming. Uniform metallogenetic mechanism among the granite-, volcanic-, carbonaceous-siliceous-pelitic rocks and sandstone-hosted uranium deposits in South China [J]. Radioact Geol, 1984, 6(3): 1 - 10 (in Chinese).
- [24] 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: 1 - 307.  
Du Le-tian. The Basic Metallogenetic Criteria of Hydrothermal Uranium Deposits in China and the General Hydrothermal Metallogeny [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2001: 1 - 307 (in Chinese).
- [25] 胡瑞忠, 李朝阳, 倪师军, 刘莉, 于津生. 华南花岗岩型铀矿床成矿热液中  $\Sigma\text{CO}_2$  来源研究 [J]. 中国科学 (B 辑), 1993,

- 23(2): 189-196.
- Hu Ruizhong, Li Chaoyang, Ni Shijun, Liu Li, Yu Jinsheng. Research on  $\Sigma\text{CO}_2$  source in ore-forming hydrothermal solution of granite-type uranium deposit, South China [J]. *Sci China (B)*, 1993, 36(10): 1252-1262.
- [26] 胡瑞忠, 毕献武, 苏文超, 彭建堂, 李朝阳. 华南白垩-第三纪地壳拉张与铀成矿的关系[J]. *地质前缘*, 2004, 11(1): 153-160.
- Hu Rui-zhong, Bi Xian-wu, Su Wen-chao, Peng Jian-tang, Li Chao-yang. The relationship between uranium metallogenesis and crustal extension during the Cretaceous-Tertiary in South China [J]. *Earth Sci Front*, 2004, 11(1): 153-160 (in Chinese with English abstract).
- [27] 陈跃辉, 陈肇博, 陈祖伊, 蔡煜琦. 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, 1998: 1-252.
- Chen Yue-hui, Chen Zhao-bo, Chen Zu-yi, Cai Yu-qi. Mesozoic Extensional Tectonics and Uranium Metallogenesis in Southeast China [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1998: 1-252 (in Chinese).
- [28] Hu Rui-zhong, Burnard P G, Bi Xian-wu, Zhou Mei-fu, Peng Jian-tang, Su Wen-chao, Zhao Jun-hong. Mantle-derived gaseous components in ore-forming fluids of the Xiangshan uranium deposit, Jiangxi Province, China: Evidence from He, Ar and C isotopes [J]. *Chem Geol*, 2009, 266(1/2): 86-95. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.07.017
- [29] Hu Rui-zhong, Bi Xian-wu, Zhou Mei-fu, Peng Jian-tang, Su Wen-chao, Liu Shen, Qi Hua-wen. Uranium metallogenesis in South China and its relationship to crustal extension during the Cretaceous to Tertiary [J]. *Econ Geol*, 2008, 103(3): 583-598. doi: 10.2113/gsecongeo.103.3.583
- [30] Zhang Zhanshi, Liu Shuai, Hua Renmin, Deng Ping. He and Ar isotopic composition in pyrite and its significance in No.338 deposit, Xiazhuang uranium ore-field, South China [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2006, 70(18): A738. doi: 10.1016/j.gca.2006.06.1328
- [31] 地矿部南岭项目花岗岩专题组. 南岭花岗岩地质及其成因和成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 18-40.
- The Granitoid Research Group of the Nanling Project, MGMR. Geology of Granitoids of Nanling Region and Their Petrogenesis and Mineralization [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989: 18-40 (in Chinese).
- [32] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 陈毓川. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景[J]. *岩石学报*, 2007, 23(10): 2329-2338.
- Mao Jing-wen, Xie Gui-qing, Guo Chun-li, Chen Yu-chuan. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nanling region, South China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2007, 23(10): 2329-2338 (in Chinese with English abstract).
- [33] 孙涛. 新编华南花岗岩分布图及其说明[J]. *地质通报*, 2006, 25(3): 332-335.
- Sun Tao. A new map showing the distribution of granites in South China and its explanatory notes [J]. *Geol Bull China*, 2006, 25(3): 332-335 (in Chinese with English abstract).
- [34] 陈培荣, 张敏, 陈卫锋. 九峰-诸广山岩体[M]//周新民. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化. 北京: 科学出版社, 2007: 533-549.
- Chen Pei-rong, Zhang Min, Chen Wei-feng. Jiufeng-Zhuguangshan massif [M]//Zhou Xin-min. Petrogenesis of Late Mesozoic Granite and Dynamic Evolution of Lithosphere in Nanling Region. Beijing: Science Press, 2007: 533-549 (in Chinese).
- [35] 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 姚军明, 林锦富, 张展适, 顾晟彦. 南岭与中生代花岗岩类有关的成矿作用及其大地构造背景[J]. *高校地质学报*, 2005, 11(3): 291-304.
- Hua Ren-min, Chen Pei-rong, Zhang Wen-lan, Yao Jun-ming, Lin Jin-fu, Zhang Zhan-shi, Gu Sheng-yan. Metallogenesis and their geodynamic settings related to Mesozoic granitoids in the Nanling range [J]. *Geol J China Univ*, 2005, 11(3): 291-304 (in Chinese with English abstract).
- [36] 章邦桐, 陈培荣, 孔兴功. 赣南白面石过铝花岗岩基底为6710铀矿田提供成矿物质的地球化学证据[J]. *地球化学*, 2003, 32(3): 201-207.
- Zhang Bang-tong, Chen Pei-rong, Kong Xing-gong. Geochemical evidence for contribution of ore-forming material to the No.6710 uranium orefield by the Baimianshi peraluminous granite basement, southern Jiangxi Province [J]. *Geochimica*, 2003, 32(3): 201-207 (in Chinese with English abstract).
- [37] 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 Pei-rong. Geodynamic setting of Mesozoic magmatism and its relationship to uranium metallogenesis in southeastern China [J]. *Uran Geol*, 2004, 20(5): 265-270 (in Chinese with English abstract).
- [38] Zhang Guoquan, Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Feng Haisheng, Shang Pengqiang, Tian Jianji. REE geochemical characteristics of the No.302 uranium deposit in northern Guangdong, South China [J]. *Chinese J Geochem*, 2007, 26(4): 425-433.
- [39] Yamamoto J, Watanabe M, Nozaki Y, Sano Y. Helium and carbon isotopes in fluorites: Implications for mantle carbon contribution in an ancient subduction zone [J]. *J Volcanol Geotherm Res*, 2001, 107(1-3): 19-26.
- [40] 赵葵东, 蒋少涌, 肖红权, 倪培. 大厂锡-多金属矿床成矿流体来源的He同位素证据[J]. *科学通报*, 2002, 47(8): 632-635.
- Zhao Kuidong, Jiang Shaoyong, Xiao Hongquan, Ni Pei. The helium isotopic evidence for the ore-forming fluid source of the Dachang tin poly-metal deposit [J]. *Chinese Sci Bull*, 2002, 47(8): 632-635 (in Chinese).
- [41] 田世洪, 丁梯平, 袁忠信. 四川牦牛坪轻稀土矿床地幔流体特征——铅铋钨和氦氩同位素及稀土元素证据[J]. *地质学报*, 2006, 80(7): 1035-1044.
- Tian Shi-hong, Ding Ti-ping, Yuan Zhong-xin. Mantle fluids in the Maoniuping LREE deposit, Sichuan Province: Evidence of Pb-Sr-Nd, He-Ar isotopes and REE [J]. *Acta Geol Sinica*, 2006, 80(7): 1035-1044 (in Chinese with English abstract).
- [42] Turner G, Burnard P, Ford J L, Gilmour J D, Lyon I C, Stuart F

- M, Gruszczynski M, Halliday A. Tracing fluid sources and interactions [J]. *Phil Trans R Soc A*, 1993, 344(1670): 127 - 140.
- [43] Marty B, Jambon A, Sano Y. Helium isotope and CO<sub>2</sub> in volcanic gases of Japan [J]. *Chem Geol*, 1989, 76(1/2): 25 - 40.
- [44] Stuart F M, Turner G, Duckworth R C, Fallick A E. Helium isotopes as tracers of trapped hydrothermal fluids in ocean-floor sulfides [J]. *Geology*, 1994, 22(9): 823 - 826.
- [45] Torgersen T, Jenkins W J. Helium isotopes in geothermal systems: Iceland, The Geysers, Raft River and Steamboat Springs [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1982, 46(5): 739 - 748.
- [46] Torgersen T, Clarke W B. Helium accumulation in groundwater. I: An evaluation of sources and the continental flux of <sup>4</sup>He in the Great Artesian Basin, Australia [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1985, 49(5): 1211 - 1218.
- [47] Elliot T, Balletine C J, O'Nions R K, Ricchiuto T. Carbon, helium, neon and argon isotopes in a Po basin (northern Italy) natural gas field [J]. *Chem Geol*, 1993, 106(3/4): 429 - 440.
- [48] Ballentine C J, Mazurek M, Gautschi A. Thermal constraints on crustal rare gas release and migration: Evidence from Alpine fluid inclusions [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1994, 58(20): 4333 - 4348.
- [49] Clarke W B, Beg M A, Craig H. Excess <sup>3</sup>He in the sea: Evidence for terrestrial primordial helium [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1969, 6(3): 213 - 220.
- [50] Kurz M D. In situ production of terrestrial cosmogenic helium and some applications to geochronology [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1986, 50(12): 2855 - 2862.
- [51] 倪师军. 302 铀矿床垂直分带模式 [D]. 成都: 成都地质学院, 1990: 1 - 69.  
Ni Shi-jun. Vertical zoning model of uranium deposit No. 302 [D]. Chengdou: Chengdu College of Geology, 1990: 1 - 69 (in Chinese with English abstract).
- [52] Mamyrin B A, Tolstikhin I N. Helium Isotopes in Nature [M]. Amsterdam: Elsevier, 1984: 1 - 273.
- [53] 张国全, 胡瑞忠, 商朋强, 田建吉, 双燕. 302 铀矿床方解石 C-O 同位素组成与成矿动力学背景研究 [J]. *矿物学报*, 2008, 28(4): 413 - 420.  
Zhang Guo-quan, Hu Rui-zhong, Shang Peng-qiang, Tian Jian-ji, Shuang Yan. Study on the C-O isotopic composition of calcites and metallogenic dynamics background in the No. 302 uranium deposit [J]. *Acta Mineral Sinica*, 2008, 28(4): 413 - 420 (in Chinese with English abstract).
- [54] Gilder S A, Gill J, Coe R S, Zhao Xixi, Liu Zhongwei, Wang Genxian, Yuan Kuirong, Liu Wenlong, Kuang Guodun, Wu Haoruo. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of South China [J]. *J Geophys Res*, 1996, 101(B7): 16137 - 16155.
- [55] Li Xian-hua. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China [J]. *J Asian Earth Sci*, 2000, 18(3): 293 - 305.
- [56] Mao Jingwen, Xie Guiqing, Li Xiaofeng, Zhang Changqing, Wang Yitian. Mesozoic large-scale mineralization and multiple lithospheric extensions in South China [J]. *Acta Geol Sinica*, 2006, 80(3): 420 - 431.
- [57] 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 Xian-hua, Hu Rui-zhong, 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).
- [58] Li Xian-hua, McCulloch M T. Geochemical characteristics of Cretaceous mafic dikes from northern Guangdong, SE China: Age, origin and tectonic significance [M]// Flower M F J, Chung S L, Lo C H, Lee T Y. *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia. Geodynamics Series (vol. 27)*. Washington D C: American Geophysical Union, 1998: 405 - 419.
- [59] 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 刘荣, 钟宏, 赵军红, 蒋国豪. 华南地区中生代以来岩石圈伸展及与铀成矿关系研究的若干问题 [J]. *矿床地质*, 2007, 26(2): 139 - 152.  
Hu Rui-zhong, Bi Xian-wu, Peng Jian-tang, Liu Shen, Zhong Hong, Zhao Jun-hong, Jiang Guo-hao. Some problems concerning relationship between Mesozoic-Cenozoic lithospheric extension and uranium metallogenesis in South China [J]. *Mineral Deposits*, 2007, 26(2): 139 - 152 (in Chinese with English abstract).
- [60] 王联魁, 刘铁庚. 华南花岗岩铀矿 H、O、S、Pb 同位素研究 [J]. *地球化学*, 1987, 16(1): 67 - 77.  
Wang Lian-kui, Liu Tie-geng. H, O, S, Pb isotopic studies of uranium ore deposits in granitoid rocks of South China [J]. *Geochimica*, 1987, 16(1): 67 - 77 (in Chinese with English abstract).
- [61] 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 Jing-fu, Hu Rui-zhong. A tentative discussion on material sources of the Xiwang uranium deposit [J]. *Mineral Deposits*, 1990, 9(2): 141 - 148 (in Chinese with English abstract).
- [62] Min M Z, Luo X Z, Du G S, He B A, Campbell A R. Mineralogical and geochemical constraints on the genesis of the granite-hosted Huangao uranium deposit, SE China [J]. *Ore Geol Rev*, 1999, 14(2): 105 - 127.