

华南热液铀矿成矿作用若干问题探讨

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 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049

摘要: 华南地区基底铀背景值较高, 区域热液铀矿形成于晚中生代—古近纪(K—E)的地壳拉张期。区内各类型热液铀矿床在成矿时代、温压条件、矿物组合及热液蚀变等方面有一定的共同特征, 根据热液铀矿床的分布可划分为三大成矿带。铀成矿与伸展构造关系密切, 且成矿流体、物质可能为不同来源; 铀成矿期铀主要以碳酸铀络合物形式运移。

关键词: 华南热液铀矿; 成矿共性; 伸展构造; 成矿模式

中图分类号: P619.140.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2007)03-0290-05

Discussion of Some Problems on the Hydrothermal Uranium Mineralization in South China

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

1. State Key laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: There is relatively high uranium background in the basement rocks in South China. Hydrothermal uranium deposits in this region were formed during crust extension period from late Mesozoic to early Tertiary. There are certain extent common features in mineralization time, *p-t* condition, mineral association and hydrothermal alteration for various kinds of hydrothermal uranium deposits in the region. Three mineralization zones have been divided based on the distribution of the hydrothermal uranium deposits. The uranium mineralization is closely associated with the extensional structures, but the ore-forming fluids and uranium could be from different sources. Uranium was transported mainly in form of uranyl carbonate complex.

Key words: hydrothermal uranium deposits in South China; common features in mineralization; extensional structures; metallogenetic model

华南地区广泛分布有花岗岩型、火山岩型、碳硅泥岩型(部分淋积成因)和砂岩型(部分淋积成因)铀矿。自上世纪 50 年代在广东下庄发现我国第一个花岗岩型铀矿床以来, 许多学者对本区的热液铀矿做了大量的工作, 但对于华南地区热液铀矿的研究多集中于单个矿床或某一类型, 少有区域性成矿机理的探讨。笔者在综合分析的基础上, 探讨了热液铀矿成矿作用中的若干问题。

1 地质背景

华南地区的地层发育齐全。基底地层主要为前寒武结晶变质岩系, 盖层属碳硅泥岩建造和碎屑沉积。碳硅泥岩系为早震旦世至石炭纪和二叠纪, 岩性为浅变质—未变质的含碳硅质岩、页岩(泥岩)或碳酸盐岩, 属富铀的沉积建造^[1]。区内铀预富集地层的含

铀量为: 前震旦系九岭构造层为 $(2.2 \sim 4) \times 10^{-6}$, 修水构造层约为 4×10^{-6} , 上震旦—下寒武衍生铀源层为 $(20 \sim 30) \times 10^{-6}$, 上古生界衍生铀源层为 $(10 \sim 20) \times 10^{-6}$ ^[2], 表明变质基底和盖层的铀含量都较高。

本区经历了为雪峰运动—加里东运动—海西和印支运动—燕山运动—喜马拉雅运动两次大的构造岩浆活动, 其中与热液铀矿成矿关系密切的为印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动。岩体分布广泛, 从四堡期、雪峰期至燕山期岩体都有出露, 铀背景值较高。26 个改造型和同熔型非产铀岩体 165 个样品的统计表明平均铀含量为 9.71×10^{-6} , 为世界花岗岩中平均铀丰度的 2.8 倍, 产铀花岗岩体的铀含量更高, 且含铀性具随时代变新逐渐增高的趋势^[3]。

燕山运动早期($J_1 - K_1$), 由于受西太平洋西缘库拉板块北北西向和印度板块北东向的挤压作

收稿日期: 2006-03-31 收到, 05-10 改回

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资助项目(49925309)

第一作者简介: 商朋强(1980—), 男, 博士研究生, 专业方向: 矿床地球化学。

用^[4],区域应力机制为挤压性质;晚中生代—古近纪由于库拉板块向欧亚板块俯冲,且俯冲角度由低角度向中角度转变^[5],造成上覆地层的伸展性质,使本区出现一系列与伸展作用有关的岩浆活动,包括大范围的酸性(A型花岗岩与酸性火山岩)和基性(玄武岩、辉绿岩、煌斑岩等)岩浆活动,形成一些构造断陷盆地。受构造岩浆活动的控制,规模较大的热液铀矿多产在大的构造交叉部位和岩浆活动剧烈地区。

2 铀成矿共性和矿床分布规律

2.1 成矿共性

(1)成矿时代的同时性:本区热液铀矿的铀成矿时代与围岩时代间的矿岩时差已被许多学者所认同^[6,7];且矿岩时差随围岩时代的变老而加大。铀成矿期大致分4个主成矿期^[8](140~120 Ma、100~85 Ma、75~60 Ma和50~40 Ma),不同类型铀矿在不同时期的发育程度各异。热液铀矿的主成矿期与中—新生代基性岩浆活动^[9~11]期次相符合,空间上受同期构造活动的制约,说明热液铀矿与构造岩浆活动有内在的联系。

(2)与花岗岩体关系的密切性:区内花岗岩广布,特别是中生代花岗岩与有色金属(钨、锡、金和锑矿等)成矿关系密切。与世界上一些大型、超大型铀矿(非花岗岩型)^[12,13]成矿和花岗岩体有紧密的联系一样,本区热液铀矿的成矿也与花岗岩体有着不同程度的联系。花岗岩型铀矿直接赋存于花岗岩体或围岩接触带中。陈迪云、章邦桐^[14,15]对赣南、闽北一些火山岩型铀矿的研究指出,富铝的花岗岩基底为铀成矿提供了铀源;张祖还^[3]认为相山铀矿田从火山口中心至外围,岩性由碎斑流纹岩→改造型花岗岩呈逐渐过渡关系,沿环状和放射状裂隙产出的小型次花岗斑岩体中也有铀矿。许多产在花岗岩外接触带中的碳硅泥岩型铀矿受延至花岗岩体内部构造的控制,成矿物质部分或全部来自花岗岩体。本区热液砂岩型铀矿多产于白垩纪—古近纪的构造断陷盆地中,基底多为花岗质岩石,笔者认为部分成矿物质是由基底花岗岩提供的。

(3)成矿温压条件的相似性:成矿的温压条件对矿质沉淀和矿物组合有很大影响。本区热液铀矿成矿热液约为50~360℃,成矿阶段约为150~250℃,成矿阶段的压力为25~80 MPa^[16]。矿物组合为一些低温的铀矿物(主要为沥青铀矿)组合,而压力区间的一致性反映了相近的成矿深度。

(4)成矿热液蚀变的相似性:热液铀矿热液蚀变的类型有许多相似之处,如成矿前的碱交代蚀变和

水云母化,成矿期的碳酸盐化、绿泥石化和硅化等。尤其是成矿前源于地幔的碱交代蚀变的广泛发育^[17]对成矿极为有利,使成矿物质初步富集,酸性岩石去硅,改变了岩石的机械物理性质,提供了有利的赋矿空间,甚至可直接形成碱交代型铀矿床。

(5)简单相似的矿物组合:热液铀矿矿石多为脉状、网脉状构造,矿石矿物种类较少。成矿温度总体为中低温,具中低温矿物组合,以沥青铀矿为主,伴生有铁、铜的硫化物,脉石矿物以石英、方解石和萤石居多。矿化类型有沥青铀矿—方解石型、沥青铀矿—玉髓型和沥青铀矿—萤石型等。

2.2 热液铀矿分布规律

区内铀矿的分布呈一定的规律性。杜乐天^[17]以郴怀断裂、河源邵武断裂带和赣杭火山岩构造带为分界线,将其划分为西、中和东三大成矿带:西成矿带以碳硅泥岩型、砂岩型铀矿和花岗岩外接触带中的花岗岩型铀矿为主。碳硅泥岩型铀矿多沿扬子地台东南缘的江南古陆分布,位于白垩纪—古近纪红色盆地四周或附近^[18],以及花岗岩体的外接触带;中成矿带主要为花岗岩型和砂岩型铀矿,位于后加里东褶皱隆起带上;东成矿带(包括赣杭火山岩构造带)主要为与中酸性火山岩有关的火山岩型铀矿床,围岩为晚中生代。这种规律分布与古地理环境及地质构造演化事件紧密相关:西部与北部(湖南大部、赣北及皖南地区)沿扬子地块江南构造域基底发育大面积的前寒武系—二叠系的碳硅泥岩系地层,受后期构造和岩浆活动的影响,碳硅泥岩系地层或岩浆岩体中的铀活化并运移至一定的层位富集成矿。中部沿加里东褶皱隆起带广泛出露富铀的雪峰期—燕山期花岗岩体,产铀岩体中有中—新生代的幔源基性脉岩(辉绿岩、煌斑岩等)侵入^[10,19],中—新生代区域性伸展构造活动及基性岩脉的侵入,为铀成矿提供了矿化剂和原动力;东部沿海和浙赣火山岩带晚中生代大规模的火山喷发形成了上侏罗统铀含量达 19×10^{-6} 的富铀火山岩系^[20],形成了与火山岩型铀矿关系密切的数十条火山构造—火山喷发带、上百个火山负向构造和火山构造—火山盆地。

3 伸展构造与华南热液铀成矿

相对于本区多数金属成矿与挤压(剪切)、造山期构造活动有关,热液铀成矿则与燕山晚期的造山后张性(剪切)伸展构造关系密切^[21]。世界众多热液铀矿区(如法国中央高原铀矿区、捷克波希米亚铀矿区)无不与区域伸展构造密切相关。

首先,本区的热液铀成矿与中—新生代伸展构造

活动有时间上的一致性。伸展构造活动的主要三个期次(早白垩世末—晚白垩世初、晚白垩世和古近纪)与本区热液铀成矿主成矿期次相符,且不同类型铀成矿由东向西的演化序列与伸展构造的发育序列完全合拍。其次,本区中生代伸展构造空间上控制着热液铀矿的生成,伸展构造为热液铀成矿提供了有利的成矿空间,花岗岩型铀矿(包括砂岩型)主要受热隆伸展构造的控制,火山岩型铀矿主要受裂隙伸展构造的控制,碳硅泥岩型铀矿主要受重力伸展构造的控制^[22]。如赣杭火山岩构造带为一个未发育完全的、受北东向裂隙伸展构造控制的胚胎型裂谷,区内的火山岩型矿田又各自受不同变质核杂岩构造的控制^[23];粤北下庄矿田是加里东热穹隆内在剪切伸展构造作用下由不同期次、不同成分岩浆侵入体组成的复式岩体^[24]。最后,由伸展构造活动引起的岩浆作用可能为热液铀成矿提供了动力,包括热动力和成矿流体方面的贡献。

4 铀成矿的“三源”问题

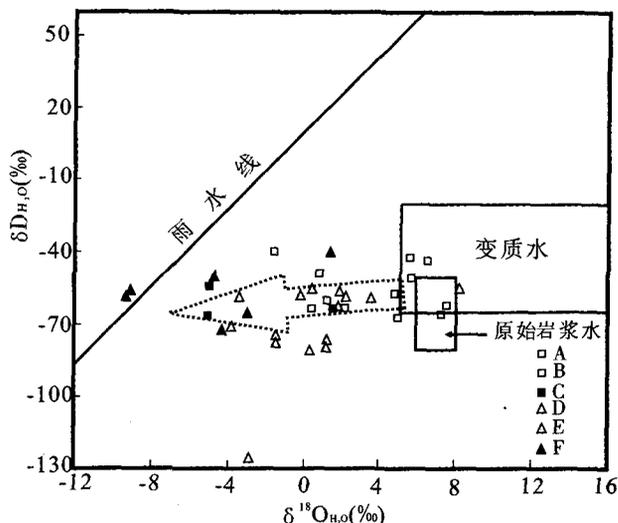
“三源”是指热源、流体源和物质源,流体又包括水和矿化剂。前人多将本区的热液铀矿床划归壳源成矿系统,使对“三源”的认识局限于地壳浅部的物质循环。近年来一些先进分析方法的应用,对其成因有了新的认识。

(1)物质源:大量的热液铀矿硫、铅、铈-钕等同位素数据和铀成矿实验研究表明,本区成矿物质应直接来源于围岩(花岗岩、火山岩和碳硅泥岩)、基底变质岩和花岗岩体。一些学者尝试探讨过铀来自地幔的可能性,如通过相山铀矿田的紫色萤石铈、钕同位素、脉石矿物和稀土元素地球化学研究,指出成矿物质——铀来自富集地幔^[25]。

(2)流体源:研究表明,许多矿床成矿流体与成矿物质并非同源。铀成矿流体的示踪多采用稳定同位素和微量元素方法。热液铀成矿过程流体与围岩作用带出了大量物质,矿石中微量元素对流体的示踪就难以确定流体源,测定某些成矿期脉石的稳定同位素组成对流体的示踪可能有更好的效果。

本区热液铀矿中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值绝大部分为 $-3\text{‰} \sim -8\text{‰}$,碳被认为来自地幔,即矿化剂 ΣCO_2 为幔源脱气成因^[26,27]。从氢、氧同位素分析来看(图1),矿前期的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值较高(由于矿岩的时差,排除了壳源岩浆热液对成矿流体的贡献),深部流体可能加入了矿前期的流体;随着成矿的演化,成矿流体氢、氧同位素组成向中生代大气降水^[25]漂移,成矿流体由以深源流体与下循环地下水混合为主向大气降水为

主演化。同时,幔源深部流体参与本区热液铀形成也被相山矿田稀有气体同位素证据^[26]所证实。



花岗岩型铀矿前期流体(A),成矿期流体(B),矿后期流体(C),以及火山岩型铀矿前期流体(D),成矿期流体(E),矿后期流体(F) H、O同位素组成。图中变质水、原始岩浆水范围和雨水线据 Taylor (1974),铀矿的 H、O同位素组成数据引自文献^[27]和^[29~32]

The H and O isotopic composition of premetallogenic fluids (A), metallogenic epoch fluids (B), post-metallogenic fluids (C) in granite-type uranium deposits, and the premetallogenic fluids (D), metallogenic epoch fluids (E), post-metallogenic fluids (F) in volcanic-type uranium deposits; Atmospheric water line, range of metamorphic water and initial magma are from Taylor (1974); The data of these uranium deposits is from ^[27]and^[29~32]

图1 华南部分热液铀矿热液流体氢、氧同位素组成
Fig. 1 The H and O isotopic compositions of hydrothermal fluids from some hydrothermal uranium deposits in South China

(3)热源:铀成矿期华南各铀矿区内未发生大规模的岩浆活动,因此热液铀矿的热源主要是大地热流、构造生热和放射性生热;以大地热流生热占主导地位。晚白垩世—古近纪时华南大陆气候炎热、干燥,构造(尤其张性构造)活动频繁,大地热流背景值较高,是本区铀成矿的主要热源。

5 成矿流体中铀的存在形式及成矿模式

本区含矿围岩中的铀在成矿前主要以晶质铀矿、含铀副矿物和分散吸附态存在,成矿期热液主要以碳酸铀络合物 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ 和 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_4^{4-}$ 形式迁移^[16,24,25],碳酸铀络离子运移至一定的位置被还原沉淀,且主要以沥青铀矿形式沉淀于构造破碎带。铀从围岩中的氧化物转换成络离子形式运移,依赖于深部循环的矿化剂(主要为 ΣCO_2)、中生代张性断裂构造活动及其热动力的驱动,在一定部位由于温度、压力等物理化学条件变化,六价铀被还原沉淀。

本区热液铀矿的成矿条件复杂,但绝大部分都

于中生代晚期和古近纪成矿,这一时期本区有统一的大地构造演化背景,为研究铀成矿提供了便利条件。基于以上分析,我们初步建立了热液铀矿理论模式:中生代晚期、新生代早期岩石圈减薄,地壳拉伸使与铀成矿时空上有密切关系的区域性深大断裂活动频繁,并使地幔脱气成因的 ΣCO_2 沿深断裂上升,在一定部位加入壳源深循环流体。富矿化剂流体与富铀围岩相互作用,促使地层和岩体中的铀大规模转入流体,形成富铀成矿热液。在有利的迁移条件下,铀在合适的构造部位沉淀聚集成矿。

6 结 语

(1)本区热液铀成矿是一个由铀预富集岩系(地层、岩浆岩体)经中生代构造-岩浆活动的改造作用、并在有利的空间成矿的过程。

(2)热液铀成矿在温压条件、围岩蚀变及矿物组合等方面有诸多共同特征,空间上具一定的分布规律,为从区域上把握热液铀矿成因提供了重要依据。

(3)与铀成矿同期的伸展构造与热液铀矿的关系(包括时间、空间上的密切关系及成矿动力方面的联系)相对于其他金属成矿尤为重要。

(4)热液铀成矿物质、成矿流体(包括流体中的矿化剂)和成矿热动力可能来自不同的源区。

(5)热液铀成矿过程中的铀主要以碳酸络合离子运移,成矿模式的建立应以矿化剂的加入—运移—沉淀或脱气为主线。

参考文献 (References):

- [1] 张待时. 中国晚震旦世-古生代海相含铀碳硅泥岩沉积建造及主要含铀层[J]. 铀矿地质, 1992, 8(1): 1-8.
Zhang Daishi. Late Sinian-Palaeozoic uranium-bearing carbonate-siliceous-pelitic sedimentary formations and main uraniumiferous strata in China [J]. Uranium Geology, 1992, 8(1): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [2] 刘继顺, 章邦桐. 华南陆壳铀地球化学演化与成矿[J]. 华东地质学院学报, 1992, 15(2): 130-135.
Liu Jishun, Zhang Bangtong. Uranium geochemical evolution and metallogenesis of continental crust in South China [J]. Journal of East China Geological Institute, 1992, 15(2): 130-135. (in Chinese with English abstract)
- [3] 张祖还, 章邦桐, 等. 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: 77-90.
Zhang Zuhuan, Zhang Bangtong, et al. On the uranium-bearing granites and their related uranium deposits in South China [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1991: 77-90. (in Chinese)
- [4] 李扬鉴, 张星亮, 陈延成. 中国东部中新代盆-山系及有关地质现象的成因机制[J]. 中国区域地质, 1996, (1): 88-95.
Li Yangjian, Zhang Xingliang, Chen Yancheng. On the formation mechanism of the Meso-Cenozoic basin-range system and its related geological phenomena [J]. Regional Geology of China, 1996, 1: 88-95. (in Chinese with English abstract)
- [5] Zhou X M, Li W X. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas [J]. Tectonophysics, 2000, 326: 269-287.
- [6] 胡瑞忠, 李朝阳, 倪师军, 刘莉. 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.
Hu Ruizhong, Li Chaoyang, Ni Shijun, Liu Li. Research on ΣCO_2 source in ore-forming hydrothermal solution of granite-type uranium deposit, South China [J]. Science in China (series B), 1993, 36(10): 1252-1263. (in Chinese)
- [7] 杜乐天. 中国热液铀矿基本成矿规律和一般热液成矿学[M]. 北京: 原子能出版社, 2001.
Du Letian. Basic metallogenic rules of hydrothermal uranium deposits in China and common hydrothermal mineralization [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2001. (in Chinese)
- [8] 于津生, 李耀菘. 中国同位素地球化学研究[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
Yu Jinsheng, Li Yaosong. Research on isotopic geochemistry in China [M]. Beijing: Science Press, 1997. (in Chinese)
- [9] 贾大成. 湘桂东部中生代基性岩地球化学与岩石圈演化[R]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2003.
Jia Dacheng. Geochemistry of the Mesozoic mafic rocks and the lithosphere revolution in the eastern Hunan and Guangxi province, China [R]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)
- [10] 李献华, 胡瑞忠, 饶冰. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学及地球化学[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)
- [11] Min M Z. Carbonaceous-siliceous-pelitic rock type uranium deposits in southern China: Geologic setting and metallogeny [J]. Ore Geology Reviews, 1995, 10: 51-64.
- [12] James P J, Malcolm T M. Sources of mineralising fluids for the Olympic Dam deposit (South Australia): Sm-Nd isotopic constraints [J]. Chemical Geology, 1995, 121: 177-199.
- [13] Aliouka C, Michel C, Bernard P. Possible uranium sources for the largest uranium district associated with volcanism: The Streltsova caldera 9 (Transbaikalia, Russia) [J]. Mineralium Deposita, 2003, 38: 127-140.
- [14] 章邦桐, 陈培荣, 杨东生, 孔兴功. 过铝花岗岩基底对成矿物质贡献的地球化学证据——以富城过铝花岗岩体及 6722 铀矿床为例[J]. 中国科学(D辑), 2002, 32(9): 735-741.
Zhang Bangtong, Chen Peirong, Yang Dongsheng, Kong Xing-gong. Geochemical evidence for contribution of ore-forming materials from peraluminous granite basement - Taking Fucheng pluton and No. 6722 uranium deposit in southern Jiangxi province as examples [J]. Science in China (series D), 2003, 46(3): 296-304. (in Chinese)
- [15] 陈迪云, 章邦桐, 孙大中, 杨东生. 武夷山高溪和富城花岗岩体

- 地球化学及其与铀成矿的关系[J]. 岩石学报, 1997, 13(1): 71-84.
- Chen Diyun, Zhang Bangtong, Sun Dazhong, Yang Dongsheng. Geochemistry and relation to uranium mineralization of Gaoxi and Fucheng granites in Wuyi mountains, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 1997, 13(1): 71-84. (in Chinese with English abstract)
- [16] 胡瑞忠. ΣCO_2 在华南热液铀矿床形成中的作用及其来源研究[R]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 1991.
- Hu Ruizhong. Research on the function and origin of ΣCO_2 in forming hydrothermal uranium deposits in South China [R]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1991. (in Chinese)
- [17] 杜乐天. 烃类流体地球化学——重论热液作用与岩浆作用[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- Du Letian. Geochemical principles of hydrocarbon alkali-fluids (reconstruction of hydrothermalism and magmatism theory) [M]. Beijing: Science Press, 1996. (in Chinese)
- [18] 刘继顺. 华南碳硅泥岩型铀矿床的地质特征分析[J]. 地质找矿论丛, 1992, 7(1): 103-110.
- Liu Jishun. A probe on geological features of carbonate-siliceous-pelitic uranium deposits in South China [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 1992, 7(1): 103-110. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张振华, 李顺初, 翦勋平. 鹿井铀矿田空间定位条件分析[J]. 铀矿地质, 1999, 15(6): 338-343.
- Zhang Zhenhua, Li Shunchu, Jian Xunping. Analysis on space emplacement condition of Lujing uranium ore field [J]. Uranium Geology, 1999, 15(6): 338-343. (in Chinese with English abstract)
- [20] 唐相生, 王圣祥. 华东铀成矿规律研究[J]. 铀矿地质, 2000, 16(5): 265-271.
- Tang Xiangsheng, Wang Shengxiang. Study on uranium metallogeny in eastern China [J]. Uranium Geology, 2000, 16(5): 265-271. (in Chinese with English abstract)
- [21] 陈跃辉, 陈祖伊, 蔡煜琦, 施祖海, 封全宏, 付锦. 华东南中生代伸展构造时空演化与铀矿化时空分布[J]. 铀矿地质, 1997, 13(3): 129-146.
- Chen Yuehui, Chen Zuyi, Cai Yuqi, Shi Zuhai, Feng Quanhong, Fu Jin. Space-time evolution of Meso-Cenozoic extensional tectonics and distributions of uranium mineralizations in Southeastern China [J]. Uranium Geology, 1997, 13(3): 129-146. (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.
- Yu Dagan. Extensional tectonics and uranium metallogenesis [J]. Uranium Geology, 1994, 10(3): 129-137. (in Chinese with English abstract)
- [23] 徐达忠, 薛振华. 下庄矿田基底的控矿作用及其有关地质问题[J]. 铀矿地质, 1994, 10(3): 150-155.
- Xu Dazhong, Xue Zhenhua. The basement control on Xiazhuang uranium ore field in south sector of Wuyi tumescence and relevant geological problems [J]. Uranium Geology, 1994, 10(3): 150-155. (in Chinese with English abstract)
- [24] 章邦桐, 陈祖伊. 内生铀矿床及其研究方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1990.
- Zhang Bangtong, Chen Zuyi. Endogenic uranium deposits and methods of study [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1990. (in Chinese)
- [25] 姜耀辉, 蒋少涌, 凌洪飞. 地幔流体与铀成矿作用[J]. 地学前缘, 2004, 11(2): 491-499.
- Jiang Yaohui, Jiang Shaoyong, Ling Hongfei. Mantle-derived fluids and uranium mineralization [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(2): 491-499. (in Chinese with English abstract)
- [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]. 地学前缘, 2004, 11(1): 153-160.
- Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Su Wenchao, Peng Jiantang, Li Chaoyang. The relationship between uranium metallogenesis and crustal extension during the cretaceous-tertiary in South China [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(1): 153-160. (in Chinese with English abstract)
- [27] 邓平, 沈渭洲, 凌洪飞, 叶海敏, 王学成, 濮巍, 谭正中. 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, Ye Haimin, Wang Xuecheng, Pu Wei, Tan Zhengzhong. Uranium mineralization related to mantle fluid: A case study of the Xianshi deposit in the Xiazhuang uranium ore field [J]. Geochimica, 2003, 32(6): 520-528. (in Chinese with English abstract)
- [28] Taylor H P. The application of oxygen and hydrogen isotopic studies to problem of hydrothermal alteration and ore deposition [J]. Econ. Geol., 1974, 69(6): 843-883.
- [29] 李月湘, 李田港, 童航寿, 冯明月, 徐展. 201 富铀矿床氢、氧、碳、硫、铅同位素研究[J]. 铀矿地质, 1995, 11(5): 273-301.
- Li Yuexiang, Li Tiangang, Tong Hangshou, Feng Mingyue, Xu Zhan. A study on hydrogen, oxygen, carbon, sulfur and lead isotopes in the rich uranium deposit No. 201 [J]. Uranium Geology, 1995, 11(5): 273-301. (in Chinese with English abstract)
- [30] 刘金辉. 下庄铀矿田成矿古水热系统的同位素研究及其应用[J]. 地质找矿论丛, 1997, 12(2): 50-56.
- Liu Jinhui. Isotopic study and application of the ore-forming fossil hydrothermal system in Xiazhuang uranium field [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 1997, 12(2): 50-56. (in Chinese with English abstract)
- [31] 孙占学, 李学礼, 史维浚, 周文斌, 刘金辉. 华东南相山铀矿田氢氧同位素地球化学研究[J]. 地质与勘探, 2001, 37(3): 20-23.
- Sun Zhanxue, Li Xueli, Shi Weijun, Zhou Wenbin, Liu Jinhui. Isotope geochemistry of oxygen and hydrogen of the Xiangshan ore-field, SE-China [J]. Geology and Prospecting, 2001, 37(3): 20-23. (in Chinese with English abstract)
- [32] 卢武长, 杨绍全, 张萍, 王玉生. 石源龙地区铀矿床的同位素地质特征[J]. 矿物岩石, 1997, 17(4): 68-75.
- Lu Wuchang, Yang Shaoquan, Zhang Ping, Wang Yusheng. Isotopic geological features of uranium deposit Shiyuanlong area [J]. Journal of Mineral Petrology, 1997, 17(4): 68-75. (in Chinese with English abstract)