

华南花岗岩型铀矿床成矿机理研究进展

张国全^{1,2}, 胡瑞忠¹, 商朋强^{1,2}, 刘 雷^{1,2}, 杨社锋^{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:本文介绍了华南花岗岩型铀矿床地质特征, 系统总结了前人对其成矿热液来源、物质来源, 铀的迁移沉淀机制、碱交代及花岗岩与成矿的关系等方面的研究成果。指出铀源体中的晶质铀矿及富铀矿物在深部相对还原的环境中被氧化而进入成矿热液中起主要作用的可能是大量幔源 F 和放射性衰变诱发产生的氧及碱交代溶蚀作用, 热液中的大部分 U^{6+} 主要被 S^{2-} 和 Fe^{2+} 等还原剂在浅部相对氧化的环境中还原成矿; 给出了一种较简易的物质来源定量方法和铀成矿模式。

关 键 词:成矿热液; 铀成矿机制; 花岗岩型铀矿床; 华南

中图分类号: P619.14 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2007)04-0399-06

An Overview on the Ore-forming Mechanism of the Granite-type Uranium Deposit in South China

ZHANG Guo-quan^{1,2}, HU Rui-zhong¹, SHANG Peng-qiang^{1,2}, LIU Lei^{1,2}, YANG She-feng^{1,2}

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

Abstract: This paper has introduced the geological characteristics of the granite-type uranium deposits in South China, systematically summarized previous research achievements on the sources of ore-forming hydrothermal fluids and materials, the mechanism of uranium migration and deposition, the relationship between the uranium mineralization and the alkali metasomatism or granites. It is suggested that a large amount of mantle-derived fluorine, and the oxygen and alkali metasomatism deduced by the radioactive disintegration might played key roles for oxidizing uraninite and uranium-rich minerals in the uranium source body and transferring uranium into the ore-forming hydrothermal fluids at depth under relatively reduced environment. On the other hand, the hexavalent uranium in the hydrothermal fluids should be mainly reduced by S^{2-} and Fe^{2+} and deposited at shallow depth under relatively oxidizing conditions. This paper has given a relatively simple method for quantifying the source of materials and has proposed a relatively reasonable model for the metallogenesis of uranium deposits.

Key words: ore-forming hydrothermal fluids and mechanism of uranium; granite-type uranium deposits; South China

中国铀矿床按赋矿围岩可分为花岗岩型、火山岩型、碳硅泥岩型和砂岩型四大类型。花岗岩型铀矿床是指与花岗岩类岩石在空间上与成因上有密切联系的铀矿床。此类矿床发现较早, 在世界上广泛分布, 被认为是典型的中、低温热液矿床。虽然近几十年来超大型不整合脉型及可地浸砂岩型铀矿床的发现和开采, 其地位相对下降; 然而在我国铀矿生产中, 华南花岗岩型铀矿床仍占有相当大的比重。

1 华南花岗岩型铀矿床的地质特征

华南花岗岩型铀矿床绝大多数分布在后加里东隆起带内, 受铀含量较高的花岗岩体控制。自中生

代开始, 该区进入伸展裂陷构造发育期: 早期受太平洋板块俯冲挤压作用的影响, 产生大量富铀酸性花岗岩岩浆活动; 中生代晚期, 随着太平洋板块俯冲作用的减弱, 本区由挤压作用为主转为以拉张作用为主, 形成了许多红色盆地(如丹霞盆地、南雄盆地)、断陷带(如长江复合断陷带、百顺断陷带、南雄断裂带等)及花岗岩体中的一系列断裂构造(如城口断裂、南雄断裂、棉花坑断裂带等)。这些伸展裂陷构造带控制了晚白垩纪盆地以及基性岩脉(辉绿岩、煌斑岩)和铀矿床的形成及定位。地壳拉张不仅提供了矿化剂 ΣCO_2 、热液运移通道和容矿空间, 改变热液的物理化学环境, 而且还提供摩擦热, 促成热液的形成, 使围岩发生构造蚀变, 促使铀的活化迁移成

收稿日期: 2006-05-30 收到, 2007-06-26 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)

作者简介: 张国全(1978—), 男, 博士研究生, 矿物、岩石、矿床学专业。E-mail: zhgq003@163.com.

通讯作者: 胡瑞忠。E-mail: huruizhong@hotmail.com.

矿^[1]。本区基性岩脉与矿床关系十分明显,下庄铀矿田可见硅化带交切中基性岩墙部位控制的铀矿床、铀矿化(即“交点”型矿床)。

华南花岗岩型铀矿床由热液浸取铀源体中的铀形成,总体上有很多共性^[2,3]:1)成矿时区内酸性岩浆活动早已停止,矿岩时差达700 Ma以上,小者也达40~50 Ma。2)铀矿多产在花岗岩中区域性北东—北北东向主干断裂附近及与其伴生的二、三级断裂的裂隙中。3)绝大多数矿床的成矿都是在断裂构造流动的热液中进行,铀成矿温度大致相同,成矿前阶段约为350~250℃,成矿阶段主要集中于250~150℃,成矿后阶段约为150~100℃。4)广泛发育多期多阶段的蚀变交代作用。5)矿石矿物成分简单。一种是在氧化条件下形成的红色微晶石英型铀矿(俗称“红矿”),储量大,品位中等,经济效益较“黑矿”低;主要产在硅化断裂带中,矿石矿物主要有沥青铀矿、赤铁矿、红色微晶石英、紫黑色萤石,局部含黄铁矿。另一种是在氧化还原过渡环境下形成的“黑矿”,由灰黑色微晶石英、紫黑色萤石和黄铁矿组成,富含沥青铀矿,矿石品位高,工业利用价值高。6)矿体呈(细)脉状、网脉状和不规则状。7)主要成矿期几乎均为140、120、90、70和50 Ma等^[2,4,5],而地壳拉张期分别为135~140、115~120、105、85~95、70~75和45~55 Ma^[4,6~10],可见主要成矿期都与中生代白垩纪—新近纪的几次分期的地壳拉张相对应^[11]。且成矿期后热液活动较强,先前形成的较富的矿体被贫化,被热液带出的铀常在粒间裂隙破碎带产出,常见绿色的铜铀云母、黄色的钙铀云母及硅钙铀矿等次生铀矿物。

2 铀成矿机理

一般认为产铀花岗岩中的铀在深部被氧化后进入深循环大气成因的地下水形成含矿热液,进而运移至浅部还原成矿。很多学者讨论过花岗岩中的晶质铀矿在深部被氧化为 U^{6+} 而转移到成矿热液中的各种有利因素,如氧化还原电位、矿化剂(ΣCO_2)等,但少有文献提到到底是什么物质促使晶质铀矿被氧化进入热液体系的。虽然大量资料证明铀来源于赋围岩(如花岗岩、火山岩等),但也有不少学者认为铀主要来源于地幔。

2.1 热液来源及铀源

热液来源大致有五种观点:1)传统认为是花岗岩岩浆演化至最后产生的残余热液;2)大气降水(地下水)深部循环加热产生的深源流体;3)大气降水直接淋滤成矿;4)花岗岩岩浆水,经过漫长过程浸

出淋滤成矿;5)沿深断裂上升的幔源热液。

大多数学者认为热液主要为大气成因的地下水^[12~17],也可能混有少量岩浆水^[18]。最近有人认为成矿热液是沿深断裂上升的幔源热液^[19~22]。胡瑞忠测出与矿石共生的成矿期黄铁矿的He-Ar同位素为壳幔混合来源(未发表),并指出矿石中有Ni、Co、V、F等深源元素异常(在富矿中尤为突出)。本文认为在形成含矿热液前随着地壳的拉张,幔源热液上升到稍浅处与深部流体混合,这种混合热液在地幔去气产生的矿化剂 CO_2 、氧化剂F以及放射性衰变诱发产生的氧和碱交代热液溶蚀作用共同对花岗岩中的晶质铀矿进行破坏、氧化,形成富铀的含矿热液,也就是说成矿热液可能是幔源热液与深部流体混合形成的。

本区的铀源由产铀花岗岩体提供^[2,3,12,16,18,23~25],但并非来自新鲜的产铀花岗岩体^[16],变质结晶基底也提供少部分^[25]。也有人认为铀源具有深源特征^[26],并可能主要来自富集地幔^[19,20]。研究发现,湘南地区198~81 Ma期间喷出的玄武岩中包体的W、Sb、Bi、U、Th、Cu等元素含量比原始地幔高出2.8~73倍,推测地幔在成矿物质来源方面也有贡献^[27]。前人对成矿物质来源的研究基本都是从定性角度判断的,由于Pb绝大部分属于U衰变产生的产物,因此可以通过Pb同位素来定量反推U的来源量。

2.2 铀的迁移沉淀机制

赋存于花岗岩中的铀以晶质铀矿为主,自深部向上迁移时主要以四价和六价铀形式迁移。金景福等^[28]指出,在接近岩浆作用温压条件的还原性初始含矿热液中,铀主要以四价形式迁移,而在热液上升运移的过程中,铀主要以六价铀的络合物迁移,从成矿前阶段到成矿后阶段,热液中铀的迁移形式由 $UO_2(CO_3)_4^{4-}$ 向 $UO_2F_4^{2-}$ 、 $UO_2(CO_3)_2^{2-}$ 和 UO_2^{2+} 形式转变。也有人^[29]认为成矿热液中 $UO_2(CO_3)_2^{2-}$ 和 UF_4^{2-} 较其它含铀络合物具更高的活动性,许多矿床中 $UO_2(CO_3)_2^{2-}$ 是成矿的关键, UF_4^{2-} 在另一些矿床中扮演重要的角色。李子颖等^[26]认为铀主要以四价氟、氯等络合物形式由深部往上迁移,而非通常所说的铀成矿时经历了氧化还原过程。成矿实验表明,铀在热液中以碳酸铀酰络合物为主、铀酰氟化物其次的形式迁移。基于以下事实:F有较强的氧化性,能氧化出水中的氧,铀矿床中有大量萤石产出,包裹体中也有大量 F^- ,地幔流体在深部运移时主要呈超临界流体,一些人认为F的氧化性有可能未得到充分发挥,当其运移到稍浅部与深部

热液混合时,大量 F 先氧化出热液中的氧,氧再氧化围岩中的晶质铀矿,或者地壳拉张时 F 直接进入花岗岩体系氧化晶质铀矿,使铀得以顺利转移到热液中再以 CO_2 的络合物形式迁移。花岗岩中的晶质铀矿得以被氧化迁移到成矿热液中,一方面得益于放射性诱发的氧的作用及碱交代对晶质铀矿的溶蚀,另一方面得益于大量幔源 F 的作用。

关于热液中铀在浅部沉淀成矿的问题,一般认为铀酰络合物解体游离出的 UO_2^{2+} 被黄铁矿还原为 UO_2 (沥青铀矿)。王驹等^[30]认为 H_2 、 CH_4 、 CO 、 H_2S 等还原性气体将热液中的 UO_2^{2+} 还原。赵凤民等^[31]的实验研究表明,黄铁矿还原六价铀形成沥青铀矿起主要作用的是 S^{2-} ,但固体黄铁矿必须先在 pH 值较低的酸性热液中转入热液。由于绝大多数矿床成矿热液都是由碱性向酸性变化,铀在弱碱-弱酸性热液中沉淀成矿,因此矿前期或成矿期热液是不大可能溶解黄铁矿的。从绝大多数矿床的成矿特征来看,一般黄铁矿多的地方矿石品位都很高(常以沥青铀矿矿脉形式出现),有的可达到百分之几甚至百分之十几;而矿石品位不是很高的“红矿”,也有少量黄铁矿,但铀矿物主要呈分散状赋存于石英硅化带中(很难见到沥青铀矿矿脉)。这些较低品位的“红矿”可能是矿前期高氧逸度碱交代热液的产物,碱交代蚀变岩石因含有大量的钾(钠)长石 Fe^{3+} 而呈红色,由于此后没有大量形成富含铀的热液或富铀热液没有流经此地(或流经此地而未停留),因而没有形成品位更高的矿石。上述分析表明,黄铁矿并不是热液铀矿床形成的主要还原剂,但其可作为寻找富铀矿体的标志物,真正起作用的是热液中的 S^{2-} 和 Fe^{2+} 等,黄铁矿只是这些离子被氧化生成的产物,铀矿床中普遍缺失硫酸盐矿物以及大多富铀矿体均与黄铁矿共生就说明了这一问题。因此,热液中的 S^{2-} 、 Fe^{2+} 等是铀沉淀成矿的极其重要的还原剂。

2.3 碱交代与铀成矿

按分布范围和碱质来源,有两种花岗岩的碱交代:一是局限于复式花岗岩内部,由岩浆晚期分异而成^[32,33],处于半开放-半封闭体系的 K、Na 不能彻底分离而只能叠加交代原岩;二是见于花岗岩内部且扩展到围岩中,开放体系,碱质热液为幔源成因^[34,35]。由于碱质热液在沿区域性深大断裂、深层次伸展构造向上运移的距离长,演化时间长,因此 K、Na 完全分离,表现为各自的交代蚀变作用。研究表明^[36],经碱交代作用,含铀副矿物在碱性热液中不稳定而大量减少甚至消失,铀被大量带出,进入

热液体系,在成矿阶段伴随绿泥石化、赤铁矿化、碳酸盐化,大部分以裂隙充填物的形式沉淀。碱交代岩的矿物如长石、石英的铀含量平均值低于花岗岩中同类矿物。在碱交代过程中,斜长石中的聚片钠长石和微斜长石被棋盘格状钠长石代替,石英被碱性溶液溶离等,发生元素更替。在此过程中,离子半径较小的 Na^+ ($0.98 \times 10^{-4} \text{ nm}$) 代替了离子半径较大的 Ca^{2+} ($1.06 \times 10^{-4} \text{ nm}$) 和 K^+ ($1.33 \times 10^{-4} \text{ nm}$),石英溶离后的空洞被新生矿物(钠长石、方解石、次生石英等)不完全充填,造成岩石孔隙度增大。程华汉等^[37]发现碱交代岩中的晶质铀矿有溶蚀现象,锆石(主要的富铀矿物)中的铀发生了显著亏损,说明碱交代过程晶质铀矿有可能因溶蚀而使铀转移到热液中,富铀矿物中的铀在碱交代过程有可能直接进入成矿热液。杜乐天^[34]指出,碱交代作用是热液成矿作用的第一大前提,是释放矿质提供矿源的基本条件。

总之华南花岗岩型铀矿碱交代发育,对铀矿床的形成作用主要表现在:1)溶蚀晶质铀矿及浸出部分富铀矿物中的铀;2)碱交代后易破碎的花岗岩为富含矿化剂 ΣCO_2 的热液提供通道,易于浸取花岗岩中的铀;3)为含矿热液的沉淀提供有利的场所。

2.4 花岗岩与铀成矿的关系

前人认为燕山期花岗岩对本地区的铀成矿起到了很重要的作用,可能是最主要铀源,但最近有较多的学者^[38~40]指出,印支期花岗岩可能比燕山期花岗岩有更为重要的作用。从最新华南花岗岩分布地质图^[42]看,很大一部分前人认定的燕山期花岗岩已被更正为印支期花岗岩。综合前人的研究成果,可以这样描述成矿过程:华南屡次花岗岩岩浆侵位同熔前寒武纪含铀地层、早期花岗岩造就了花岗岩中丰富的铀矿物,最终印支期花岗岩为铀矿床的形成准备了丰富的铀源;地壳挤压晚期及地壳拉张早期,以燕山期花岗岩侵入、碱交代作用为契机,早期热液破坏了富铀花岗岩的结构和富铀矿物,为含矿热液浸取迁移铀奠定了基础;燕山期花岗岩可能主要提供热源、诱导印支期花岗岩内部形成更多的小断裂(为成矿热液提供通道),因此岩浆分异的热液不可能是富铀、富矿化剂的热液,矿体是在花岗岩成岩后形成的。

2.5 铀矿床成因

华南花岗岩型铀矿床的成因有:岩浆热液说、大陆风化说、热水浸出说和深源矿化剂说。前两种成因模式受不少学者的质疑。热水浸出说是目前的主流学派,主要依据矿岩时差大,成矿温度较高及产铀花岗岩富铀等特征,认为铀矿床是地下热水沿断裂

上升过程中从产铀花岗岩中浸出铀,含铀热液运移到近地表沉淀所致。胡瑞忠等^[42]依据流体包裹体中的碳、硫同位素,基性脉岩与铀矿床年龄的关系等一系列证据,指出铀成矿得益于铀在深部相对还原的环境被氧化进入热液,在浅部相对氧化的环境被还原;地壳拉张使大量幔源 ΣCO_2 进入热液体系,富含 ΣCO_2 的热液通过母岩的裂隙、断裂、孔隙大量浸取出花岗岩中的铀;当含矿热液运移到浅部时,由于含矿热液的压力急剧下降使热液沸腾, ΣCO_2 从含矿热液中逸出,使先前以稳定络合物形式迁移的铀络合物解体而形成铀矿床。这种深源矿化剂说较为合理地解释了铀矿的成矿时代与花岗岩成岩间的时差,铀矿床同时集中于中生代晚期地壳拉张成矿等问题。此外还有杜乐天的“下降、上升”双重模式、周维勋的“内生富集表生汲取成矿学说”和“碱性幔汁成矿”^[32,43]等。这些学说丰富了热液铀成矿理论,促进了铀成矿作用的研究和找矿工作。

综合前人的研究成果,本文改进并完善了华南花岗岩型铀矿床的成矿模式(图1):震旦纪—寒武纪地层初步富集铀元素,在此后的屡次岩浆活动中,后期(主要是印支期花岗岩)岩浆同熔早期岩浆岩形成富铀岩体;燕山期花岗岩提供了丰富的热源,诱导印支期花岗岩内部形成更多的小断裂,构造运动和早期热液破坏了富铀花岗岩的结构和富铀矿物,奠定了后期铀矿物氧化及热液运移的基础;中生代晚期地壳拉张直接沟通了地壳与地幔,大量富含矿化剂和氧化剂的地幔流体与深部流体混合,成为含矿热液的前奏;在碱质热液的溶蚀作用、氧化剂F及放射性诱发的氧的共同作用下,花岗岩中的晶质铀矿被氧化, $\text{U}^{4+} \rightarrow \text{U}^{6+}$,使铀得以在热液中迁移,形成含矿热液;含矿热液在向上运移过程中由于压力降低而沸腾,大量矿化剂 CO_2 逸出,碳酸铀酰络合物解体,进而形成氟化铀酰络合物,由于氟化铀酰络合物相对不稳定,在成矿

热液到达地壳浅部时与大气降水混合,又由于大气降水富含 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,使热液中的阴离子与 F^- 结合形成萤石,阴离子活度的降低促进铀酰络合离子的解体,铀被 S^{2-} 、 Fe^{2+} 等还原剂还原进而与黄铁矿赤铁矿等共生沉淀成矿。

3 结 论

1)成矿热液来自地幔去气形成的热液与深部流体的混合。铀源主要来自围岩,少部分来自地幔。

(2)碱交代作用主要表现在破碎花岗岩中,改变了富铀矿物的结构及铀的赋存状态,为含矿热液的沉淀提供有利场所等。

(3)地幔既提供了大量的氧化剂F和部分铀源,又为成矿热液提供了大量矿化剂 ΣCO_2 。

(4)地幔去气成矿模式能较为合理地解释华南花岗岩型铀矿床的成因。

致 谢 感谢李朝阳研究员、朱维光副研究员和陈兰博士在成文过程中给予的鼓励与帮助。

参考文献 (References):

- [1] 刘继顺,章邦桐. 构造蚀变作用与铀成矿[J]. 大地构造与成矿学, 1989, 13(2): 168—175.
Liu Jishun, Zhang Bangtong. Tectonic alteration and uranium mineralization[J]. Geotectonica et Metallogenia, 1989, 13(2): 168—175. (in Chinese)
- [2] 杜乐天. 花岗岩型铀矿文集[M]. 北京: 原子能出版社, 1982.
Du Letian. On the granite-type uranium deposits[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1982. (in Chinese)
- [3] 李耀松. 华南花岗岩型铀矿床成矿时代及成因探讨[A]. 花岗岩型铀矿文集[M]. 北京: 原子能出版社, 1982.
Li Yaosong. Time and cause of formation of granite-hosted uranium deposit in southern China[A]. Corpus of the granite-hosted uranium deposits[C]. Beijing: Atomic Energy Press, 1982. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 胡宝群, 白利红, 徐达忠. 下庄铀矿田早期高温成矿作用及其意义[J]. 铀矿地质, 2001, 17(5): 280—284.
Hu Baoqun, Bai Lihong, Xu Dazhong. The early high-temperature uranium mineralization in Xiaozhuang ore-field and its significance[J]. Uranium Geology, 2001, 17(5): 280—284. (in Chinese with English abstract)

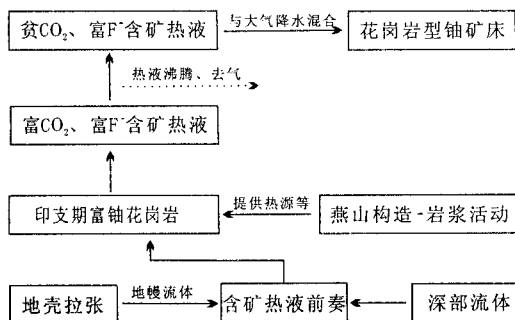


图1 华南花岗岩型铀矿床的成矿模式图

Fig. 1 A proposed metallogenetic model for granite-type uranium deposit in South China

- [6] 张勤文, 黄怀曾. 中国东部中、新生代构造岩浆活化史[J]. 地质学报, 1982, 56(2): 111-122.
Zhang Qinwen, Huang Huaizeng. The Cenozoic tectonic-magmatic activities in eastern China[J]. Acta Geologica Sinica, 1982, 56(2): 111-122. (in Chinese)
- [7] 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 Yiqi, Shi Zuhai, Feng Quanhong, Fu Jin. Space-time evolution of Meso-Cenozoic extensional tectonics and distributions of uranium mineralization in southeastern China[J]. Uranium Geology, 1997, 13(3): 129-146. (in Chinese with English abstract)
- [8] 胡瑞忠, 金景福. 贵东岩体中煌斑岩的成因[J]. 矿物岩石, 1990, 10(4): 1-7.
Hu Ruizhong, Jin Jingfu. The origin of lamprophyre in Guidong granitic complex[J]. Mineralogy and Petrology, 1990, 10(4): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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)
- [10] Li X H. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2000, 18(3): 293-305.
- [11] Hu R Z, Li C Y, Ni S J, Liu L. Research on ΣCO_2 source in ore-forming hydrothermal solution of granite type uranium deposits, South China[J]. Science in China (series B), 1993, 36: 1252-1262.
- [12] 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(1): 67-77.
Wang Liankui, Liu tiegen. H, O, S, Pb isotopic studies of uranium ore deposits in granitoid rocks of south China[J]. Geochimica, 1987, (1): 67-77. (in Chinese with English abstract)
- [13] Jin J F, Hu R Z. Transport deposition of uranium in hydrothermal ore fluids as exemplified by uranium deposit 302[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 1988, 7: 221-232.
- [14] 胡瑞忠, 金景福. 上升热液浸取成矿过程中铀的迁移沉淀机制探讨——以希望铀矿床为例[J]. 地质论评, 1990, 36(4): 317-325.
Hu Ruizhong, Jin Jingfu. Mechanism of the migration and deposition of uranium in ascending hydrothermal solutions: Evidence from Xiwang uranium deposit[J]. Geol. Rev., 1990, 36(4): 317-325. (in Chinese with English abstract)
- [15] 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]. Contrib. Geol. Min. Resources Research, 1997, 12(2): 50-56. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王健芳, 高德统, 郑家仪. 诸广岩体南部富铀矿成矿地球化学条件的初步探讨[J]. 铀矿地质, 1989, 5(4): 194-202.
Wang Jianfang, Gao Detong, Zheng Jiayi. A preliminary approach to the metallogenic geochemical conditions of rich uranium ores in the southern part of Zhuguang massif[J]. Uranium Geology, 1989, 5(4): 194-202. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王明太, 罗毅, 孙志福, 朱杰辰, 李建红. 诸广铀成矿区矿床成因探讨[J]. 铀矿地质, 1999, 15(5): 279-285.
Wang Mingtai, Luo Yi, Sun Zhifu, Zhu Jiechen, Li Jianhong. Discussion on genesis of uranium deposits in Zhuguang uranium metallogenic region[J]. Uranium Geology, 1999, 15(5): 279-285. (in Chinese with English abstract)
- [18] 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)
- [19] 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)
- [20] 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)
- [21] 邓平, 舒良树, 谭正中. 诸广—贵东大型铀矿聚集区富铀成矿地质条件[J]. 地质论评, 2003, 49(5): 486-494.
Deng Ping, Shu Liangshu, Tan Zhengzhong. The geological setting for the formation of rich uranium ores in Zhuguang-Guidong large-scale uranium metallogenic area[J]. Geol. Rev., 2003, 49(5): 486-494. (in Chinese with English abstract)
- [22] 朱捌, 凌洪飞, 沈渭洲, 高剑峰, 邓平, 黄国龙, 谭正中. 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, Gao Jianfeng, Deng Ping, Huang Guolong, Tan Zhengzhong. Isotopic geochemistry of Shituling uranium deposit, northern Guangdong Province, China[J]. Mineral Deposit, 2006, 25(1): 71-82. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王从周. 中国花岗岩型铀矿地质特征[M]. 北京: 原子能出版社, 1985.
Wang Congzhou. Geological characteristics of China's granite-type uranium deposits[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1985. (in Chinese)
- [24] 胡瑞忠, 金景福. 论贵东花岗岩体的成因及起源[J]. 成都地质学院学报, 1988, 15(3): 17-25.
Hu Ruizhong, Jin Jingfu. Genesis and origin of the Guidong granitic batholith[J]. J. Chengdu College of Geology, 1988, 15(3): 17-25. (in Chinese with English abstract)

- [25] 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 Geology Reviews*, 1999, 14: 105—127.
- [26] 李子颖, 李秀珍, 林锦荣. 试论华南中生代地幔柱构造、铀成矿作用及其找矿方向[J]. *铀矿地质*, 1999, 15(1): 9—17.
Li Ziyang, Li Xiuzhen, Lin Jinrong. On the Meso-Cenozoic mantle plume tectonics, its relationship to uranium metallogenesis and prospecting directions in South China[J]. *Uranium Geology*, 1999, 15(1): 9—17. (in Chinese with English abstract)
- [27] 赵振华, 包志伟, 张伯友. 湘南中生代玄武岩类地球化学特征[J]. *中国科学(D辑)*, 1998, 28(增刊): 6—14.
Zhao Zhenhua, Bao Zhiwei, Zhang Boyou. Geochemical characteristics of Mesozoic basanitoids in South Hunan Province[J]. *Science in China (series D)*, 1998, 28(suppl.): 7—14. (in Chinese)
- [28] 金景福, 胡瑞忠. 302 矿床成矿热液中铀的迁移和沉淀[J]. *地球化学*, 1987, 4: 320—329.
Jin Jingfu, Hu Ruizhong. Transportation and deposition of uranium in hydrothermal ore-forming fluids as exemplified by uranium deposit No. 302[J]. *Geochimica*, 1987, 4: 320—329. (in Chinese with English abstract)
- [29] Chen Peirong, Zhang Bangtong, Zhang Zhuhuan. Speciation and precipitation of uranium complexes in hydrothermal solutions related to granite-type uranium deposits[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 1992, 11(3): 252—260.
- [30] 王驹, 杜乐天. 论铀成矿过程中的气还原作用[J]. *铀矿地质*, 1995, 11(1): 19—24.
Wang Ju, Du Letian. Gas reduction: An important factor in the formation of uranium deposits[J]. *Uranium Geology*, 1995, 11(1): 19—24. (in Chinese with English abstract)
- [31] 赵凤民, 沈才卿. 黄铁矿与沥青铀矿的共生条件及在沥青铀矿形成过程中所起作用的实验研究[J]. *铀矿地质*, 1986, 2(4): 193—199.
Zhao Fengmin, Shen Caiqing. Experimental researches on paragenetic condition for pyrite and pitchblende and its role in pitchblende formation process[J]. *Uranium Geology*, 1986, 2(4): 193—199. (in Chinese with English abstract)
- [32] 张彦春. 诸广、贵东花岗岩中碱性中酸性流体与铀成矿[J]. *铀矿地质*, 2002, 18(4): 210—219.
Zhang Yanchun. Alkalic mantle fluids and uranium ore-formation in Zhuguang and Guidong granite massifs[J]. *Uranium Geology*, 2002, 18(4): 210—219. (in Chinese with English abstract)
- [33] 吴俊奇, 闵茂中, 翟建平, 罗兴章, 赖贻堂, 魏元泵. 华南诸广山复式岩体中段花岗岩的碱交代蚀变[J]. *岩石学报*, 1998, 14(1): 90—98.
Wu Junqi, Min Maozhong, Zhai Jianping, Luo Xianzhang, Lai Yitang, Wei Yuanpeng. Alkali metasomatic alteration of the granite in middle Chuguang mountain, South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1998, 14(1): 90—98. (in Chinese with English abstract)
- [34] 杜乐天. 碱交代岩研究的重大成因意义[J]. *矿床地质*, 2002, 21(增刊): 953—958.
Du Letian. The important significance of alkali-metasomatic rock studies[J]. *Mineral Deposit*, 2002, 21(suppl.): 953—958. (in Chinese with English abstract)
- [35] 邓平, 凌洪飞, 沈渭洲, 高剑峰, 谭正中, 朱捌, 黄国龙. 粤北石土岭铀矿床碱交代作用成因探讨[J]. *地质论评*, 2005, 51(5): 557—565.
Deng Ping, Ling Hongfei, Shen Weizhou, Gao Jianfeng, Tan Zhengzhong, Zhu Ba, Huang Guolong. A discussion on alkali metasomatism in Shituling uranium deposit, northern Guangdong Province[J]. *Geological Review*, 2005, 51(5): 557—565. (in Chinese with English abstract)
- [36] 章邦桐. 内生铀矿床及其研究方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1990.
Zhang Bangtong. Endogenic uranium deposits and methods of study[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1990. (in Chinese)
- [37] 程华汉, 杜乐天. 几个铀矿床碱交代作用中重砂矿物变化的研究[J]. *铀矿地质*, 1998, 14(1): 26—31.
Cheng Huahan, Du Letian. Study on heavy minerals of some uranium deposits[J]. *Uranium Geology*, 1998, 14(1): 26—31. (in Chinese with English abstract)
- [38] 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): 265—270.
Chen Peirong. Geodynamic setting of Mesozoic magmatism and its relationship to uranium metallogenesis in southeastern China[J]. *Uranium Geology*, 2004, 20(5): 265—270. (in Chinese with English abstract)
- [39] 毛景文, 胡瑞忠. 大规模成矿作用与大型矿集区预测研究[J]. *中国基础科学*, 2004, 6(6): 3—6.
Mao Jingwen, Hu Ruizhong. Studies on the large-scale mineralization and prediction for the large mineralized clusters[J]. *China Basic Science*, 2004, 6(6): 3—6. (in Chinese)
- [40] 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 Renmin, Chen Peirong, Zhang Wenlan, Yao Junming, Lin Jinfu, Zhang Zhanshi, Gu Shengyan. Metallogenesis and their geodynamic settings related to Mesozoic granitoids in the Nanling range[J]. *Geol. J. China Universities*, 2005, 11(3): 291—304. (in Chinese with English abstract)
- [41] 孙涛, 周新民. 华南花岗岩分布图[Z]. 2005.
Sun Tao, Zhou Xinmin. Distribution of granites in South China[Z]. 2005. (in Chinese)
- [42] 胡瑞忠. 花岗岩型铀矿床成因讨论——以华南为例[J]. *地球科学进展*, 1994, 9(2): 41—46.
Hu Ruizhong. A commentary on genesis granite-type uranium deposits: As exemplified by South China[J]. *Adv. Earth Sci.*, 1994, 9(2): 41—46. (in Chinese with English abstract)
- [43] 仇宝聚. 铀矿大型矿集区与成矿作用[J]. *铀矿地质*, 2001, 17(1): 5—17.
Zhang Baoju. Large ore-concentrated area of uranium deposits and uranium metallogenesis[J]. *Uranium Geology*, 2001, 17(1): 5—17. (in Chinese with English abstract)