

华南赣杭构造带火山岩型铀矿成矿规律 与成矿作用研究进展

刘军港¹, 李子颖¹, 张万良², 聂江涛¹

(1. 核工业北京地质研究院, 中核集团铀资源勘查与评价技术重点实验室, 北京 100029;

2. 核工业 270 研究所, 江西 南昌 330200)

摘 要: 华南赣杭构造带是典型的火山岩型铀矿床成矿带, 其铀矿成矿时代、控矿规律及热液蚀变等方面有一定的共同特征。铀成矿流体主要为深源高温、高压、中高盐度、富含挥发分的还原性流体, 晚期有大气降水加入, 富铀基底和富集地幔可能共同提供了成矿物质, 成矿期铀可能主要以正四价杂化配合物形式运移。矿床的形成是中生代大陆热点作用晚期的产物。

关键词: 赣杭构造带; 火山岩型铀矿; 成矿规律; 大陆热点作用; 成矿模式

中图分类号: P619.14

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2017)01-0025-10

Advances on Metallogenesis of Volcanic-type Uranium Deposits in Gan-Hang Tectonic Belt, Southeast China

LIU Jungang¹, LI Ziyang¹, ZHANG Wanliang², NIE Jiangtao¹

(1. CNNC Beijing Research Institute of Uranium Geology, Key Laboratory of Uranium Resource Exploration and Evaluation Techniques, CNNC, Beijing 100029, China; 2. Research Institute No. 270,

CNNC, Nanchang 330200, Jiangxi, China)

Abstract: The Gan-Hang tectonic belt is a typical volcanic-type uranium mineralization belt. There are certain extent common features in mineralization ages, ore-controlled characteristics, mineral association and hydrothermal alteration for the uranium deposits in this region. The mineralization fluids are characterized by high temperature, high pressure, middle-high salinity, volatile-bearing and deoxidize and influx of circulated meteoric water in later stage. The ore-forming matters are sourced from uranium-enriched basement and enriched mantle, and the uranium was mainly migrated as the uranous hybrid complexes in metallogenic stage. The formation of uranium deposits is closely associated with Mesozoic continental hot spots.

Keywords: Gan-Hang tectonic belt; volcanic-type uranium; common features in mineralization; continental hot spots; metallogenic model

火山岩型铀矿床是中国最重要的铀矿类型之一。
在中国与火山岩有关的铀矿床不仅数量多、储量大,

而且矿化类型也比较复杂,因而引起国内外地质学家的
关注(李子颖等, 1999; JIANG et al., 2006; LIN

收稿日期: 2016-10-06; 修回日期: 2016-11-27

基金项目: 中核集团“龙灿工程”相山基础地质研究项目(LCD116)

作者简介: 刘军港(1988-), 男, 博士研究生, 从事铀多金属成矿作用研究。E-mail: ljgbrui@126.com

et al. , 2006; HU et al. , 2009; FAYEK et al. , 2011; EGLINGER et al. , 2013)。华南赣杭火山岩带是世界上典型的火山岩型铀矿床成矿带(FAYEK et al. , 2011),该类型矿床储量和大于 3 000 t 以上矿田、矿床的数量均占中国已探明铀矿床储量和大型矿床数量的 20%左右,发育有相山、大洲、新路、盛源等多个含铀火山盆地(毛景文等,2008)。

许多学者对本区的各个铀矿做了大量的工作,但对于华南地区火山岩型铀矿的研究多集中于单个矿床,少有区域性成矿机理的探讨。笔者在综合分析的基础上,探讨了赣杭构造带火山岩型铀矿成矿作用中成矿流体来源、成矿物质来源及迁移、沉淀机制、成矿规律等若干问题。

1 赣杭构造带特征

赣杭构造带大地构造位置上属于钦(州湾)-杭(州湾)结合带即位于扬子与华夏两大古陆块中间巨

型构造结合带的北东段(杨明桂等, 1997; MIN et al. , 2002)。赣杭构造带东起浙江绍兴,西至江西永丰,总体呈北东向展布,长大于 600 km,宽一般为 50~70 km(图 1),大地构造位置位于华南一级构造单元的结合部位,横跨江南元古宙岛弧和华南加里东造山带 2 个不同的二级构造单元,北侧为下扬子地块,南侧为华南地块(余心起等,2006)。

赣杭成矿带是中国东南部晚侏罗世一早白垩世一条重要的沉积-火山岩带(GILDER et al. , 1996),经历了长期复杂的地质发展历史,构造运动和岩浆活动频繁,尤以中生代强烈的火山活动最为显著。燕山中期强烈挤压运动导致大规模的火山活动,形成赣杭火山岩带;燕山晚期火山活动减弱并向东迁移,区域构造环境由挤压转为拉张(余心起等,2006),这一时期在赣杭构造火山岩带发生了高强度、大规模、短时限的铀成矿作用,形成了相山、盛源、大洲铀矿田及数十个铀矿床(邵飞等,2008a)。

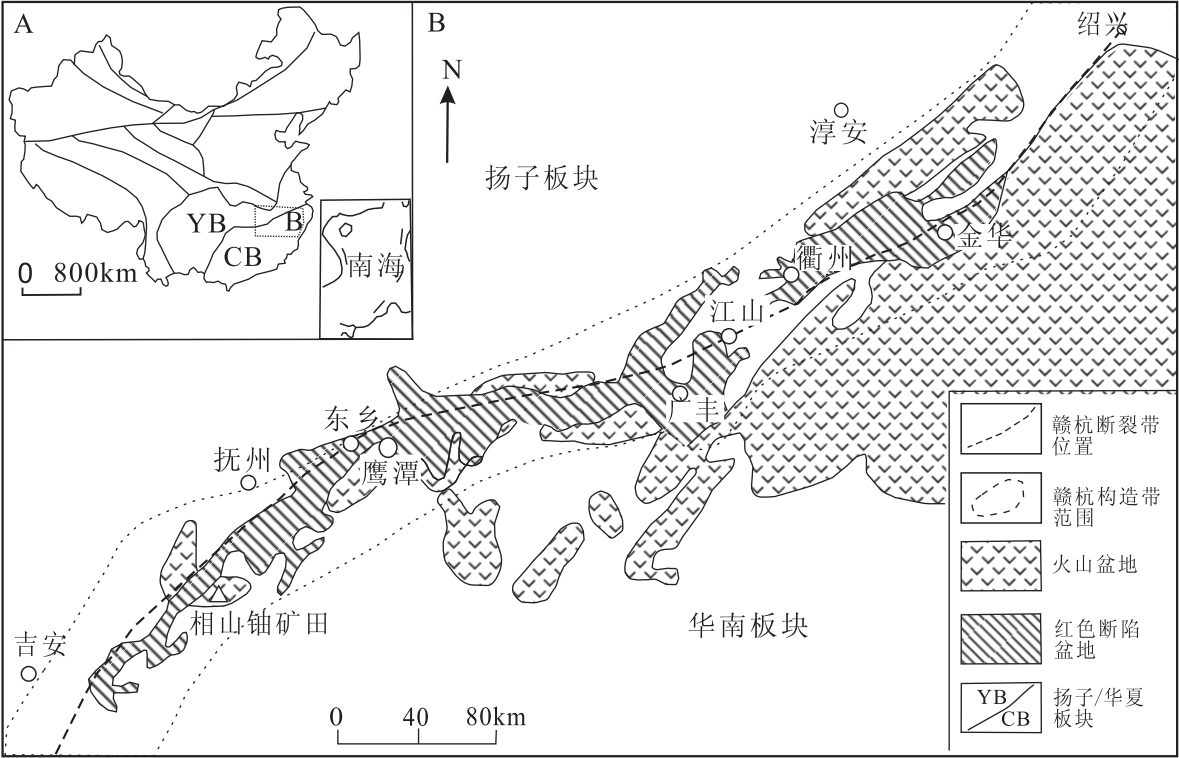


图 1 含铀火山盆地分布示意图(根据余心起等,2006; 邵飞等,2008a 修改)
Fig. 1 The distribution sketch of uranium-bearing volcanic basins

2 赣杭成矿带火山岩型铀矿成矿共性

该带上典型火山岩型铀矿列于表 1, 归结起来有以下特点和成矿共性。

(1) 围岩以集中形成于早白垩世 A 型中酸性火山-侵入杂岩为主, 但成矿不完全受岩性控制。

该带含矿岩性主要为中酸性火山侵入杂岩体, 也有少量分布于盆地边缘变质岩和砂岩中, 但各个盆地含矿岩性不尽相同: 新路含铀盆地含矿岩性主要为黄尖组凝灰岩及盆地上部花岗斑岩(陈爱群, 1997)。大洲火山盆地含矿岩性为厚层状流纹岩夹火山碎屑-沉积岩(田建吉等, 2010)。相山铀矿主要产在早白垩世的碎斑熔岩和流纹英安岩及凝灰岩之中, 少量分布于盆地边缘砂岩和变质岩中(陈跃辉

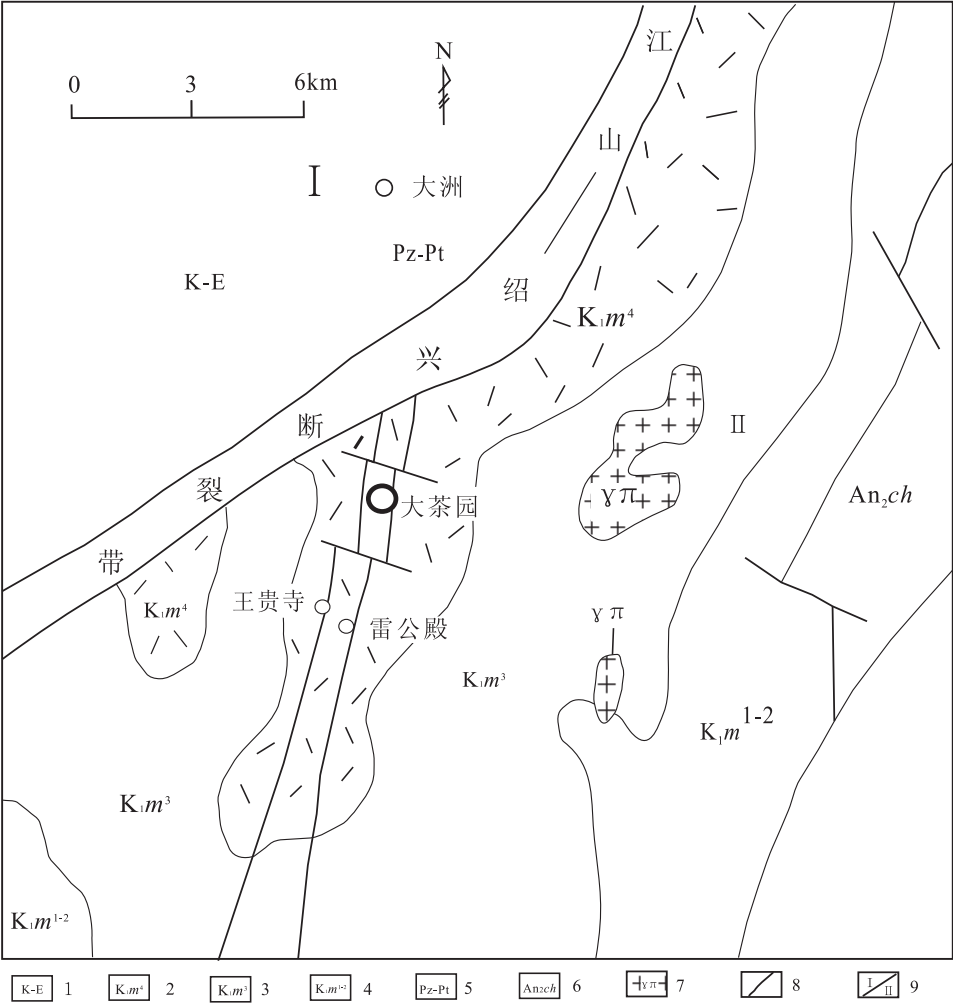
等, 1995)。但矿体定位并不完全受岩性控制, 根据矿床资料统计结果表明(邵飞等, 2008a; 胡茂梅, 2000; 田建吉等, 2010): 赣杭构造带内火山岩、次火山岩、基底变质岩和沉积岩中的铀矿体分别占 57.2%、27.3%、12.3% 和 3.2%。最新的锆石 U-Pb 定年结果表明, 赣杭成矿带含铀火山岩具有十分一致的形成年龄(137~132 Ma), 表明了火山-侵入活动形成于早白垩世, 并且是一次集中且短暂的火山-侵入活动(杨水源等, 2012)。杨水源等(2013)研究发现赣杭成矿带上含铀火山盆地火山岩具有相似的岩石地球化学特征, 岩石均以中酸性为主, 形成于大陆弧后拉张环境中一种富碱、“干的”高温 A 型岩浆, 来自地壳深处已经脱水和麻粒岩化的中元古界变质岩的部分熔融, 并有少量幔源物质的加入。

表 1 赣杭构造火山带典型火山岩型铀矿成矿地质特征表
Tab. 1 The metallogenic features of typical volcanic-type uranium deposits in Gan-hang belt

矿床	构造位置	控矿构造	产出部位	矿物组合	围岩蚀变	成矿年龄
邹家山	相山火山盆地的西部	北东向邹家山-石洞区域性深断裂两侧发育大量次级羽状裂隙	主干断裂破碎带中	矿石矿物: 沥青铀矿、钍铀矿、钍钍石、铀石、含钍铀石和黄铁矿等; 脉石矿物: 水云母、萤石、方解石、磷灰石和石英等	钠长石化、水云母化	铀-赤铁矿型 U-Pb 年龄 139、92Ma(李子颖, 2014) 铀-萤石型 98Ma
巴泉	华东中生代赣杭火山活动岩带西南部的相山塌陷式火山盆地北部	爆发角砾岩筒和密集裂隙带控制	次花岗斑岩爆发角砾岩筒中及其外接触带云母石英片岩中	矿石矿物: 沥青铀矿、钍铀矿、钙铀云母、钼铀云母、黄铁矿、方铅矿等; 脉石矿物: 绿泥石、钠长石、方解石等	钠长石化	方解石流体包裹体 Rb-Sr 年龄 120 Ma (赵永祥, 1995)
横涧	相山火山盆地的北部	盆地的环状断裂和滑覆体面与北北东向陡倾断裂联合控制	次火山岩内外接触带	矿石矿物: 沥青铀矿、黄铁矿、辉钼矿、方铅矿等; 脉石矿物: 水云母、绿泥石、钠长石、萤石等	水云母化、钠长石化为主, 伴随有碳酸盐化、绿泥石化	127 Ma (张万良, 2001)
大茶园	大洲火山断陷盆地北缘	北西西向的张性断裂, 控制了区内的铀矿化	流纹岩顶板相的层间裂隙带中	矿石矿物: 沥青铀矿、铀石、赤铁矿、黄铁矿和方铅矿等; 脉石矿物: 石英、萤石、方解石、水云母等	水云母化、赤铁矿化、硅化、黄铁矿化、萤石化、碳酸盐化	沥青铀矿 U-Pb 年龄为 101~97 Ma(韩效忠等, 2010)
盛源	盛源沉陷式火山盆地的西部	推覆体和地堑推覆体的 NE 向的断裂以及层间破碎带联合控制	上侏罗统打鼓顶组第二段球泡流纹岩的整体层间破碎带中	矿石矿物: 沥青铀矿、铀石、钍铀矿、赤铁矿、黄铁矿等; 脉石矿物: 石英、萤石、磷灰石等	赤铁矿化、萤石化、迪开石化、水云母化、黄铁矿化、碳酸盐化等	沥青铀矿 U-Pb 年龄为 90 Ma(中国铀矿找矿指南)

(2)成矿受基底断裂和盖层断裂及火山构造联合控制。国内外典型矿床研究表明,构造控矿是火山岩型铀矿典型的特征,总体上空矿构造主要由基底断裂、切割火山岩盖层的区域性断裂和火山构造3种类型组成,其中第二种对铀矿有控制作用,为成矿期断裂,矿床定位于断裂复合部位(MATHESON et al. , 1956; CAMERON, 1980; 陈跃辉等 1995; CASTOR et al. , 2000; BURNS, 2004; POWNCEBT et al. , 2014)。赣杭带火山岩铀矿同样具有类似特征,如大洲铀矿田主要受北东向江山-绍兴深断裂带和北北东向雷公殿-大茶园基底断裂控制(毛孟才,2002)(图 2);新路矿田矿化主要受断裂、蚀

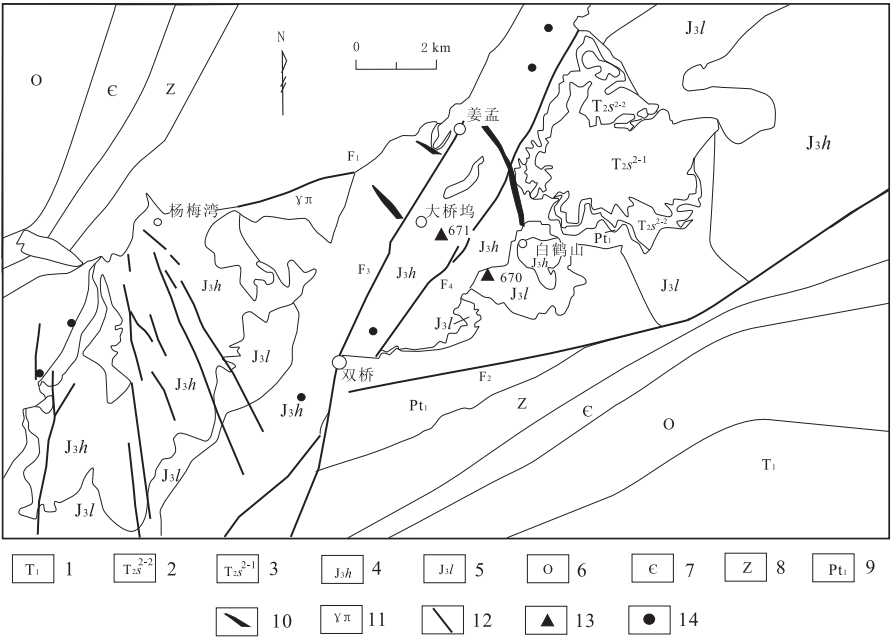
变、花岗斑岩和花岗岩内外接触带联合控制,北东向切层深断裂贯穿全区,主要铀矿体一般产于其附近(韩效忠等,2010)(图 3)。相山盆地铀矿床主要以 2 条矿集带的形式产出(陈贵华等, 1999):一条呈东西向产于矿田的北部,矿床多定位于东西向与北东向构造、环状火山塌陷构造的复合部位,往往赋存于花岗斑岩似斑状花岗岩及其内外接触带中,以沙洲等为代表;另一条呈北东向展布于矿田的西部,矿床往往受北东向构造与东西和近南北向构造及火山塌陷构造的复合控制,矿体形态以脉状为主,次为透镜状或似层状,以邹家山矿床、居隆庵矿床为代表(图 4)。



1. 下第三系—白垩系紫红色砂砾岩;2. 磨石山群四段流纹岩层夹绿色层(赋矿层位);3. 磨石山群三段凝灰岩、熔结凝灰岩夹凝灰质砂岩;4. 磨石山群一、二段凝灰岩、熔结凝灰岩;5. 古生界—元古宙混合岩、变质岩;6. 前震旦系陈蔡群片岩、片麻岩;7. 花岗斑岩;8. 断裂;9. I. 扬子板块,II. 华南板块

图 2 大洲铀矿床地质简图(据毛孟才, 2002)

Fig. 2 Simplified geological map of the Dazhou uranium ore field (After MAO Mengcai, 2002)



1. 上白垩统红色砂砾岩;2. 下白垩统寿昌组上段杂色粉砂岩、页岩;3. 下白垩统寿昌组下段层状流纹质凝灰岩、流纹斑岩;4. 上侏罗统黄尖组火山凝灰岩;5. 上侏罗统劳村组砂砾岩、火山凝灰岩;6. 奥陶系灰岩、泥岩及页岩等;7. 寒武系灰岩、白云岩等;8. 震旦系硅质岩;9. 前震旦系变质结晶基底;10. 脉岩;11. 花岗斑岩;12. 断层;13. 铀矿床;14. 铀矿点;
F₁. 球川-萧山深断裂;F₂. 常山-漓渚大断裂;F₃. 双桥断裂;F₄. 东湾断裂

图 3 衢州新路盆地铀矿地质图(据韩效忠等,2010)

Fig. 3 Geological map of uranium deposits in Xinlu basin, Quzhou area (After HAN Xiaozhong, 2010)

(3)存在 3 种围岩蚀变组合类型且具明显分带性。

矿化蚀变是成矿流体特征的反映,火山岩型铀矿属于热液型铀矿,矿化伴随着强烈的蚀变作用,世界上多数的火山岩铀矿床都会发育赤铁矿化、钠长石化、绿泥石化、绿帘石化为主的碱性蚀变和以水云母化、萤石化、黄铁矿化等为特征的酸性蚀变(BERNING et al., 1976; WILDE et al., 1987; 黄志章, 1999; 李子颖, 1999; CASTOR et al., 2000; ZHANG, et al., 2005; EGLINGER et al., 2013; PPWEREBY et al., 2014)。赣杭带火山岩型铀矿在蚀变期次、矿物组合等存在共性,反映了相似的成矿条件和背景(韩效忠等,2010; 王正其等,2013; 李子颖, 2014)。如相山矿田成矿期蚀变可分为早、晚 2 个阶段。早期阶段以赤铁矿化为主,并伴随有钠长石化、绿泥石化、水云母化和碳酸盐化;晚阶段以萤石化、水云母化、绿泥石化为主,并伴随有碳酸盐化、黄铁矿化,矿后期蚀变主要为碳酸盐化、硅化、萤石化等,呈脉状充填于裂隙之中(李子颖等,2009)。韩效忠等(2010)将大洲铀矿田在空间上分为“三层楼式”:即浅部为与砾岩层和隐爆有关的“白鹤岩式”铀矿化,

中部为与赤铁矿化、萤石化、金属硫化物化有关的“大桥坞式”铀矿化,深部为与钠交代、硅化有关的“杨梅湾式”铀矿化。此外,成矿期蚀变具分带性,蚀变中心一般为萤石化、水云母化及绿泥石化,其旁侧为早阶段赤铁矿化、水云母化、绿泥石化、碳酸盐化,最外侧为成矿前的钠长石化和水云母化。

(4)成矿集中 2 个主要时间段。以往认为赣杭成矿带火山岩型火山岩型铀矿床的成矿年龄一般小于 100 Ma(杜乐天, 1981)。王传文等(1982)根据沥青铀矿 U-Pb 法同位素地质年龄数据,得出相山矿田的成矿年龄在 100~120 Ma。陈繁荣等(1990)获得相山钠交代型和萤石-水云母型矿化沥青铀矿 U-Pb 年龄分别为 115.2 Ma 和 97.6 Ma;陈迪云等(1993)对相山钠长石化花岗斑岩 Rb-Sr 等时线定年,认为第一次成矿在钠长石化之后,约为 120 Ma,第二期成矿为 100 Ma 左右。新的研究显示,赣杭成矿带火山岩型铀矿成矿作用是一个长期持续的过程,并相对集中于 2 个时间段(李子颖等,2014)。笔者统计了相山发表或出版的年龄数据(在统计过程中剔除了部分大于围岩年龄的数据)(图 5),可以看

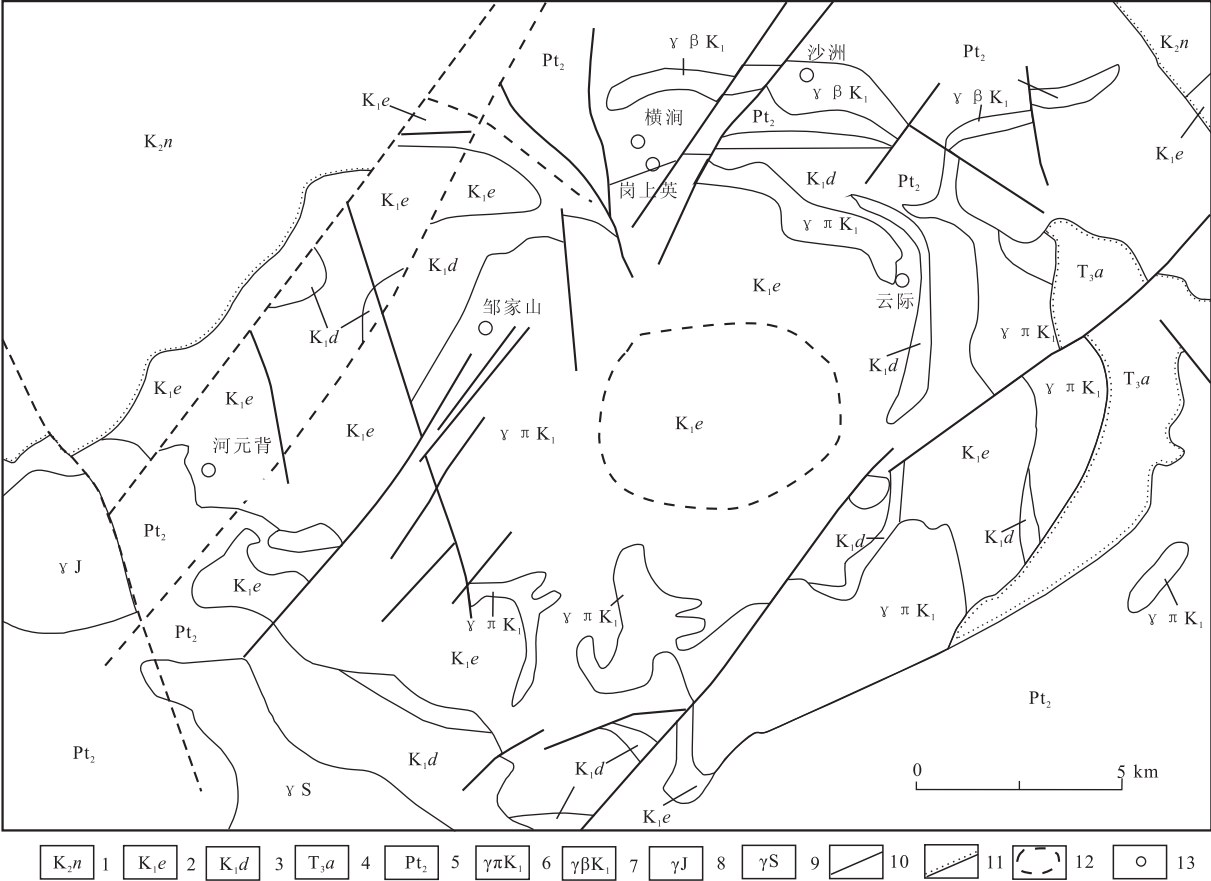


图 4 相山火山盆地地质简图(根据邵飞,2012)

Fig. 4 Geological Sketch map of Xiangshan uranium ore-field(After SHAO Fei, 2012)

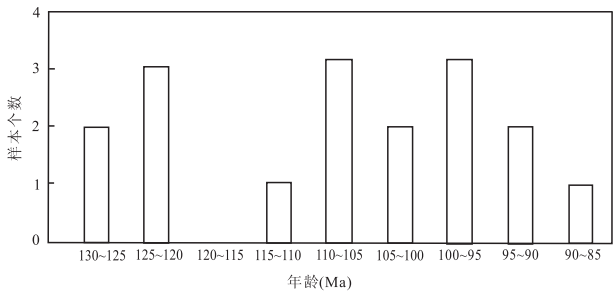


图 5 相山矿田成矿年龄直方图

Fig. 5 Histogram of mineralization ages in Xiangshan ore field

出年龄集中于 135~120 Ma 和 90~110 Ma 2 个时间段,其中碱交代型铀矿化年龄为 128~115 Ma,萤石-水云母型铀矿化年龄为 104~98 Ma,这代表了相山成矿作用集中于 2 个时间段。韩效忠等(2010)

研究大洲火山盆地时提出主成矿期分为 2 个时间段,早期为 125~115 Ma,晚期为 100.9~90.2 Ma。归结来讲,赣杭火山岩带铀矿成矿集中于 135~120 Ma 和 100~70 Ma 2 个时间段,前者与火山侵入时期一致,后者与燕山期第二期基性岩浆作用时间一致(齐有强等,2011)。

3 矿床成矿机制问题探讨

3.1 成矿物质来源

对铀矿床成矿流体中铀的来源问题,大量的研究认为赣杭带火山盆地基底具有高的铀背景值,基底部分熔融作用为铀的预富集成矿提供物质前提(章邦桐和胡恭任, 1997; 邱爱金, 1999)。因此,多数学者认为围岩提供了铀源(陈迪云等,1993;),但

这与蚀变赋矿围岩比正常未蚀变岩石有更高的铀含量的事实相矛盾(李子颖等,2009)。研究显示,相山铀矿田内与沥青铀矿共生的磷灰石内含有大量地幔物质,紫色萤石 Sr、S、He、Ar 同位素也具有类似特征,同时矿化有关萤石同位素特征具有幔源特征,且成矿时代上与矿田内发育的基性岩脉的成岩年龄相近、碳源来自于上地幔。因此,有学者认为存在地幔提供物源(张国全等,2010;李子颖,2014)的可能性。

3.2 成矿流体来源

研究表明,许多矿床成矿流体与成矿物质并非同源(ÖZEN et al., 2015; ZHOU et al., 2015; 张艳等,2016)。早期发现的火山岩型铀矿床主要为硅化带、硅质脉类型,成矿年龄 <100 Ma,成矿温度 <200 °C,存在明显的成岩成矿时差,成矿热水溶液的水源可能主要为大气降水(周文斌,1997),或者处于典型大气降水和岩浆水氧同位素值之间,成矿早期岩浆水占有一定的比例,但到了成矿期和成矿晚期成矿溶液则主要是大气降水,矿化流体为大气降水与岩浆水混合成因(范洪海等,2001)。但是矿床围岩与矿床时差高达 20~70 Ma(通常大于 50 Ma),可排除赋矿火山岩的酸性岩浆提供水的可能性。随着研究深入,发现存在中高温、中高盐度的还原性流体,富含成矿物质及挥发分(CO_2 、 H_2 、 CH_4 等),其成分以 C、H、O、N 等为主,并溶有多种碱金属、P 及卤素(F、Cl)等微量组分,成矿流体具有深源性的特点(李子颖等,2006)。成矿期脉石的稳定同位素特征也表明,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(邓平等,2003),区火山岩型铀矿中的 $\delta^{13}\text{C}$ 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(姜耀辉等,2004)。幔源深部流体参与本区热液铀形成也被相山矿田 $^3\text{He}/^4\text{He}$ $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素证据所证实(HU et al., 2009; 严冰等,2014)。测试结果显示,碱交代型铀矿化时成矿流体的压力值约为 5×10^7 Pa、成矿温度约为 200 °C、盐度为 18.36%~31.03% NaCleqv;萤石-水云母型铀矿化成矿流体压力值约为 2×10^7 Pa,成矿温度约为 150 °C,盐度为 21.57%~22.09% NaCleqv(孙占学,2004;李子颖等,2006;王蕾,2011);另外,熊欣等(2014)研究砖桥科学深钻发现 339~548 °C, 10.53%~41.04% NaCleqv 的高温、高盐度流体与 133°C、5.16% NaCleqv 低温低盐度流体,并发现高

温的铀钍矿化,进一步证实两种流体及多种成矿作用的存在。

3.3 成矿流体中铀的迁移形式

研究表明赣杭构造带内火山岩铀矿铀存在类质同像铀、显微或超显微粒状铀矿物、吸附铀、包裹体中的铀、简单铀氧化物,即晶质铀矿、含钍晶质铀矿等 5 类(胡瑞忠等,1993;姜耀辉等,2004;张玉燕等,2012)。对于铀的存在形式,李子颖等(2014)采用无机有机杂化铀(U^{4+})配合物流体稳定性模拟实验及相山大量地质研究工作后,认为成矿流体为高温高压的还原流体,其中 U 是以 +4 价杂化配合物存在,U 的卸载主要由于温压降低配合物的分解作用导致。

3.4 成矿模式

长期以来,国内外地质学家对这条带上铀矿床成因机制及成矿模式开展了较多的研究工作(李子颖等,1999;MIN et al., 2005;LIN et al., 2006;邵飞等,2008b;FAYEK et al., 2011)。成矿构造背景上,这些火山盆地的形成与华南白垩纪的地壳拉张有关(胡瑞忠等,2004);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。大规模铀成矿作用是一种典型的非造山或岩石圈伸展环境中的矿化,主要由于白垩纪或晚中生代以来的岩浆活动主要以 A 型花岗岩、高钾 I 型花岗岩、双峰式火山岩和板内基性脉岩的广泛发育为特征,被广泛认为是岩石圈伸展作用的产物(徐夕生等,2005);华南晚中生代以来形成了一系列北东—北北东向的断陷盆地。地质、地球物理和地球化学研究一致表明,这些断陷盆地是中生代岩石圈伸展作用的产物(邱爱金,2001;华仁民等,2003)。但高温的铀矿化、流体包裹体中地幔组分的发现、稀有气体同位素、以及基性脉岩地球化学特征等研究结果表明,华南地区中生代铀矿的成矿作用及岩浆活动与地幔柱构造有关的热点活动有关(李子颖等,1999;李子颖,2006;HU et al., 2009;王正其等,2013)。但是,对于华南中生代大规模的铀矿成矿作用尚未完全研究清楚,中生代的伸展动力学机制存在诸多问题,而且铀矿中高-中低温、高-中低盐度、大气降水和地幔深部流体的共存机制及其对铀成矿的作用也尚未明白,需要进一步开展研究工作。

4 结语

(1)赣杭构造带内火山岩型热液铀成矿是一个中生代构造-岩浆-流体持续作用、并在有利的空间成矿的过程。

(2)赣杭构造带分布的火山岩型铀矿含矿火山岩具有相似的地球化学特征,且在矿床的控矿特征、围岩蚀变和成矿时代等方面有诸多共同特征,为探讨区域内铀矿成因提供了重要依据。

(3)铀成矿流体主要为深源高温、高压、中高盐度且富含挥发分的还原性流体,晚期有大气降水加入,成矿物质并非来自围岩,更可能为富铀变质基底和深部的岩浆房体系或者富集地幔多来源。

(4)成矿期铀可能主要以正四价杂化配合物形式运移,铀的卸载主要由于温压降低配合物的分解作用导致。

(5)赣杭构造带内的火山盆地形成于中生代岩石圈伸展作用背景,铀矿的形成可能为大陆热点作用晚期的产物。

参考文献(References):

陈爱群. 浙江大桥坞斑岩体“双层结构”与铀矿化[J]. 华东地质学院学报, 1997, 14(04): 20-28.

CHEN Aiqun. Two-layer Structure of The Porphyry Massif and its Relation to Uranium Mineralization in Daqiaowu, Zhejiang Province[J]. Journal of East China College of Geology, 1997, 14(04): 20-28.

陈迪云, 周文斌, 周鲁民, 等. 相山铀矿田同位素地质学特征[J]. 矿床地质, 1993, 17(04): 370-377.

CHEN Diyun, ZHOU Wenbin, ZHOU Lumin, et al. Isotope Geology of the Xiangshan Uranium Ore-Field[J]. Mineral Deposits, 1993, 17(04): 370-377.

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, 32(02): 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, 32(02): 139-145.

韩效忠, 刘蓉蓉, 刘权, 等. 浙江省衢州地区新路火山岩盆地西段铀成矿模式[J]. 矿床地质, 2010, 5(02): 332-342.

HAN Xiaozhong, LIU Rongrong, LIU Quan, et al. Uranium Metallogenetic Model for West Segment of Xinlu Volcanic Basin in Quzhou area, Zhejiang Province[J]. Mineral Deposits, 2010, 5(02): 332-342.

胡瑞忠, 毕献武, 苏文超, 等. 华南白垩—第三纪地壳拉张与铀成矿的关系[J]. 地学前缘, 2004, 20(01): 153-160.

HU Ruizhong, BI Xianwu, SU Wenchao, et al. The Relationship between Uranium Metallogenesis and Crustal Extension during the Cretaceous-Tertiary in South China[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 20(01): 153-160.

华仁民, 陈培荣, 张文兰, 等. 华南中、新生代与花岗岩类有关的成矿系统[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2003, 14(04): 335-343.

HUA Renmin, CHEN Peirong, ZHANG Wenlan, et al. Mesozoic-Cenozoic Granite related Metallogenetic System in south China[J]. Chinese Science(D series: Earth Sciences), 2003, 14(04): 335-343.

黄志章. 热液铀矿床蚀变场及蚀变类型[M]. 北京: 原子能出版社, 1999.

HUANG Zhizhang. Hydrothermal Uranium Deposit Alteration and Alteration Type [M]. Beijing: Atomic Press, 1999.

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. The Mantle Fluid and Uranium Mineralization[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(2): 491-499.

李子颖. 华南热点铀成矿作用[J]. 铀矿地质, 2006, 22(2): 65-69.

LI Ziyang. Hostspot Uranium Metallogenesis in South China [J]. Uranium Geology, 2006, 22(2): 65-69.

李子颖. 相山火成岩与铀成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 2014.

LI Ziyang. Igneous Rock and Uranium Mineralization of Xiangshan Ore Field [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.

李子颖, 黄志章, 李秀珍. 相山矿田铀深源成矿流体研究[R]. 北京: 核工业北京地质研究院, 2006.

LI Ziyang, HUANG Zhizhang, LI Xiuzhen. The Research of Deep-sourced Uranium Ore-forming Fluid of Xiangshan Ore Deposit [R]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology, 2006.

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, 5(01): 10-18, 35.

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, 5(01): 10-18-35.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境[J]. *高校地质学报*, 2008, 14(4): 510-526.
- MAO Jingwen, XIE Guiqing, GUO Chunli, et al. Mesozoic major Metallic Ore Deposits Distribution and Metallogenic Environment in South China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2008, 14(4): 510-526.
- 毛孟才. 赣杭铀成矿带大洲矿田定位条件分析及富大铀矿寻找[J]. *地质找矿论丛*, 2002, 32(03): 164-168.
- MAO Mengcai. Analysis of Emplacement Condition of Dazhou, Uranium Ore Field, Ganhang Ore Belt and the Prospecting Direction of Rich and Large Size Uranium Ore Deposit Here[J]. *Geological Prospecting Review*, 2002, 32(03): 164-168.
- 齐有强, 胡瑞忠, 刘燊, 等. 赣杭构造带金衢盆地燕山期基性脉岩地球化学特征及成因探讨[J]. *地质学报*, 2011, 18(03): 354-365.
- QI Youqiang, HU Ruizhong, LIU Yan, et al. Geochemical Characteristics of the Yanshanian Mafic Dykes in the Jinqu Basin, Gan-Hang Tectonic Belt and Its Petrogenesis[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 18(03): 354-365.
- 邱爱金. 江西相山构造岩浆演化与富大铀矿形成[J]. *地质论评*, 1999, 45(2): 761-762.
- QIU Aijin. The Relationship between Tectonic Magmatic Evolution and Rich Large Uranium Ore Formation[J]. *Geological Review*, 1999, 45(2): 761-762.
- 邵飞, 陈晓明, 徐恒力, 等. 江西省相山铀矿田成矿模式探讨[J]. *地质力学学报*, 2008a, 32(1): 65-73.
- SHAO Fei, CHEN Xiaoming, XU Hengli, et al. A Discussion on Metallogenic Model of Xiangshan Uranium Ore-Field, Jiangxi Province[J]. *Journal of Geomechanics*, 2008a, 32(1): 65-73.
- 邵飞, 陈晓明, 徐恒力, 等. 相山铀矿田成矿物质来源探讨[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2008b, 31(01): 39-44, 80.
- SHAO Fei, CHEN Xiaoming, XU Hengli, et al. Study on Metallogenic Material Source of Xiangshan Uranium Ore-Field[J]. *Journal of East China Institute of Technology(Natural Science Edition)*, 2008b, 31(01): 39-44, 80.
- 田建吉, 胡瑞忠, 苏文超, 等. 661 铀矿床矿石 U-Pb 等时线年龄及其成矿构造背景[J]. *矿床地质*, 2010, 28(03): 452-460.
- TIAN Jianji, HU Ruizhong, SU Wenchao, et al. Ore U-Pb Isochron Ages and Metallogenic Tectonic Setting of No. 661 Uranium Deposit[J]. *Mineral Deposits*, 2010, 28(03): 452-460.
- 王正其, 李子颖, 汤江伟. 浙西新路盆地火山岩型铀成矿的深部动力学机制[J]. *地质学报*, 2013, 26(05): 703-714.
- WANG Zhenqi, LI Ziyang, TANG Jiangwei. Deep Geodynamic Mechanism of the Volcanic-Type Uranium Mineralization in Xinlu Basin, Western Zhejiang Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 26(05): 703-714.
- 熊欣, 徐文艺, 杨竹森, 等. 庐枞盆地高温铀钍矿化特征、成因及其找矿意义——来自砖桥科学深钻 ZK01 的证据[J]. *岩石学报*, 2014, 38(04): 1017-1030.
- XIONG Xin, XU Wenyi, YANG Zhusen, et al. Characteristics and Genesis of Hypothermal Uranium and Thorium Mineralization in Luzong Basin: Evidence from the Scientific Drilling ZK01 at Zhuanqiao[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 38(04): 1017-1030.
- 徐夕生, 谢昕. 中国东南部晚中生代—新生代玄武岩与壳幔作用[J]. *高校地质学报*, 2005, 23(03): 318-334.
- XU Xisheng, XIE Xi. The Cenozoic Basalt and Crust-Mantle Action in Late Mesozoic in Southeast China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2005, 23(03): 318-334.
- 严冰, 严寒, 魏文凤, 等. 江西相山沙洲铀矿床 He, Ar 同位素特征及其地质意义[J]. *地质论评*, 2014, 12(3): 1-15.
- YAN Bing, YAN Han, WEI Wenfeng, et al. Helium-Argon Isotopic Characters and Geological Significance of the Shazhou Uranium Deposit, Xiangshan Ore field, Jiangxi Province[J]. *Geological Review*, 2014, 12(3): 1-15.
- 杨水源, 蒋少涌, 赵葵东, 等. 江西相山铀矿田邹家山矿床中流纹斑岩的锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学与 Sr-Nd-Hf 同位素组成[J]. *岩石学报*, 2012, 46(12): 3915-3928.
- YANG Shuiyuan, JIANG Shaoyong, ZHAO Kuidong, et al. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Sr-Nd-Hf Isotopic Compositions of the Rhyolite Porphyry from the Zoujiaoshan Deposit in Xiangshan Uranium Ore Field, Jiangxi Province, SE China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 46(12): 3915-3928.
- 杨水源, 蒋少涌, 赵葵东, 等. 江西相山铀矿田如意亭剖面火山岩的年代学格架及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2013, 42(12): 4362-4372.
- YANG Shuiyuan, JIANG Shaoyong, ZHAO Kuidong, et al. Timing and Geological Implication of Volcanic Rocks from the Ruyiting Section, Xiangshan Uranium Ore Field, Jiangxi Province, SE China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 42(12): 4362-4372.

- 余心起, 吴淦国, 舒良树, 等. 白垩纪时期赣杭构造带的伸展作用[J]. 地学前缘, 2006, 12(03): 31-43.
- YU Xinqi, WU Ganguo, SHU Liangshu, et al. The Extension of Ganhang Tectonic belt in the Cretaceous Period [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 12(03): 31-43.
- 张艳, 韩润生, 魏平堂. 碳酸盐岩型铅锌矿床成矿流体中铅锌元素运移与沉淀机制研究综述[J]. 地质论评, 2016, 62(1): 187-201.
- ZHANG Yan, HAN Runsheng, WEI Pingtang. Research over View on the Migration and Precipitation Mechanisms of Lead and Zinc in Ore Forming Fluid System for Carbonate Hosted Lead-Zinc Deposit [J]. Geological Review, 2016, 62(1): 187-201.
- 张玉燕, 李子颖, 黄志章, 等. 江西相山沙洲矿床铀的存在形式和迁移特征探讨: 来自诱发裂变径迹的证据[J]. 高校地质学报, 2012, 18(4): 639-646.
- ZHANG Yuyan, LI Ziyang, HUANG Zhizhang, et al. A Study on Existing Forms and Migration Process of Uranium at Shazhou Deposit, Jiangxi Province, China: Evidences from Induced Fission Tracks [J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(4): 639-646.
- 周文斌, 饶冰. 相山铀矿田水-岩氢、氧同位素交换的实验研究[J]. 地质论评, 1997, 18(03): 322-327.
- ZHOU Wenbin, RAO Bing. Experimental Study of Water-rock Hydrogen and Oxygen Isotope Exchange in Xiangshan Uranium Ore-field [J]. Geological Review, 1997, 18(03): 322-327.
- LIN, G, ZHOU, Y, WEI X, ZHAO, C. Structural controls on fluid flow and related mineralization in the Xiangshan uranium deposit, Southern China [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2006, 89(1-3): 231-234.
- HU, RZ, BURNARD, PG, Bi, XW, ZHOU, et al. Mantle-derived gaseous components in ore-forming fluids of the Xiangshan uranium deposit, Jiangxi province, China: Evidence from He, Ar and C isotopes [J]. Chemical Geology, 2009, 266(1-2): 86-95.
- FAYEK, M, HPRITA, J, RIPLEY, EM. The oxygen isotopic composition of uranium minerals: A review [J]. Ore Geology Reviews, 2011, 41(1): 1-21.
- EGLINGER, A, ANSRE-MAYER, AS, Vanderhaeghe, O, et al. Geochemical signatures of uranium oxides in the Lufilian belt: From unconformity-related to syn-metamorphic uranium deposits during the Pan-African orogenic cycle [J]. Ore Geology Reviews, 2013, 54(0): 197-213.
- MIN, MZ, LUO, XZ, DU GS, et al. Mineralogical and geochemical constraints on the genesis of the granite-hosted Huangao uranium deposit, SE China [J]. Ore Geology Reviews, 1999, 14(2): 105-127.
- MIN, M, FANG, C, FAYEK, M. Petrography and genetic history of coffinite and uraninite from the Liueyiqi granite-hosted uranium deposit, SE China [J]. Ore Geology Reviews, 2005, 26(3-4): 187-197.
- CAMERON, EM. Geochemical exploration for uranium in northern lakes [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1980, 13(2-3): 221-50.
- BERNING J, COOKER, HIEMSTRA, SA, et al. The Roessing uranium deposit, South West Africa [J]. Economic Geology, 1976, 71(1): 351-68. 1-40.
- GILDER, SA, GILL, J, COE, RS, et al. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1996, 101(B7): 16137-54.
- JIANG, Y, LING, H, JIANG, S, SHEN, et al. Trace element and Sr-Nd isotope geochemistry of fluorite from the Xiangshan uranium deposit [J]. Southeast China. Economic Geology, 2006, 101(8): 1613-22.
- MATHESON, RS, SEARL, RA, et al. Mary Kathleen uranium deposit, Mount Isa-Cloncurry District, Queensland, Australia [J]. Economic Geology, 1956, 51(6): 528-540.
- MIN, MZ, LUO, XZ, MAO, SL, et al. The Saqisan Mine a paleokarst uranium deposit, South China [J]. Ore Geology Reviews, 2002, 19(1-2): 79-93.
- CASTOR, SB, HENRY, CD. Geology, geochemistry, and origin of volcanic rock-hosted uranium deposits in northwestern Nevada and southeastern Oregon, USA [J]. Ore Geology Reviews, 2000, 16(1-2):
- ZHANG, W, Li, Z. Metallogenic time-space evolution of the Xiangshan Uranium ore field in China [J]. Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge. Springer, pp. 2005, 339-341.
- POWNCESBY, MI, JOHNSON, C. Geometallurgy of Australian uranium deposits [J]. Ore Geology Reviews, 2014, 56(0): 25-44.
- WILDE, AR, WALL, VJ. Geology of the Nabarlek uranium deposit, Northern Territory, Australia [J]. Economic Geology, 1987, 82(5): 1152-1168.
- ZHOU, JX, BAI, JH, HUANG, ZL, et al. Geology, isotope geochemistry and geochronology of the Jinshachang carbonate-hosted Pb-Zn deposit, southwest China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 98(0): 272-284.
- ÖZEN, Y, ARIK, FS. O and Pb isotopic evidence on the origin of the İnkaya (Simav-Kütahya) Cu-Pb-Zn-(Ag) Prospect, NW Turkey [J]. Ore Geology Reviews, 2015, 70(0): 262-280.