

661 铀矿床矿石 U-Pb 等时线年龄及其成矿构造背景*

田建吉^{1,2}, 胡瑞忠^{1**}, 苏文超¹, 张国全^{1,2}, 商朋强^{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, 贵州 贵阳 550002; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要 661 铀矿床位于赣杭构造火山岩铀成矿带东段大洲铀矿田内, 矿体赋存于磨石山群九里坪组流纹岩之中, 矿床定位于岩石圈伸展断陷盆地附近, 明显受断裂带的控制。利用矿石 U-Pb 等时线法确定了该矿床两个矿体的成矿时代, 分别为 (107.0 ± 2.3) Ma 和 (110.0 ± 3.5) Ma。这些年龄值与断陷红盆地底部发育的玄武岩的成岩年龄一致, 也与东南沿海地区明显存在的 110 Ma 基性脉岩拉张活动的时间一致, 表明岩石圈伸展与铀成矿之间具有良好的对应关系, 为岩石圈伸展期与铀成矿关系研究提供了年代学证据。岩石圈伸展控制着富 CO_2 热液形成的时间, 因而也大致控制了铀成矿的时代。

关键词 地质学; 赣杭构造带; 火山岩型铀矿床; U-Pb 等时线年龄; 661 铀矿床

中图分类号: P619.14

文献标志码: A

Ore U-Pb isochron ages and metallogenic tectonic setting of No. 661 uranium deposit

TIAN JianJi^{1,2}, HU RuiZhong¹, SU WenChao¹, ZHANG GuoQuan^{1,2} and SHANG PengQiang^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China; 2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract

The No. 661 uranium deposit of the Dazhou uranium orefield is located in the Gan-Hang tectonic volcanics-hosted uranium belt, with the ore bodies existent in Jiuliping Formation rhyolite of Moshishan Group. Two U-Pb isochron ages obtained for ores from two ore bodies are (107.4 ± 2.3) Ma and (110.0 ± 3.5) Ma, respectively. These ages are consistent with ore-forming ages of the other uranium deposits in the Gan-Hang metallogenic belt and the ages of basalts or dikes at the bottom of the basins that host the ore deposits, indicating the existence of good correlation between the lithospheric extension and the uranium mineralization. This paper provides chronologic evidence for uranium metallogenesis during the lithospheric extension. Lithospheric extension controlled the injection of mantle-derived components into hydrothermal fluids and the formation of CO_2 -rich hydrothermal fluids, and hence basically controlled the uranium mineralization age.

Key words: geology, Gan-Hang tectonic belt, volcanics-hosted uranium deposit, U-Pb isochron age, No. 661 uranium deposit

* 本文得到国家重点基础研究发展规划项目(2007CB411408)、国家自然科学基金资助项目(40634020, 40672067)资助

第一作者简介 田建吉, 男, 1981 年生, 博士研究生, 从事矿床地球化学研究。Email: tianjj81@sina.com

** 通讯作者 胡瑞忠, 男, 1958 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 从事矿床学和地球化学研究。Tel: +86-851-5891962, Email: huiruizhong@vip.gyg.ac.cn

收稿日期 2009-10-23; 改回日期 2009-12-26。张绮玲编辑。

成矿时代厘定是矿床学研究的主要问题之一, 对了解矿床成因及其成矿动力学背景至关重要。就华南地区的大部分铀矿床而言, 一般采用沥青铀矿 U-Th-Pb 法来确定成矿的时代。单个沥青铀矿的 U-Th-Pb 同位素表观年龄, 经常出现在同一矿床的不同部位或在同一矿床的同一矿带的不同样品中, 但表面年龄很不一致(林祥铿, 1990), 甚至出现部分矿床样品得出的矿化年龄大于赋矿火山岩时代的矛盾, 给铀成矿年龄的精度带来了某种程度的不确定性, 也为精确厘定华南白垩纪—第三纪岩石圈伸展和铀成矿的准确期次及其空间迁移规律带来了困难(胡瑞忠等, 2007)。采用等时线法不需要考虑初始铅扣除带来的不确定因素, 借助线性回归在一定程度上可以调整测试误差, 并可发现由于样品发生后生变化所造成的不适合等时线回归的所谓模式误差(李耀崧, 1982)。不少学者相继利用沥青铀矿等时线法研究过中国部分铀矿床, 并取得较好的年龄结果(李耀崧等, 1980; 1984; 李耀崧, 1982; 1989; 张祖还等, 1984; 沈渭洲等, 1988; 林祥铿, 1990; 邓平等, 2003)。

赣杭构造火山岩铀成矿带是中国最重要的火山岩型铀矿产区, 目前在该带中已发现包括大洲铀矿田在内的三大铀矿田和众多铀矿床。661 矿床位于该带东段浙江省大洲铀矿田内, 是中国发现最早、产在流纹岩中的典型火山岩型矿床之一(章邦桐等, 1992)。近年来, 不少学者对华南地区的一些典型的大型铀矿床进行了成矿年代学的研究(李耀崧等, 1984; 李耀崧, 1989; 陈繁荣等, 1990; 林祥铿, 1990; 邓平等, 2003; 吴烈勤等, 2003; 朱捌等, 2006)。这些研究主要集中在相山、下庄等富铀矿田或矿床, 而大洲铀矿田的几个矿床一直缺乏精确的成矿年代学数据, 已有的个别数据基本上是以单个样品进行的 U-Th-Pb 同位素表观年龄, 部分矿床的样品甚至出现了矿化年龄大于赋矿火山岩年龄的现象, 矿床的成矿年龄数据可靠性较差。661 铀矿床的矿石品位较低, 沥青铀矿以显微、超显微球粒状分布, 粒度较小, 沥青铀矿单矿物的精选比较困难, 因此, 本次研究以矿石 U-Pb 等时线法对 661 铀矿床进行年代学研究, 精确厘定该区铀矿床成矿作用的时限, 并与区域上其他火山岩型铀矿床进行对比, 初步探讨其成矿地球动力学背景。

1 矿床地质特征

661 矿床位于赣杭构造火山岩铀成矿带东段大

洲-芙蓉山铀成矿亚带大洲火山断陷盆地北缘的大洲铀矿田内。矿田定位于江山-绍兴断裂带和北北东向雷公殿-大茶园基底断裂的复合部位(图 1)。江山-绍兴深断裂是中国东部一条非常重要的两个一级大地构造单元的分界线, 其北区属扬子地台, 南区属华南加里东褶皱系。

矿床构造较为简单, 总体是由一个火山旋回组成的单斜层, 被许多北西西向断层所切割, 自北向南呈阶梯状陷落。矿区内出露地层主要是前寒武系基底陈蔡群黑云母石英片岩、绢云母片岩、角闪斜长片岩。火山岩地层为下白垩统磨石山群茶湾组和九里坪组火山碎屑岩及熔岩。含矿层为九里坪组第一、二、三层流纹岩, 其中以第三层流纹岩中矿体最多。矿体明显受层位和岩性控制。铀矿化分布于流纹岩层顶部相和中间相, 在上覆绿色层底板 0~12 m 范围内。矿体产状与绿色层或流纹岩顶板一致。矿体呈平缓的层状、似层状、透镜状产出, 规模较大。在北北东向断层与北西西向断层交叉处, 常见矿化富集部位, 其矿体呈巢状、瘤状产出, 一般规模较小。

矿石呈浸染状、细脉浸染状、网脉状和角砾状构造, 铀以单矿物及吸附分散状态存在。铀矿物有沥青铀矿、铀黑等。沥青铀矿呈显微、超显微粒状、球粒状。伴生金属矿物主要有黄铁矿、赤铁矿, 还有极少量方铅矿、闪锌矿、辉钼矿等。脉石矿物主要有玉髓、萤石和方解石。围岩蚀变在区域上以水云母化为其特征, 形成可作为找矿标志的绿色层。近矿围岩蚀变有赤铁矿化、硅化、黄铁矿化、萤石化、迪开石化、水云母化及碳酸盐化, 其中, 赤铁矿化、硅化和萤石化与矿化关系最密切。

2 样品的采集与测试

本次用于 U-Pb 同位素定年的 12 件样品均采自 661 铀矿床第三层流纹岩矿体中。矿石类型为赤铁矿型矿石, 为本矿床的主要矿石类型。样品采自井下采场新鲜掌子面, 并在采集过程中利用简易 γ 仪进行简单测定, 以采集不同铀含量样品。其中样品 661-54~661-62 采自 5 号矿体 30 m 中段 1 号采场(335-1), 其余采自 8 号矿体, 661-63~661-66 采自 -138-2 采场, 661-67 和 661-68 采自 -138-3 采场。将所有矿石样品碎至 200 目以下, 进行 U、Pb 和同位素测试。样品的 U、Pb 含量和同位素比值测定在核工业北京地质研究院 GV 公司 ISOPROBE-T 型热电

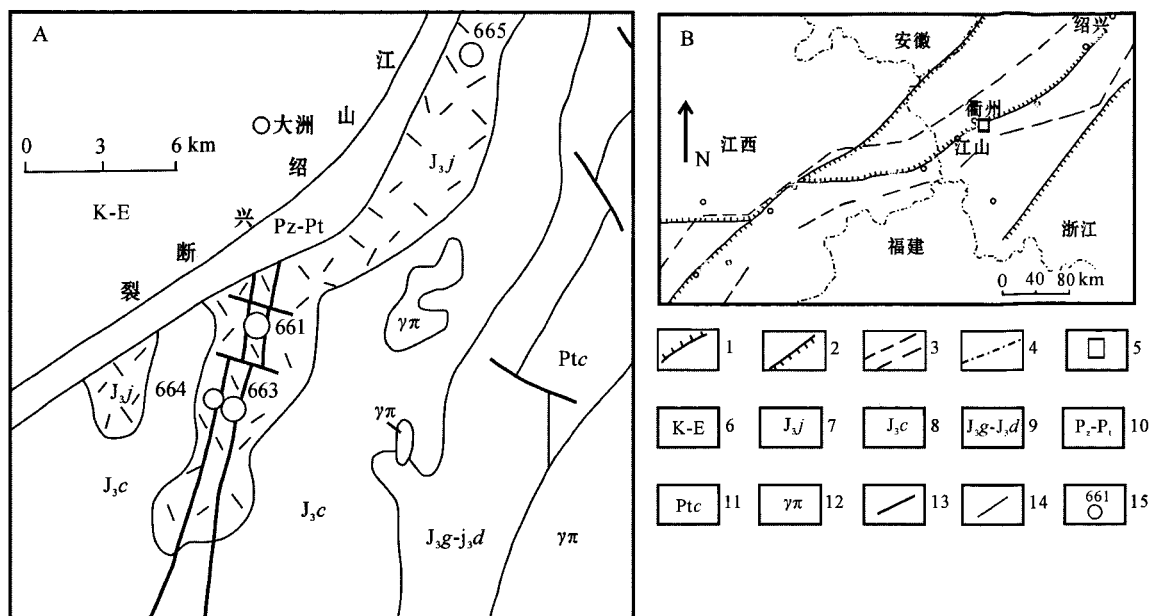


图 1 661 矿床区域地质略图(A)及研究区大地构造位置略图(B)(据张星蒲,1999 和毛孟才,2004 修改)

1—一级大地构造单元界线;2—二级构造单元界线;3—赣杭构造带范围;4—省界线;5—工作区范围;6—晚白垩世—第三纪红盆地层;7—九里坪组流纹岩;8—茶湾组凝灰岩、熔结凝灰岩夹凝灰质砂岩;9—高坞组和大爽组凝灰岩、熔结凝灰岩;10—古生界-元古界混合岩、变质岩;11—前寒武系陈蔡群变质岩;12—花岗岩斑岩;13—断层;14—地层界线;15—矿床及编号

Fig. 1 Geological sketch map of the No. 661 uranium ore deposit(A) and tectonic location of the district(B)
(modified after Zhang, 1999; Mao, 2004)

1—First tectonic unit boundary; 2—Second tectonic unit boundary; 3—Gan-Hang tectonic unit boundary; 4—Province boundary; 5—Study area; 6—Late Cretaceous-Tertiary red basin strata; 7—Rhyolite of Jiuliping Formation; 8—Chawan Formation: tuff, ignimbrite intercalated with tuffaceous sandstone; 9—Tuff and ignimbrite of Gaowu Formation and Dashuang Formation; 10—Paleozoic-Preterozoic migmatite and metamorphic rocks; 11—Metamorphic rocks of Precambrian Chencai Group; 12—Granite porphyry; 13—Fault; 14—Geological boundary; 15—Ore deposit and its number

离质谱仪上完成,对 $1 \mu\text{g}$ 的 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 测量精度优于 0.005% 。

3 结果分析

661 铀矿床两个矿体矿石样品 U、Pb 含量及其同位素组成测定结果见表 1。从中可知,矿石中 U 的含量为 $0.024 \sim 1.390\%$ 。两个矿体样品的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值变化较小,5 号矿体 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 $37.992 \sim 38.914$, 平均 38.645 ; 8 号矿体 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 $38.663 \sim 38.882$, 平均 38.759 , 显示其 Th 含量比较稳定。 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值变化也较小,而 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值变化较大。在 U-Pb 等时线年龄计算中,考虑到 ^{238}U 和 ^{235}U 的相对丰度和半衰期存在差异,导致沥青铀矿中放射性成因 ^{207}Pb 的丰度约为放射性成因 ^{206}Pb 的 $1/20$, 造成前者的测量精度较差。鉴于本文所涉及的具体对象是富铀样品,形成时代较新,再考虑实

验误差尽量小些,因此采用 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 等时线年龄来代表铀矿的形成年龄(李耀松,1982; Compston et al., 1992)。等时线年龄采用 Isoplot 程序计算(Ludwig,1998;2003)。

5 号矿体的 6 个样品在 U-Pb 等时线图上构成很好的线性关系(图 2A),利用 Isoplot 软件计算得出的等时线年龄为 $(110.0 \pm 3.5) \text{ Ma}$, $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$ 初始值为 (21.49 ± 0.53) , MSWD(加权平均偏差) = 1.4。6 个样品点在等时线上均匀分布,等时线具有较低的 MSWD 值和年龄值误差,线性关系较良好,所得的年龄值可信度高。

8 号矿体的 6 个样品等时线线性关系较差,2 个数据点分列等时线上下两侧,去掉这 2 个点以其余 4 个点做图,则有很好的线性关系(图 2B、2C),利用 Isoplot 软件计算得出的等时线年龄为 $(107.4 \pm 2.3) \text{ Ma}$, $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$ 初始值 = (21.38 ± 0.20) , MSWD = 1.14。4 个样品点在等时线上均匀分布,等时线具

表 1 661 铀矿床矿石 U-Pb 同位素地质年龄测定数据

Table 1 U-Pb isotopic data of ores from the No. 661 uranium deposit

样号	矿体	$w(\text{U})/\%$	$w(\text{Pb})/(\mu\text{g/g})$	$^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
661-54	5 号 矿体	0.329	106	3987.0	38.786	19.199	90.498
661-55		0.031	53.4	429.4	38.737	16.021	28.861
661-56		0.360	156	2193.8	37.992	17.400	57.135
661-58		0.280	92.8	3814.1	38.643	18.951	87.888
661-61		0.441	114	6181.9	38.914	20.893	127.535
661-62		0.098	63.0	1394.2	38.800	16.799	47.466
661-63	8 号 矿体	0.341	137	3105.0	38.781	19.096	85.247
661-64		0.242	88.7	3089.6	38.882	18.273	73.280
661-65		1.390	346	5608.9	38.663	19.824	102.304
661-66		0.839	223	6078.3	38.693	20.670	125.246
661-67		0.024	56.4	297.5	38.780	15.867	26.377
661-68		0.384	144	2893.9	38.757	18.066	69.021

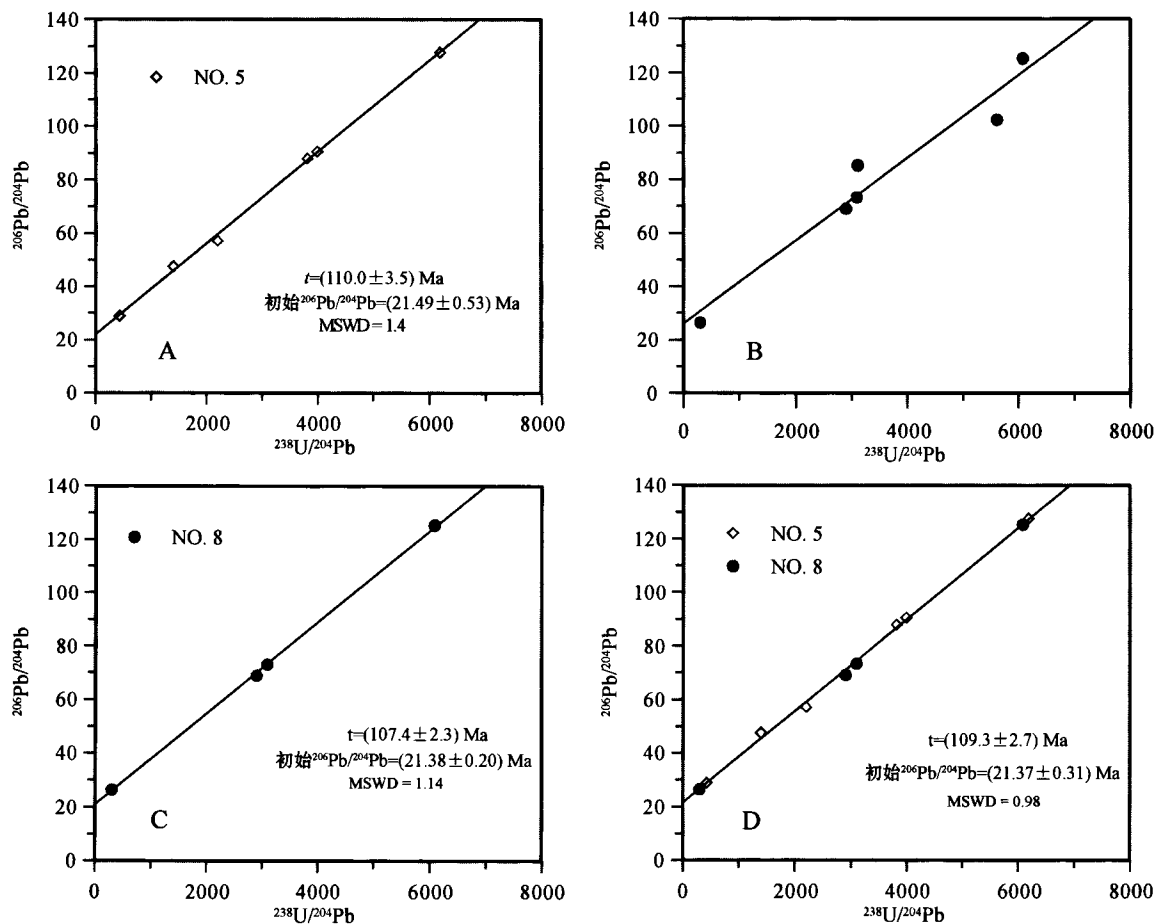


图 2 661 铀矿床矿石 U-Pb 等时线图

A: 5 号矿体; B: 8 号矿体(6 个样品); C: 8 号矿体等时线(4 个样品); D: 5 号矿体和 8 号矿体

Fig. 2 U-Pb isochron diagram of ores from the No. 661 uranium deposit

有较低的 MSWD 值和年龄值误差,线性关系较良好,且与 5 号矿体所得年龄基本一致,初始铅比值也很一致。因而所得的年龄值是可靠的。

把来自 5 号矿体和 8 号矿体的 10 个数据作为一条等时线计算,在等时线图上也具有良好的线性关系(图 2D),计算得到的等时线年龄为 $(109.3 \pm$

2.7) Ma, ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) 初始值 = (21.37 ± 0.31) , MSWD=0.98。这个年龄与 2 个矿体样品单独得出的等时线年龄非常一致, 且 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) 初始值相近, MSWD 值低。因此, 可以认为 109 Ma 为 661 矿床成矿年龄。

4 讨论

4.1 661 铀矿床成矿时代

林祥铿(1990)对赣杭构造带内的部分火山岩型铀矿床进行了沥青铀矿和矿石 U-Pb 等时线定年, 获得 661 铀矿床的矿石等时线年龄为 91.3 Ma, 但所分析 5 个样品中, 4 个用来做等时线处理, 其中有两个为围岩样品, 并根据矿石与围岩表现出的线性关系指出矿石的物质组分与围岩是同源的, 其年龄的代表性值得商榷。这是因为早期铀矿研究受火山期后热液成矿模式影响, 认为火山岩成岩与铀成矿具有大致类似的年龄, 但近年来对浙东南下火山岩系(磨石山群)的年代学研究表明, 其同位素年龄值大部分在 120~135 Ma 之间(浙江省地质矿产局, 1989; 徐步台等, 1997; 俞云文等, 1999; 汪庆华, 2001), 其中九里坪组的成岩时代为 121 Ma(俞云文等, 1999; 汪庆华, 2001), 因此即使本矿床存在一期 91.3 Ma 的成矿年龄, 利用流纹岩与矿石组成等时线获得的年龄也是不合适的。本文对两个矿体的赤铁矿型矿石分别进行了 U-Pb 等时线分析, 获得了几乎一致的等时线年龄, 把来自两个矿体的 10 件矿石样品作为一条等时线计算, 在等时线图上仍表现为良好的线性关系。因此, 本次研究所获得的等时线年龄应该可以代表 661 铀矿床的成矿年龄。将成矿年龄与矿区流纹岩成岩年龄对比可以看出, 存在 11~14 Ma 的矿床与岩石年龄时差。

研究显示(李耀崧等, 1980; 杜乐天等, 1984), 华南热液铀矿床几乎都形成于白垩纪—第三纪(140~25 Ma), 华东南火山岩型铀矿的同位素年龄为 80~120 Ma(陈肇博等, 1982)。赣杭火山岩型铀成矿带具有多期成矿作用, 同一矿床也有多期多阶段叠加的特点(林祥铿, 1990; 刘小于, 1991)。本矿床的成矿年龄与华南其他火山岩型铀矿床类似, 成矿年龄在 107~110 Ma 之间, 获得的全部数据等时线年龄 109.3 Ma 可以代表本矿床赤铁矿型矿化成矿年龄。这与赣杭带西南段相山铀矿田早期铀-赤铁矿化作用成矿年龄(113~115 Ma, 陈繁荣等, 1990; 范洪海

等, 2003)一致。

4.2 铀成矿与岩石圈伸展的关系

研究资料表明, 白垩纪断陷红盆与铀矿化具有十分密切的时空关系。在空间上, 铀矿田、矿床与红盆紧密相邻; 在时间上, 成矿期与红盆形成时间一致(陈祖伊等 1983; 陈肇博, 1985; 胡瑞忠等 1993; 陈跃辉等, 1997; 陈贵华, 1998)。赣杭火山岩型铀成矿带, 其核部是一个狭长的白垩纪-第三纪断陷盆地, 长达 600 km, 宽仅 15~20 km, 下陷深度达数千米, 充填巨厚的红色磨拉石型陆相沉积物。盆地内有偏碱性玄武岩和拉斑玄武岩夹层, 局部还有金伯利岩筒产出, 盆地范围内重力值高, 莫霍面位置显著高于盆地外侧, 表明这类盆地是地壳受到强烈拉张的产物, 具有裂谷锥形的性质, 是早白垩世晚期开始的裂陷构造作用形成的。目前该区发现的热液铀矿田均分布在距该盆地边缘不远的侏罗纪火山岩中(陈肇博, 1985; 陈跃辉等, 1998)。岩石圈伸展作用下的地幔排气作用可以为铀成矿提供必不可少的矿化剂(胡瑞忠等, 1993; 2004; 2007)。拉张构造环境是铀成矿作用的主要特点, 而拉张作用达到地幔成为裂谷环境则是形成富矿、大矿的最佳环境。成矿与深部地质作用有密切联系(余达淦, 1992)。因此, 661 矿床的形成可能与岩石圈伸展有关。

4.3 铀成矿构造背景探讨

中国东南部晚中生代发生大规模钙碱性岩浆活动, 形成巨型火山-侵入杂岩带, 为环太平洋构造岩浆带的重要组成部分, 并且伴随着大规模的成矿作用。因此本区有关火山岩成因的大陆动力学及与成矿关系研究, 一直是地质学家关注的问题。虽然有关本区火山岩成因的基础地质, 如岩浆岩形成的大陆动力学背景、构造体制转换时间, 拉张活动期次和地幔性质等方面还存在不同观点, 但越来越多的学者相信, 至少自白垩纪以来, 华南地区已主要处于陆内岩石圈伸展的构造环境下, 形成大量与伸展有关的岩浆活动和一系列 NE-NNE 向的断陷盆地。浙江地区为中国东南部的一部分, 与中国东南部处于统一的大陆动力学背景下, 中生代构造-岩浆活动频繁, 构造演化独特, 壳幔作用十分发育(李武显等, 2000; 周金城等, 2000; 谢昕等, 2003)。省内以江山-绍兴断裂为界分为浙东南和浙西北两部分, 晚中生代火山岩系是在断陷基础上由众多破火山、火山穹隆相互叠置而形成的一个面式分布的火山带, 分为上、下 2 个火山岩系, 下部岩系为浙东南磨石山群和

浙西建德群;上部分别为衢江群、永康群和天台群。早期为高钾钙碱性英安岩-流纹岩组合,偶见安山岩、玄武岩;晚期为高钾玄武岩-流纹岩双峰式火山岩组合(陶奎元等,2000)。俞云文等(1999)研究发现金衢盆地中的衢江群、永康盆地中的永康群以及天台盆地中的天台群为同期异相堆积,其古生物指示其时代和玄武岩同位素年龄一致,均为早白垩世晚期—晚白垩世早期,覆盖在下部岩系之上。这些盆地的形成常伴随着玄武岩的喷发和强烈的伸展作用(余心起等,2006)。因此,赋存在磨石山群九里坪组中的 661 铀矿床可能与这些盆地形成时的拉张作用和玄武岩的侵位有关。

罗以达等(2004)统计了上世纪 80 年代中期以后前人在专题研究和区域地质调查时对永康群火山岩所作的大量年代学资料,馆头组 9 个年龄在 113~103 Ma 间,其中,宁波盆地、武义盆地等盆地馆头组所夹玄武岩有 5 个年龄在 110~113 Ma 之间。衢江群中戴组底部玄武岩年龄也在 105~110 Ma(张利民,1987;俞云文等,1999;2001;徐夕生等,2005)。天台盆地塘上组火山岩年龄为 110.9 Ma 和 109.2 Ma(李坤英等,1989;罗以达等,2004)。这些玄武岩被认为与白垩纪开始的太平洋板块俯冲引起的软流圈上涌、岩石圈减薄作用密切相关(余心起等,2006)。浙江新昌由辉绿岩和花岗岩组成的复合岩体(辉绿岩 Ar-Ar 同位素年龄为 109.1 Ma)被认为是浙闽沿海壳幔作用的产物(董传万等,2007)。最近,秦社彩(2007)对浙、闽两地的镁铁质岩所测的 Ar-Ar 年龄结果也多集中于 109~114 Ma。从前人研究可以看出,浙江省早白垩世晚期存在明显的拉张作用,形成一系列反映拉张作用的断陷盆地和镁铁质岩浆活动。

曹建劲等(2007)研究发现,广东沿海及海南岛较多的基性脉岩的年龄在 105~115 Ma 之间,广东从化一套形成于拉张环境的安山斑岩-流纹斑岩组合部分样品的 K-Ar 年龄为 107~108 Ma。粤北地区也存在一期 103~110 Ma 的基性脉岩年龄(李献华等,1997)。福建的基性脉岩年代学研究也发现相当数量的年龄值在 108~115 Ma 之间(赵军红,2004;张贵山,2006),赵军红(2004)结合其他年龄数据认为福建存在 105~110 Ma 的拉张作用。江西省 100~110 Ma 基性脉岩最为发育(谢桂青,2003)。以上研究表明华南地区普遍在 110 Ma 存在规模的岩石圈伸展作用。同时,110~90 Ma 是太平洋洋底

发生快速扩张的时代,因而也是环太平洋地区主要热事件的年代(Jahn et al.,1976;Lo et al.,1989)。

本文的研究结果表明,岩石圈伸展与铀成矿之间具有良好的对应关系,为岩石圈伸展期与铀成矿关系提供了年代学证据。碳氧同位素研究表明($\delta^{13}\text{C}$ 为 -4.2‰ ~ -2.2‰ ,待发表数据),成矿期流体中矿化剂主要为幔源,少量可能来自于壳源碳酸盐岩碳。矿区内发育的深大断裂可能控制了幔源挥发分的加入,即华南白垩纪—第三纪岩石圈伸展作用导致地壳浅层同地幔的贯通,对深部 CO_2 加入到在地壳浅层富铀火山岩断裂系统中循环的贫 ΣCO_2 热水(主要为大气成因)起桥梁作用。循环上升的富含幔源 ΣCO_2 的流体在上升过程中,可能溶解了部分或少量沉积碳酸盐中的碳,使本矿床流体碳同位素组成相对幔源碳同位素组成偏高,而成矿期后大气降水只能溶解少量沉积碳酸盐碳,不能形成富 ΣCO_2 的成矿流体。地壳拉张控制了富 ΣCO_2 热液形成的时间,因而也大致控制了铀成矿的时代(胡瑞忠,1990)。华南大规模铀成矿的地质界线是在区域上断陷盆地的出现和基性岩脉的侵入后形成的,绝大多数铀成矿区均与伸展作用形成的白垩纪-第三纪断陷盆地或断陷带相伴生,铀矿化是一种典型的非造山或岩石圈伸展环境中的矿化(胡瑞忠等,2007)。

5 结 论

(1) 661 铀矿床浸染型矿石铀矿化年龄为 107~110 Ma,代表了本矿床铀-赤铁矿型矿化成矿年龄,与赣杭铀成矿带其他铀矿床成矿时代类似。

(2) 铀矿床定位于岩石圈伸展断陷盆地附近,明显受断裂带控制,其成矿时代与断陷盆地底部发育的玄武岩的成岩年龄一致,也与东南沿海地区明显存在的 110 Ma 左右基性脉岩拉张活动一致,表明岩石圈伸展与铀成矿之间具有良好的对应关系,为岩石圈伸展期与铀成矿关系提供了年代学证据。

(3) 岩石圈伸展控制着富 CO_2 热液形成的时间,因而也大致控制了铀成矿的时代。

志 谢 在野外工作期间得到核工业七七一矿徐松生、雷遥鸣工程师等人的支持和帮助。室内测试工作得到核工业北京地质研究院测试中心刘牧的指导 and 帮助,在此一并致以诚挚的谢意!

References

- Bureau of Geology and Mineral Resources of Zhejiang Province. 1989. Regional geology of Zhejiang Province[M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese).
- Cao J J, Hu R Z, Liu S and Xie G Q. 2007. The tectonic transformation and lithospheric extension stages in coastal area of Guangdong and Hainan[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, (Supp.): 3-4 (in Chinese with English abstract).
- Chen F R, Shen W Z, Wang D Z and Liu C S. 1990. Isotopic geochemistry of uranium ore-field No. 1220 and the implication to ore genesis[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 14(14): 69-77 (in Chinese with English abstract).
- Chen G H. 1998. Metallogenic model for continental volcanic-type rich and large uranium deposits[J]. *Uranium Geology*, 14(2): 82-89 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y H and Chen Z Y. 1997. Spatial and temporal evolution of Mesozoic extension tectonics and the spatial and temporal distribution of uranium deposits[J]. *Uranium Geology*, 13(3): 128-138, 146 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y H, Chen Z B, Chen Z Y and Cai Y Q. 1998. Meso-Cenozoic extensional tectonics and uranium metallogenesis in Southeast China [M]. Beijing: Publishing House of Atomic Energy (in Chinese).
- Chen Z B, Xie Y X, Wang G L, Ji S P, Wang C L and Fang Y X. 1982. Uranium deposits in Mesozoic volcanics in Southeast China[J]. *Acta Geologica Sinica*, (3): 235-243 (in Chinese with English abstract).
- Chen Z B. 1985. Some basic metallogenetic aspects on Phanerozoic vein-type uranium deposits[J]. *Uranium Geology*, 1(1): 1-16 (in Chinese with English abstract).
- Chen Z Y, Zhang L S, Chen S K, Guo B C, Chen W H and Wang Z B. 1983. Movement and continental red beds with respect to the regional uranium mineralization in South China[J]. *Acta Geologica Sinica*, (3): 294-303 (in Chinese with English abstract).
- Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, Zichao Z, Guogan M A. 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale[J]. *Journal of the Geological Society*, 149(2): 171-184.
- Deng P, Shen W Z, Ling H F, Ye H M, Wang X C, Pu W and Tan Z Z. 2003. Uranium mineralization related to mantle fluid: A case study of the Xianshi deposit in the Xiazhuang uranium orefield[J]. *Geochimica*, 32(6): 520-528 (in Chinese with English abstract).
- Dong C W, Xu X S, Yan Q, Lin X B and Zhu G Q. 2007. A new case of Late Mesozoic crust-mantle interaction in eastern Zhejiang: Geochronology and geochemistry of the Ru'ao diabase-granite composite intrusions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1303-1312 (in Chinese with English abstract).
- Du L T and Wang Y M. 1984. Uniform metallogenetic mechanism among the granite-, volcanic-, carbonaceous-siliceous-pelitic rock and sandstone-hosted uranium deposits in South China[J]. *Radioactive Geology*, (3): 1-10 (in Chinese with English abstract).
- Fan H H, Ling H F, Wang D Z, Liu C S, Shen W Z and Jiang Y H. 2003. Study on metallogenetic mechanism of Xiangshan uranium ore-field[J]. *Uranium Geology*, 19(4): 208-213 (in Chinese with English abstract).
- Hu R Z, Li C Y, Ni S J, Liu L and Yu J S. 1993. Source of ΣCO_2 during hydrothermal mineralization of granite-hosted uranium deposits in South China[J]. *Science in China (Series B)*, 23(2): 189-196 (in Chinese).
- Hu R Z, Bi X W, Su W C, Peng J T and Li C Y. 2004. The relationship between uranium metallogenesis and crustal extension during the Cretaceous-Tertiary in South China[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 153-160 (in Chinese with English abstract).
- Hu R Z, Bi X W, Peng J T, Liu S, Zhong H, Zhao J H and Jiang G H. 2007. Some problems concerning relationship between Mesozoic-Cenozoic lithospheric extension and uranium metallogenesis in South China[J]. *Mineral Deposits*, 26(2): 139-152 (in Chinese with English abstract).
- Jahn B M, Chen P Y and Yen T P. 1976. Rb-Sr ages of granitic rock in Southeastern China and their tectonic significance[J]. *The Geological Society of America Bulletin*, 87(5): 776-783.
- Li K Y, Shen J L and Wang X P. 1989. Isotopic geochronology of Mesozoic terrestrial volcanic rocks in the Zhejiang-Fujian-Jiangxi area[J]. *Journal of Stratigraphy*, 13(1): 1-13 (in Chinese with English abstract).
- Li W X and Zhou X M. 2000. Geochemistry constraints on the genesis of Late Mesozoic volcanic rocks in coastal area of Zhejiang-Fujian [J]. *Progress in Natural Sciences*, 10(7): 630-641 (in Chinese).
- Li X H, Hu R Z and Rao B. 1997. Geochronology and geochemistry of Cretaceous mafic dikes from northern Guangdong, SE China[J]. *Geochimica*, 26(2): 14-31 (in Chinese with English abstract).
- Li Y S, Zhu J C, Li X B and Ying J L. 1980. An overview of metallogenetic epoch of endogenic uranium deposits[J]. *World Nuclear Geoscience*, (1): 1-8, 16 (in Chinese).
- Li Y S. 1982. Metallogenetic epoch and genesis of granite-hosted uranium deposits in Southeast China[A]. In: Du L T, ed. *Collected papers of granite-hosted uranium deposits* [C]. Beijing: Publishing House of Atomic Energy (in Chinese).
- Li Y S and Li X B. 1984. Metallogenetic age and uranium source of the No. 752 uranium deposit[J]. *Uranium Geology*, (3): 23-27 (in Chinese).
- Li Y S. 1989. Isotope age of principal mineralization period in uranium deposit No. 460[J]. *Uranium Geology*, 5(4): 203-208 (in Chinese with English abstract).
- Lin X K. 1990. The study of U-Pb isotopic systems and approach to the uranium source for several uranium deposits from Gan-Hang tectonic belts[J]. *Uranium Geology*, 6(5): 257-264, 273 (in Chinese with English abstract).
- Liu X Y. 1991. The uranium mineralization periods of the volcanic type uranium deposits and the division of their mineralization types in China[J]. *Uranium Geology*, 7(2): 94-98 (in Chinese with English abstract).
- Lo C H and Onstott T C. 1989. ^{39}Ar recoil artifacts in chloritized biotite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(10): 2697-2711.
- Ludwig K R. 1998. On the treatment of concordant uranium-lead ages [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(4): 665-676.

- Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication.
- Luo Y D and Yun Y W. 2004. Age of the Yongkang group and regional stratigraphic correlation[J]. *Geology in China*, 31(4): 395-399 (in Chinese with English abstract).
- Mao M C. 2004. Ore-forming feature and the prospect for volcanics-hosted uranium ore deposits in Zhejiang Province[J]. *Contribution to Geology and Mineral Resources Research*, 19(1): 8-12, 29 (in Chinese with English abstract).
- Qin S C. 2007. Geochronology and geochemistry of Cretaceous mafic volcanic rocks from Zhejiang and Fujian Provinces, SE China: Petrogenesis and geodynamic implications for lithospheric extension (dissertation for Doctor degree) [D]. Supervisor: Fan W M. Guangzhou: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- Shen W Z, Zhang Z H and Zhang B T. 1988. A study on isotope geology of some granite type uranium deposits in South China[J]. *Acta Geologica Sinica*, (1): 51-62 (in Chinese with English abstract).
- Tao K Y, Xing G F, Yang Z L, Mao J R, Zhao Y and Xu N Z. 2000. Determination of and discussion on the ages of Mesozoic volcanic rocks in Zhejiang[J]. *Geological Review*, 16(1): 14-21 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q H. 2001. Discussion of ages of the Jiande group and the Moshishan group in Zhejiang[J]. *Volcanology and Mineral Resources*, 22(3): 163-169 (in Chinese with English abstract).
- Wu L Q, Tan Z Z, Liu R Z and Huang G L. 2003. Discussion on uranium ore-formation age in Xiazhuang ore-field, northern Guangdong[J]. *Uranium Geology*, 19(1): 28-33 (in Chinese with English abstract).
- Xie G Q. 2003. Late Mesozoic and Cenozoic mafic dikes(bodies) from southeastern China: Geological and geochemical characteristics and its geodynamics—a case of Jiangxi Province (dissertation for Master degree)[D]. Supervisor: Hu R Z. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- Xie X, Xu X S, Xing G F and Zou H B. 2003. Geochemistry and genesis of early Cretaceous volcanic rock assemblages in eastern Zhejiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3): 385-398 (in Chinese with English abstract).
- Xu B T and Yu Y W. 1997. The isotopic ages of Mesozoic volcanic rock in Zhejiang and their geological time[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 18 (Supp.): 117-119 (in Chinese with English abstract).
- Xu X S and Xie X. 2005. Late Mesozoic-Cenozoic basaltic rocks and crust-mantle interaction, SE China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 318-334 (in Chinese with English abstract).
- Yu D G. 1992. Metallogenetic environment and genetic model of uranium in Meso-Cenozoic volcano-magmatic belt in Southeast China[J]. *Uranium Geology*, 8(2): 75-82 (in Chinese with English abstract).
- Yu X Q, Wu G G, Shu L S, Yan T Z, Zhang D and Di Y J. 2006. The Cretaceous tectonism of the Gan-Hang tectonic belt, southeastern China[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(3): 31-43 (in Chinese with English abstract).
- Yu Y W and Xu B T. 1999. Stratigraphical sequence and geochronology of the upper Mesozoic volcano-sedimentary rock series in Zhejiang[J]. *Journal of Stratigraphy*, 23(2): 136-145 (in Chinese with English abstract).
- Yu Y W, Xu B T, Chen J F and Dong C W. 2001. Nd isotopic systematics of the late Mesozoic volcanic rocks from southeastern Zhejiang Province, China: Implications for stratigraphic study[J]. *Geological Journal of China Universities*, 7(1): 62-69 (in Chinese with English abstract).
- Zhang B T, Qin S C, Ni Q S and Wu J Q. 1992. On genesis and ore-control of stratiform green tectonic altered rock on No. 661 uranium deposit in Western Zhejiang Province[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 28(3): 439-451 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L M. 1987. Discovering fossil and its significance in Yiyang-Guifeng area[J]. *Jiangxi Geology*, 1(3): 137-139 (in Chinese with English abstract).
- Zhang G S. 2006. Chronology, geochemistry and geodynamic significance of the mafic-ultramafic rocks in Fujian Province since Late Mesozoic (dissertation for Master degree)[D]. Supervisor: Hu R Z and Wen H J. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- Zhang X P. 1999. Formation and evolution of Mesozoic volcanic basins in Gan-Hang tectonic belt[J]. *Uranium Geology*, 15(1): 18-23 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z H, Shen W Z and Rao B. 1984. A study on the isotopic geology of No. 376 uranium deposit[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, (3): 543-553 (in Chinese with English abstract).
- Zhao J H. 2004. Chronology and geochemistry of mafic rocks from Fujian Province: Implications for the mantle evolution of SE China since Late Mesozoic (dissertation for Master degree)[D]. Supervisor: Hu R Z. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- Zhou J C and Chen R. 2000. Late Mesozoic interaction between crust and mantle in coastal area of Zhejiang-Fujian[J]. *Progress in Natural Sciences*, 10(6): 571-574 (in Chinese).
- Zhu B, Ling H F, Shen W Z, Gao J F, Deng P, Huang G L and Tan Z Z. 2006. Isotopic geochemistry of Shituling uranium deposit, northern Guangdong Province, China[J]. *Mineral Deposits*, 25(1): 71-82 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹建劲, 胡瑞忠, 刘 攀, 谢桂青. 2007. 广东沿海地区及海南岛晚中生代以来的构造转折和拉张期次[J]. *矿物学报*, (增刊): 3-4.
- 陈繁荣, 沈渭洲, 王德滋, 刘昌实. 1990. 1220 铀矿田同位素地球化学和矿床成因研究[J]. *大地构造与成矿学*, 14(14): 69-77.
- 陈贵华. 1998. 富大陆相火山岩型铀矿床的成矿模式[J]. *铀矿地质*, 14(2): 82-89.
- 陈跃辉, 陈祖伊. 1997. 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, 13(3): 128-138.
- 陈跃辉, 陈肇博, 陈祖伊, 蔡煜琦. 1998. 华东南中新生代伸展构造与铀成矿作用[M]. 北京: 原子能出版社.
- 陈肇博, 谢佑新, 万国良, 季树藩, 王灿林, 方锡珩. 1982. 华东南中新生代火山岩中的铀矿床[J]. 地质学报, (3): 235-243.
- 陈肇博. 1985. 显生宙脉型铀矿床成矿理论的几个基本问题[J]. 铀矿地质, 1(1): 1-16.
- 陈祖伊, 张邻素, 陈树崑, 郭葆墀, 陈伟鹤, 王正邦. 1983. 华南断裂运动-陆相红层发育期与区域铀矿化[J]. 地质学报, (3): 294-303.
- 邓平, 沈渭洲, 凌洪飞, 叶海敏, 王学成, 濮巍, 谭正中. 2003. 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, 32(6): 520-528.
- 董传万, 徐夕生, 闫强, 林秀斌, 竺国强. 2007. 浙东晚中生代壳幔相互作用的新例证——新昌儒岙辉绿岩-花岗岩复合岩体的年代学与地球化学[J]. 岩石学报, 23(6): 1303-1312.
- 杜乐天, 王玉明. 1984. 华南花岗岩型、火山岩型、碳硅泥岩型、砂岩型铀矿床成矿机理的统一性[J]. 放射性地质, (3): 1-10.
- 范洪海, 凌洪飞, 王德滋, 刘昌实, 沈渭洲, 姜耀辉. 2003. 相山铀矿田成矿机理研究[J]. 铀矿地质, 19(4): 208-213.
- 胡瑞忠, 李朝阳, 倪师军, 刘莉, 于津生. 1993. 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), 23(2): 189-196.
- 胡瑞忠, 毕献武, 苏文超, 彭建堂, 李朝阳. 2004. 华南白垩—第三纪地壳拉张与铀成矿的关系[J]. 地学前缘, 11(1): 153-160.
- 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 刘荣, 钟宏, 赵军红, 蒋国豪. 2007. 华南地区中生代以来岩石圈伸展及其与铀成矿关系研究的若干问题[J]. 矿床地质, 26(2): 139-152.
- 李坤英, 沈加林, 王小平. 1989. 中国浙闽赣地区中生代陆相火山岩同位素年代学[J]. 地层学杂志, 13(1): 1-13.
- 李武显, 周新民. 2000. 浙闽沿海晚中生代火成岩成因的地球化学制约[J]. 自然科学进展, 10(7): 630-641.
- 李献华, 胡瑞忠, 饶冰. 1997. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学[J]. 地球化学, 26(2): 14-31.
- 李耀崧, 朱杰辰, 李喜斌, 菅俊龙. 1980. 我国内生铀矿床成矿时代概述[J]. 世界核地质科学, (1): 1-8, 16.
- 李耀崧. 1982. 华南花岗岩型铀矿成矿时代及成因探讨[A]. 见: 杜乐天. 花岗岩型铀矿文集[C]. 北京: 原子能出版社.
- 李耀崧, 李喜斌. 1984. 752铀矿床的成矿时代及铀源初析[J]. 铀矿地质, (3): 23-27.
- 李耀崧. 1989. 460铀矿床主要矿化期的同位素年龄[J]. 铀矿地质, 5(4): 203-208.
- 林祥铨. 1990. 赣杭构造带若干铀矿床的同位素年龄研究及铀源初探[J]. 铀矿地质, 6(5): 257-264, 273.
- 刘小于. 1991. 中国火山岩型铀成矿期及矿化类型划分[J]. 铀矿地质, 7(2): 94-98.
- 罗以达, 俞云文. 2004. 试论永康群时代及区域地层对比[J]. 中国地质, 31(4): 395-399.
- 毛孟才. 2004. 浙江火山岩型铀成矿特征及找矿前景[J]. 地质找矿论丛, 19(1): 8-12, 29.
- 秦社彩. 2007. 浙闽白垩纪镁铁质火山岩地球化学特征及其深部动力学意义(博士论文)[D]. 导师: 范蔚铭. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所.
- 沈渭洲, 张祖还, 章邦桐. 1988. 华南某些花岗岩型铀矿床的同位素地质研究[J]. 地质学报, (1): 51-62.
- 陶奎元, 邢光福, 杨祝良, 毛建仁, 赵宇, 许乃政. 2000. 浙江中生代火山岩时代厘定和问题讨论: 兼评Lapierre等关于浙江中生代火山活动时代的论述[J]. 地质论评, 16(1): 14-21.
- 汪庆华. 2001. 试论浙江建德群和磨石山群时代[J]. 火山地质与矿产, 22(3): 163-169.
- 吴烈勤, 谭正中, 刘汝洲, 黄国龙. 2003. 粤北下庄矿田铀矿成矿时代探讨[J]. 铀矿地质, 19(1): 28-33.
- 谢桂青. 2003. 中国东南部晚中生代以来的基性岩脉(体)的地质地球化学特征及其地球动力学意义初探(博士论文)[D]. 导师: 胡瑞忠. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所.
- 谢昕, 徐夕生, 邢光福, 邹海波. 2003. 浙东早白垩世火山岩组合的地球化学及其成因研究[J]. 岩石学报, 19(3): 385-398.
- 徐步台, 俞云文. 1997. 浙江中生代火山岩同位素年龄及地层时代归属[J]. 地球学报, 18(增刊): 117-119.
- 徐夕生, 谢昕. 2005. 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, 11(3): 318-334.
- 余达淦. 1992. 中国东南部中生代火山-岩浆带中铀的成矿环境及成矿模式[J]. 铀矿地质, 8(2): 75-82.
- 余心起, 吴淦国, 舒良树, 颜铁增, 张达, 狄永军. 2006. 白垩纪时期赣杭构造带的伸展作用[J]. 地学前缘, 13(3): 31-43.
- 俞云文, 徐步台. 1999. 浙江中生代晚期火山—沉积岩系层序和时代[J]. 地层学杂志, 23(2): 136-145.
- 俞云文, 徐步台, 陈江峰, 董传万. 2001. 浙东南中生代晚期火山岩Nd同位素组成及其地层学意义[J]. 高校地质学报, 7(1): 62-69.
- 章邦桐, 秦社彩, 倪琦生, 吴俊奇. 1992. 浙江661铀矿床“绿色层”成因及控矿作用的研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 28(3): 439-451.
- 张利民. 1987. 弋阳圭峰地区化石的发现及其意义[J]. 江西地质, 1(3): 137-139.
- 张贵山. 2006. 福建晚中生代以来基性-超基性岩的年代学、地球化学及其地球动力学意义(博士论文)[D]. 导师: 胡瑞忠, 温汉捷. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所.
- 张星藩. 1999. 赣杭构造带中生代火山盆地的形成和演化[J]. 铀矿地质, 15(1): 18-23.
- 张祖还, 沈渭洲, 饶冰. 1984. 376铀矿床的同位素地质研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), (3): 543-553.
- 赵军红. 2004. 福建省基性岩的年代学和地球化学: 晚中生代以来中国东南部地幔演化(博士论文)[D]. 导师: 胡瑞忠. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所.
- 浙江省地质矿产局. 1989. 浙江省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 周金城, 陈荣. 2000. 浙闽沿海晚中生代壳幔作用研究[J]. 自然科学进展, 10(6): 571-574.
- 朱捌, 凌洪飞, 沈渭洲, 高剑峰, 邓平, 黄国龙, 谭正中. 2006. 粤北石土岭铀矿床同位素地球化学研究[J]. 矿床地质, 25(1): 71-82.