

粤北下庄铀矿田基性岩脉 Ar-Ar定年及其与铀成矿关系新认识*

骆金诚¹ 齐有强¹ 王连训² 陈佑纬¹ 田建吉³ 石少华⁴

LUO JinCheng¹, QI YouQiang¹, WANG LianXun², CHEN YouWei¹, TIAN JianJi³ and SHI ShaoHua⁴

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 550081
2. 中国地质大学地球科学学院 武汉 430074
3. 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
4. 湖南省地质调查院 长沙 410116

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

2. School of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Key Laboratory of Uranium Resource Exploration and Evaluation Technology, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China

4. Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410116, China

2019-04-02 收稿, 2019-07-03 改回.

Luo JC, Qi YQ, Wang LX, Chen YW, Tian JJ and Shi SH. 2019. Ar-Ar dating of mafic dykes from the Xiazhuang uranium ore field in northern Guangdong, South China: A reevaluation of the role of mafic dyke in uranium mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9): 2660–2678, doi:10. 18654/1000-0569/2019. 09. 03

Abstract Mafic dyke is the product of lithospheric spreading and crustal extension, which is of great significance for studying the nature of the mantle and the evolution of continental dynamics. Abundant and widely distributed mafic dykes are commonly and universally interpreted to be a manifestation of extensional tectonism. In the northern Guangdong Province of the Nanling Mountain, the Xiazhuang uranium deposits are considered as one of the largest granite-related uranium ore field in China. Mesozoic mafic dykes are widespread and regularly developed, which are closely associated with granite-related uranium deposits in the Xiazhuang uranium ore field. The geochronology and geochemistry of these mafic dykes and uranium deposits have been extensively studied. However, the link between mafic dykes and uranium mineralization are considerable controversy. The new Ar-Ar dating of the hornblende of the diabase, dioritic porphyrite and diabase porphyrite from the Xiazhuang uranium ore field yields the plateau ages of 200 ~ 190Ma, 179.6 ± 2.8Ma and 145.1 ± 12.1Ma, respectively. These results coupled with published geochronological data show that at least three major episodes of mafic dykes occurred in the study area at 200 ~ 190Ma, ~ 180Ma and 145 ~ 140Ma, indicating that South China Block probably occurs the wide extension at 200 ~ 190Ma and 145 ~ 140Ma. The identification of mafic dykes at 200 ~ 190Ma in the northern Guangdong Province of the Nanling metallogenic province represents the extensional tectonism in South China block, which have been started at 200 ~ 190Ma after the Indosinian orogeny. Based on the fact that closely spatial and temporal relationships between uranium ore body and mafic dykes in the Xiazhuang uranium ore field, age gap between ore-forming and emplacement of mafic dykes is key to evaluate the role of mafic dyke in uranium mineralization. When the ore-forming event is slightly younger than the occurrence of mafic dykes, it is considered that magmatic activities represented by mafic dykes could not only supply mantle-derived Σ CO₂ (noble gas He), which is indispensable for uranium mineralization, but also provide a favorable reducing environment to promote the deposition and enrichment of uranium from hydrothermal fluids. Accordingly, the emplacement of mafic dykes is much older than age of uranium mineralization, mafic dykes associated with deep faults could be still favorable factors for uranium deposition and fluid migration. Therefore, this paper reevaluates the role of mafic dyke in uranium mineralization, and provides some reliable suggestions for further prospecting in the Xiazhuang uranium ore field and other similar deposits in the region which may have formed in a similar model.

* 本文受国家重点研发计划(2016YFC0600405)、中国科学院战略先导专项(B类)(XDB18030200)、国家自然科学基金项目(41603051、41873057)和贵州省基金(黔科合基础[2018]1423)联合资助。

第一作者简介: 骆金诚,男,1986年生,博士,从事矿床地球化学研究, E-mail: luojincheng@mail.gyig.ac.cn

Key words Granite-related uranium deposits; Mafic dykes; Uranium mineralization; Ar-Ar age; Xiaozhuang

摘要 基性岩脉是岩石圈伸展作用的产物,对研究地幔性质和地球动力学演化具有十分重要的意义。粤北下庄铀矿田是我国最大的花岗岩型铀矿田之一,区内发育了大量与铀矿化作用密切相关的基性岩脉。前人从地球化学和年代学方面,对基性岩脉和铀矿床做了不同程度的研究,但有关铀矿床的成因及其与基性岩脉内在联系仍有不同认识。本研究新获得一批下庄铀矿田基性岩脉的角闪石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学数据,识别出一期形成于200~190Ma的基性岩脉,标志着华南地区在印支期碰撞造山作用结束后岩石圈伸展裂解作用可能至少在200~190Ma已经开始。结合前人已有的研究结果,粤北下庄至少发育三期基性岩脉:200~190Ma、~180Ma和145~140Ma,与华南地区在此期间广泛的岩石圈伸展作用相对应。结合成岩成矿作用的时差以及铀矿体与基性岩脉的空间关系,笔者认为准确的获得基性岩脉的侵位时代与铀的成矿作用的年龄,是探讨基性岩脉与铀成矿作用关系的前提。当基性岩脉与铀的成矿作用年龄接近或具有对应关系时,铀矿床中基性岩脉可能不仅可提供幔源流体(ΣCO_2 矿化剂和He)参与铀的成矿作用,也可为铀的沉淀富集提供理想场所(还原障);当基性岩脉与铀的矿化作用在时间上存在较大的时差时,基性岩脉也可为后期铀的沉淀富集提供条件,且与基性岩脉相关的深大断裂可为幔源流体(ΣCO_2 矿化剂)参与铀成矿过程提供运移通道。基于此,笔者认为无论基性岩脉的侵位与铀的矿化作用是否存在时差,基性岩脉均可以为后期铀的沉淀富集提供场所,进而促进铀的成矿作用。因此,本文深化了花岗岩型铀矿区内铀成矿作用与基性岩脉内在联系的认识,为该区下一步找矿勘查工作提供重要理论依据。

关键词 花岗岩型铀矿床;基性岩脉;铀成矿作用;Ar-Ar年龄;下庄

中图分类号 P597.3; P619.14

基性岩脉是源于地幔的基性熔融岩浆由于某种地质构造作用,侵位至地壳浅部冷却形成的一类岩石,对于划分区域岩石圈伸展以及示踪反演深部地幔性质和地球动力学演化具有重要意义,一直是国内外研究的一个热点(Hall, 1982; Ernst *et al.*, 1995; 李献华等, 1997; 谢桂青等, 2001; 彭澎, 2005; Wang *et al.*, 2015; Qi *et al.*, 2012, 2016)。目前,我国基性岩脉的研究多集中于华北地块、中央造山带(昆仑-秦岭-大别)以及中国东部的基性岩脉群(陈孝德和史兰斌, 1983; 李江海等, 1997; 李献华等, 1997; 张成立等, 1999; 周鼎武等, 2000; Xie *et al.*, 2006a, b; Xu *et al.*, 2012; Xiong *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2018a)。迄今为止,对中国东南部中生代基性岩脉的系统研究主要集中在粤北、福建沿海、湘赣边界、琼南以及某些热液矿床区内(王学成等, 1991; 李献华等, 1997; 谢桂青等, 2001; 葛小月等, 2003; 胡瑞忠等, 2004; Xie *et al.*, 2006a, b; Xu *et al.*, 2012; Xiong *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2018a)。有学者针对构造活动带内的基性岩脉开展了系统研究,并讨论了构造带与基性岩脉发育的关系(齐有强等, 2011; Qi *et al.*, 2016)。值得指出的是,基性岩脉在时空分布上与热液型矿床,尤其是与花岗岩型铀矿床、金和铅锌矿床有着十分密切的关系,吸引了众多学者对基性岩脉的成岩年代、源区特征、成因机制及其与成矿作用关系等方面进行研究(王学成, 1986, 1989; 胡瑞忠和金景福, 1988, 1990; 王学成等, 1991; 胡瑞忠等, 1993, 2004; 赖绍聪和徐海江, 1993; 李献华等, 1997; Hu *et al.*, 2008, 2009; Wang *et al.*, 2015; 齐有强等, 2016; Zhang *et al.*, 2018a)

华南是中国重要的热液型铀矿产区,按赋矿围岩主要划分为花岗岩型、火山岩型和碳硅泥岩型铀矿床(胡瑞忠等, 2004)。南岭地区广泛发育与花岗岩有关的热液型铀矿床,其中粤北地区下庄铀矿田是我国最大的花岗岩型铀矿田,曾

是全国最大的铀矿基地。该矿区发育大量的基性岩脉(图1),被认为与铀矿化密切相关(胡瑞忠, 1990; 李献华等, 1997; 胡瑞忠等, 2004; Wang *et al.*, 2015)(图1)。基性岩脉不仅控制着铀矿床的定位(图1、图2),且控制着矿体的空间分布(图2),使许多矿体严格限制在基性岩脉内部(图3a)或在花岗岩与基性岩脉的边缘接触带(图3b)(丁瑞钦, 2002; 刘汝洲, 2003)。多年来,前人对下庄矿田的岩浆作用、成矿构造、铀矿床成因以及基性岩脉与铀成矿作用关系等方面进行了不同程度的研究,积累了大量成果,提出了著名的“交点铀成矿”理论模型(史运澄等, 1992; 丁瑞钦, 2002; 刘汝洲, 2003)。从广义上讲,“交点型”矿床是由指两条构造相交部位控制的矿化类型(丁瑞钦, 2002)。文中涉及的“交点型”铀矿床是指硅化断裂构造带交切基性岩脉的交点部位控制的铀矿、矿化(刘汝洲, 2003)。其特征主要体现在矿体较为严格的受交切复合交点部位硅化构造带和中基性岩脉的双重控制,而矿体则赋存在受成矿热液蚀变充填的中基性岩脉和花岗岩硅化破碎带中。“交点型”铀矿床类型控制储量曾占下庄铀矿区已查明储量的65%以上(吴烈勤和谭正中, 2004),有着举足轻重的地位,对我国花岗岩型铀矿床的勘查工作起到了重要的指导作用。

目前,已有的研究表明华南白垩纪-第三纪发生过六次大规模岩石圈伸展事件:145~140Ma、125~115Ma、~105Ma、95~85Ma、75~70Ma和55~45Ma(余达淦, 1992; 李献华等, 1997; 胡瑞忠等, 2004, 2007, 2015; Hu *et al.*, 2008)。值得指出的是,铀成矿年龄的统计结果表明华南不同类型的铀矿床有着大致相同的六个主成矿期:~135Ma、120~115Ma、105~100Ma、90~85Ma、75~70Ma和50~45Ma(胡瑞忠等, 2004, 2007; Hu *et al.*, 2008; Luo *et al.*, 2015a, b),与华南岩石圈伸展作用事件的时间具有较好的对应关系(胡瑞忠等, 2004, 2007, 2015; 王正其和李子颖, 2007; 朱

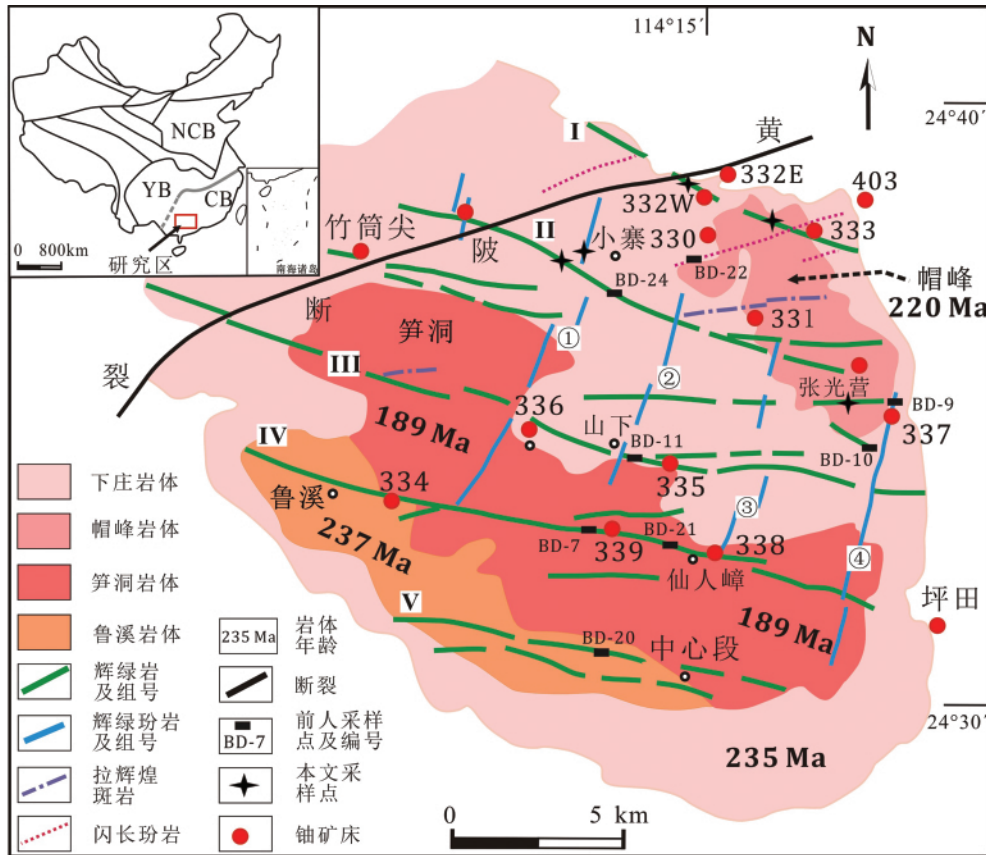


图1 贵东复式岩体东部主要花岗岩体、基性岩脉和铀矿床分图简图(据凌洪飞等, 2004, 2005; 张展适, 2011; Chen *et al.*, 2012; Luo *et al.*, 2015a)

Fig. 1 Simplified geological maps showing the distribution of granite plutons, mafic dykes and major uranium deposits in the eastern part of the Guidong granite complex (after Ling *et al.*, 2004, 2005; Zhang, 2011; Chen *et al.*, 2012; Luo *et al.*, 2015a)

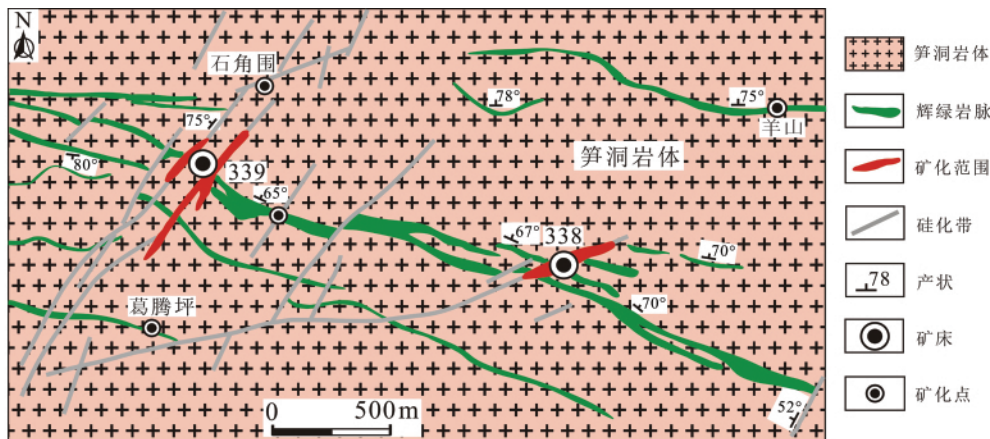


图2 下庄矿田中338和339矿床产于NW向辉绿岩与NE向硅化带的交点部位(据邓平等, 2003a)

Fig. 2 Simplified geological maps showing the No. 338 and No. 339 uranium deposits located at intersections between the WNW-trending mafic dykes and NE-trending silicified zone within the Xiazhuang uranium ore field (after Deng *et al.*, 2003a)

捌, 2010; Hu *et al.*, 2008; Luo *et al.*, 2015a, b, 2017)。虽然以往的研究工作已从大区域角度初步证实这种对应关系, 但在矿田(床)尺度范围内基性岩脉与铀成矿年龄对应关系

还有待进一步证实(胡瑞忠等, 2007, 2015)。Luo *et al.* (2015a)通过SIMS铀矿物U-Pb年龄方法对仙石铀矿床进行研究,发现该矿床存在三期铀矿化作用 $135 \pm 4\text{Ma}$ 、 $113 \pm 2\text{Ma}$

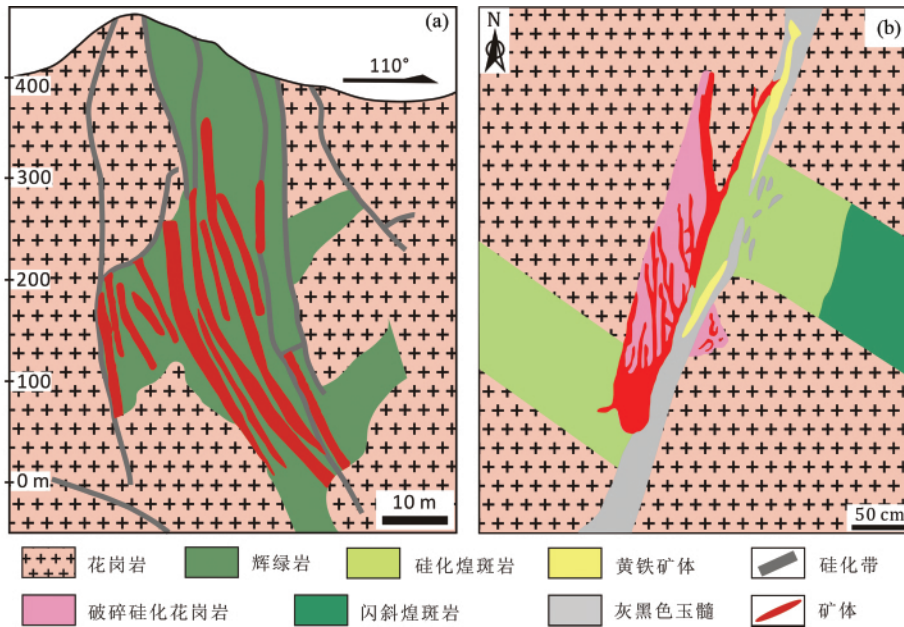


图3 下庄矿田 336 矿床中铀矿体赋存在辉绿岩中(a 据杜乐天, 2015) 和 331 铀矿床 B01 矿体与煌斑岩接触关系示意图 (b 据吴烈勤和谭正中, 2004)

Fig. 3 Geological profile showing the uranium bodies hosted within mafic dykes from the No. 336 deposit (a , after Du , 2015) and crossing the B01 ore bodies associated with lamprophyre from the No. 331 deposit (b , after Wu and Tan , 2004) in the Xiaozhuang uranium ore field

和 $104 \pm 2\text{Ma}$, 提出该矿床中的三期矿化年龄与区域上基性岩脉的侵位年龄具有一一对应关系。然而, Wang *et al.* (2015) 利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 方法获得下庄矿区黄陂-张广营基性岩脉的结晶年龄 $193 \pm 4\text{Ma}$, 该年龄明显早于下庄矿区早期报道的最老的基性岩脉年龄(角闪石 K-Ar 年龄: $142.6 \pm 3.0\text{Ma}$; 李献华等, 1997) 和已确认的最老的铀矿化年龄 $135 \pm 4\text{Ma}$ (Luo *et al.* , 2015a) 。在下庄矿田相邻的赣南隘高铀矿区内 Zhang *et al.* (2018a) 采用 LA-ICP-MS 磷灰石 U-Pb 法获得矿区内 NW 向辉绿岩的结晶年龄 $189 \pm 4\text{Ma}$, 且该年龄也显然早于隘高铀矿的矿化年龄 $70.1 \pm 1.4\text{Ma}$ (李立生和谢溢华, 2011) 。由于新获得的基性岩脉的侵位年龄与铀的矿化年龄存在较大的差别, 因而研究者提出基性岩脉并不能为后期铀的矿化作用提供矿化剂(ΣCO_2) , 但基性岩脉中高的 Fe^{2+} 含量有利于成矿流体中 U^{6+} 还原形成沥青铀矿沉淀(Wang *et al.* , 2015; Zhang *et al.* , 2018a) 。

因此, 极有必要重新审视这些基性岩脉的精确侵位年龄, 并评估基性岩脉在铀成矿作用中的贡献。笔者在近年研究进展的基础上, 通过基性岩脉的侵位年龄与铀成矿年龄的对比、成矿物质来源和成矿流体(He 和 CO_2) 特征等方面的综合考虑, 对基性岩脉与花岗岩型铀矿床成因联系机理的认识进行了深入的探讨, 为进一步揭示花岗岩型铀矿床的成矿机理和控矿因素提供新的约束。

1 地质背景

1.1 区域地质特征

下庄铀矿田位于贵东岩体的东部。贵东岩体位于广东省韶关北部的翁源和始兴县之间, 属于南岭东西向大东山-贵东-五里亭岩浆岩带的中-东段。大地构造位置上处于华夏古陆西缘闽、赣、粤加里东隆起与湘、桂、粤北海西-印支凹陷的交汇部位, 位于南岭 U、W-Sn、Cu 和 Nb-Ta 等多金属成矿带的南部, 是诸广-贵东铀矿聚集区的重要组成部分。贵东岩体为多期次侵入的复式岩体, 主要由东部的下庄岩体、鲁溪岩体、帽峰岩体、笋洞岩体以及西部的司前岩体和隘子等岩体组成(图 1) , 出露面积约 1000km^2 。近年, 贵东复式岩体的高精度年代学研究表明, 鲁溪岩体($239 \pm 5\text{Ma}$) 、下庄岩体($235.8 \pm 7.6\text{Ma}$) 和帽峰岩体($219.6 \pm 0.9\text{Ma}$) 为印支期花岗岩, 而笋洞岩体($189.1 \pm 0.7\text{Ma}$) 、司前岩体($160.1 \pm 6.1\text{Ma}$) 和隘子岩体($151 \pm 11\text{Ma}$) 为燕山期岩体(徐夕生等, 2003; 凌洪飞等, 2004, 2005; Chen *et al.* , 2012) 。该复式岩体在东北和东侧侵入的围岩为寒武-奥陶系浅变质砂岩、板岩及含炭板岩, 南侧的侵入围岩为泥盆-石炭系砂岩、碳酸盐岩。接触带附近的围岩均发生程度不同的接触变质作用。

岩体内除发育晚期花岗岩斑岩脉等酸性岩浆岩外, 亦可见 NWW、NNE 和 NEE 向基性岩脉侵入早期花岗岩体或地层中

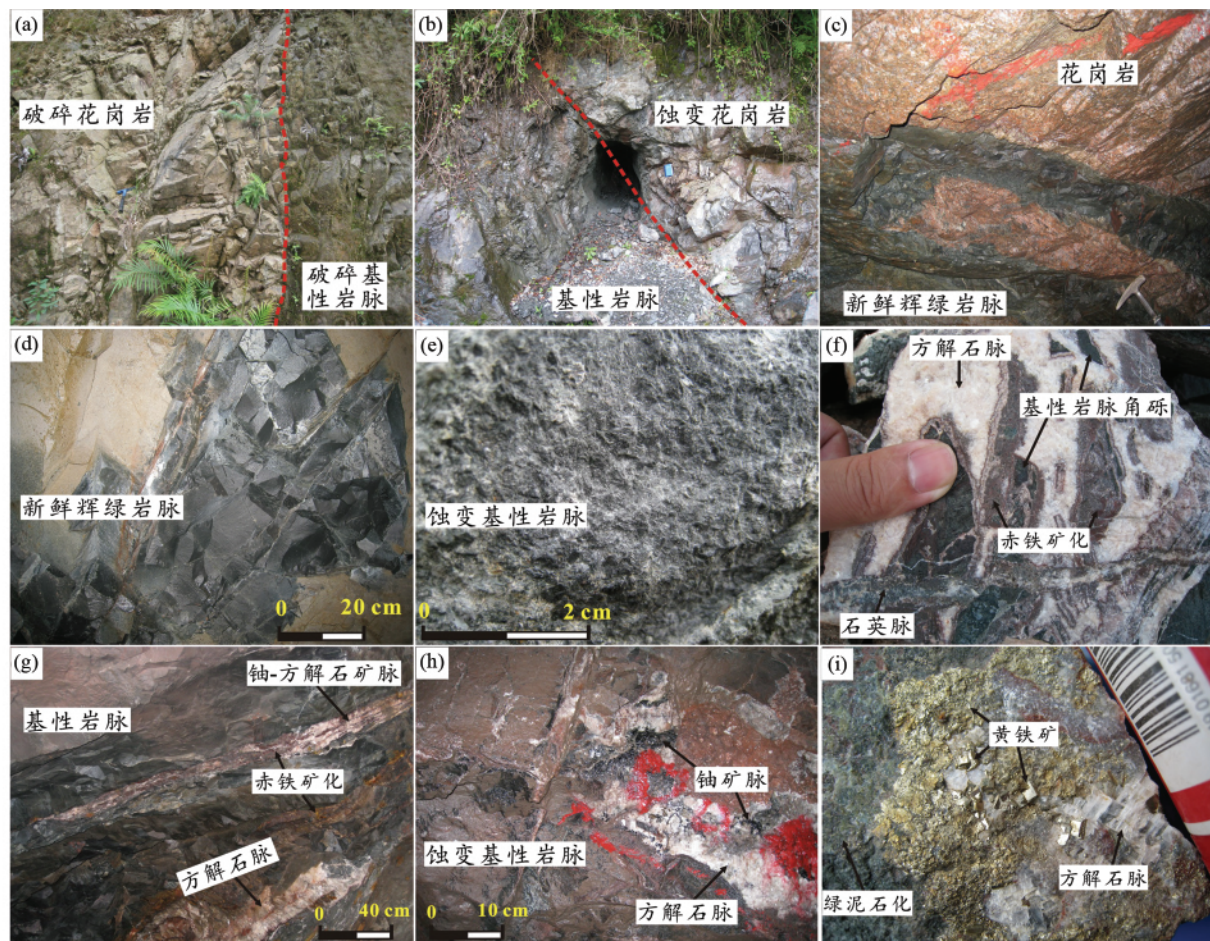


图4 野外照片显示下庄矿田基性岩脉与花岗岩、脉石矿物方解石和黄铁矿以及铀矿脉之间的关系

(a-c) NWW 向第一组 (a) 和第二组 (b) 辉绿岩脉及新鲜基性岩脉 (c) 与花岗岩的截然接触; (d, e) 新鲜和蚀变的基性岩脉; (f) 破碎基性岩脉角砾充填在后期热液方解石脉中 部分基性岩脉角砾发生赤铁矿化后出现蚀变晕圈而褪色, 早期破碎的基性岩脉角砾和胶结的方解石脉被晚期阶段的石英脉切割; (g, h) 铀矿物-方解石脉充填在赤铁矿化的基性岩脉裂隙中; (i) 绿泥石化的基性岩脉边界出现大量的方解石和黄铁矿

Fig. 4 Field photographs showing the relationship between mafic dykes and granites, calcites, pyrite and uranium minerals in the Xiazhuang uranium ore field

(a-c) sharp contact between the NWW-trending first group (a), second group (b) and unaltered (c) mafic dykes and their host granites; (d, e) fresh and alteration mafic dykes, respectively; (f) mafic rock clasts in the carbonate dykes showing hematitization halos, late stage quartz vein cross-cutting the mafic rock clasts and carbonate dykes; (g, h) uranium mineral and calcite vein occur within altered mafic dykes which show the strongly hematitization; (i) abundant pyrites and calcites occur within the boundary of altered mafic dyke

(图1、图4a-c)。这些基性岩脉的岩性主要为辉绿岩、角闪辉绿岩和辉绿玢岩, 少量为闪斜煌斑岩和拉煌斑岩(本文统称基性岩脉)。辉绿岩主要由斜长石、辉石和角闪石、石英组成, 辉绿结构明显(图5)。副矿物主要有磷灰石、钛铁矿、磁铁矿、黄铁矿等。闪斜煌斑岩主要由斜长石、角闪石和少量石英组成, 斑晶为角闪石。此外还有少量云煌岩、拉辉煌岩、闪长岩和闪长玢岩, 其中辉绿玢岩均以 NNE 和 NEE 向分布。大多与花岗岩接触的辉绿岩脉具有冷凝边结构(图4b, c)。铀矿区内基性岩脉大多经受不同程度的蚀变。NNE 向岩脉主要分布在岩体东缘的太平庵断裂带, NEE 向岩脉则分布在岩体北部湖子地区。在野外可见到 NEE 向辉绿玢岩脉穿切

近 E-W (NWW) 向辉绿岩脉。区内断裂构造活动强烈, 分布着众多典型的花岗岩型热液铀矿床。铀矿化明显受断裂构造控制, 中基性岩脉与铀成矿关系密切(图2、图3)。矿田受黄陂断裂与马屎山断裂的夹持, NNE 向基性岩脉与区内 EW 向和 NEE 向含矿硅化断裂带相互交织, 控制下庄矿田内铀矿床的空间分布。在下庄矿田内从北往南共发育五组基性岩脉, 约呈 4km 等间距产出, 依次为水口-竹山下、黄陂-张广营、下庄-寨下、鲁溪-仙人嶂和中心段(图1和表1)。这些基性岩脉的形态变化较大, 尖灭形式多样。单条岩脉厚度一般为几米至几十米, 大多数为 10~30m。NNE 向的硅化断裂带与近 NWW 向中基性岩脉呈近等间距分布, 整个矿区形成格

表 1 下庄铀矿区主要基性岩脉及其相关的铀矿床和矿化点(据张展适, 2011; 冯志军等, 2016; 本文)

Table 1 The main uranium deposits and mineralization points associated with mafic dykes occurred in the Xiaozhuang uranium ore field(after Zhang *et al.*, 2011; Feng *et al.*, 2016 and this study)

岩脉	编号	组名	岩性	产状	长度 (km)	厚度 (m)	最大厚度 (m)	间距 (km)	控制矿床、矿点	典型矿床年龄 (Ma)	岩脉年龄 (Ma)	文献												
NW向岩脉	第 I 组	水口-竹山下	辉绿岩、煌斑岩、纤闪石化辉绿岩	285°NE∠70°~90°	5.5	10	30	~4.0	333、332、水口及相关矿点	332 矿: ~55; 333 矿: 85~165	角闪石 Ar-Ar: 200~185	徐达忠等, 1999; 吴烈勤等, 2003; 本文												
													第 II 组	黄陂-张广营	角闪辉绿岩、纤闪石化辉绿岩	295°N∠50°~90°	14	20	40	~4.0	小水、6009、黄陂、张光营及相关矿点	小水矿: 71.8~75.2	角闪石 K-Ar: 142.6±3.0; 锆石 U-Pb: 193±4; 角闪石 Ar-Ar: ~200	李献华等, 1997; Wang <i>et al.</i> , 2015; 本文
	第 III 组	下庄-寨下	辉绿岩、纤闪石化辉绿岩	290°NE∠50°~90°	14~22	30	170	~4.0	335、336、明珠湖、白水寨及相关矿点	335 矿: 93.5±1.2; 73.1±1.4	角闪石 Ar-Ar: 109.9±2.3	李献华等, 1997; 邹东风等, 2011												
	第 V 组	中心段	拉辉煌斑岩、纤闪石化辉绿岩	270°~280°NE∠70°~90°	10	30	70	~4.0	泉洞及十余个矿化点	—	角闪石 K-Ar: 139.0±2.6	李献华等, 1997												
第一组													小寨-下庄	辉绿玢岩、闪长玢岩	80°~120°∠50°~90°	~8	2~5	5	~3.0	332、336及相关矿点	332 矿: ~55	角闪石 Ar-Ar: 145.1±12.1	本文	
	第四组	石土岭-太平庵	辉绿玢岩、闪长玢岩	90°~115°∠70°~90°	7	3~10	10	~4.0	337 矿床和太平庵矿化点	337 矿: ~135	角闪石 Ar-Ar: 141.4±2.6	李献华等, 1997; 吴烈勤等, 2003; 朱捌等, 2006												

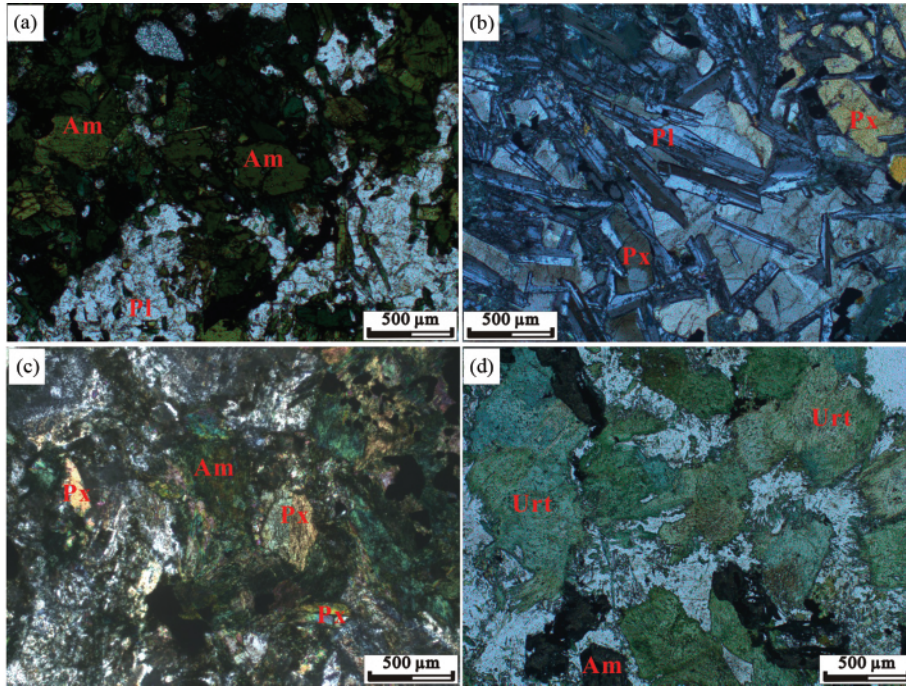


图5 下庄矿田代表性基性岩脉的岩相学照片

Am-角闪石; Px-辉石; Pl-斜长石; Urt-纤闪石

Fig. 5 Representative photomicrographs illustrating mafic dykes from the Xiaozhuang uranium ore field

Am-amphibole; Px-pyroxene; Pl-plagioclase; Urt-uralite

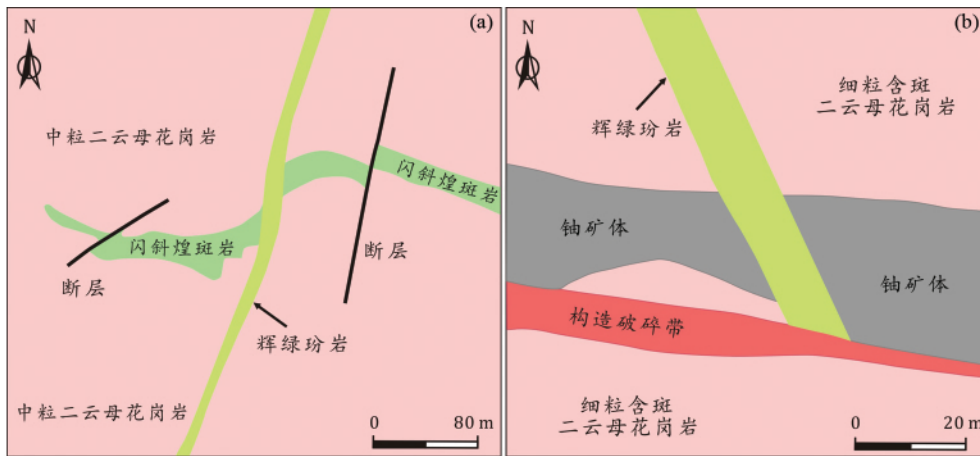


图6 下庄矿田331矿床中不同方向基性岩脉间的交切关系(a)和337矿床中基性岩脉与铀矿体间的接触关系(b) (据张展适, 2011)

Fig. 6 The cross-cutting relationship between various trend of mafic dykes from the No. 331 deposit (a) and mafic dykes and uranium ore bodies from the No. 337 deposit in the Xiaozhuang ore field (after Zhang, 2011)

子状构造(图1)。

1.2 矿床地质特征

下庄矿田内基性岩脉的组成、产状、规模及控制的主要矿床(点)如表1。位于硅化带和NWW向基性岩脉交汇点的部位发育众多“交点型”铀矿床(如330、331、333、334、335、

336、338、339、小水和湖子堆山等铀矿床)。通常,硅化带穿过或错断基性岩脉,基性岩脉与花岗岩以及铀矿床(体)之间的穿插关系较为复杂(图2、图3、图6),如331矿区内不同侵位方向的基性岩脉相互穿插,可以推断NWW向辉绿岩和闪斜煌斑岩形成较早,而NNE东向辉绿玢岩形成最晚(图6a;张展适, 2011)。NNW断裂控制矿田内最早形成的铀-方解

石矿化(如 339 和 337 矿床)和晚期的铀-微晶石英矿化(如 333 和 330 矿床)(朱捌等,2006; 张展适,2011; Luo *et al.*, 2015a)。NNE 向断裂是矿田内活动最强烈的断裂构造带,带内充填有大量的石英脉,其中以新桥-下庄断裂和大帽峰-石角尾断裂最为重要(王正其等,2007)。下庄地区的构造具有多期的特点,与铀成矿古水热系统的活动密切相关,这些构造不仅起到了连通岩体东西部水热系统的作用,且为深部物质的上涌提供了运移通道(丁瑞钦和梁天锡,2003)。

区内蚀变作用广泛发育,其中花岗岩中广泛发育白云母化和绿泥石化,局部钠长石化和电气石化强烈。硅化断裂带内发育绢云母化和水云母化;辉绿岩部分遭受纤闪石化和碳酸盐化蚀变作用(图 4f-h)。当矿体赋存在蚀变花岗岩中时,铀矿物通常与猪肝色微晶石英、黑色微晶石英、黄铁矿和紫黑色萤石伴生。相应的矿石类型有:红色微晶石英-沥青铀矿组合、黑色微晶石英-黄铁矿-沥青铀矿组合、微晶石英-紫黑色萤石-沥青铀矿等(胡瑞忠,1989; 商朋强,2007; 张展适,2011)。围岩蚀变主要为硅化、绿泥石化、赤铁矿化和水云母化等。当铀矿体位于辉绿岩边界或赋存在辉绿岩破碎带中时,普遍发育碳酸盐化蚀变(方解石)和赤铁矿化(图 4f-i),且常伴随有绢云母化和绿泥石化(图 4i)。方解石大量出现时,主要出现铀矿物-方解石组合(图 4g, h)。铀矿化附近的基性岩脉往往出现褪色现象,部分发生赤铁矿化(即基性岩脉中 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+})(图 4f-h),矿石类型即为铀矿物-赤铁矿化。热液脉体中矿物流体包裹体研究显示,成矿阶段的温度通常在 150~250℃,流体包裹体盐度变化较大(1%~20% NaCleqv),可见 NaCl 和 KCl 子矿物,矿物包裹体的气相成分以 CO_2 和 H_2 为主(陈安福和赵洪波,1986; 王学成,1986; 胡瑞忠,1989; 邓平等,2003a, b; 商朋强,2007; 何德宝,2017)。

李献华等(1997)对下庄地区代表性基性岩脉做了较为详细的 K-Ar 和 Ar-Ar 年代学研究,结果显示第二组和第五组 NWW 向辉绿岩年龄最早为 145~140Ma; 第三组和第四组辉绿岩时代为 ~105Ma; 而 NEE 向闪长玢岩和 NNE 向辉绿玢岩最年轻为 ~90Ma。最近, Wang *et al.* (2015) 利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 方法获得第二组黄陂-张广营基性岩脉的结晶年龄 193 ± 4 Ma, 含热液增生边的锆石年龄 177 ± 4 Ma 为后期热事件的年龄。目前,大量铀矿物 U-Pb 年代学数据表明,下庄铀矿区内铀成矿作用的年龄主要在 135~50Ma 之间,集中体现在四期铀矿化: ~135Ma、125~120Ma、90~85Ma 和 75~70Ma(吴烈勤等,2003; 邓平等,2003a, b; 胡瑞忠等,2004; 朱捌等,2006; Hu *et al.*, 2008; 王正其等,2010a; 张展适,2011; 骆金诚,2015; Luo *et al.*, 2015a)。早期铀矿化作用的时限也与野外地质和岩相学证据相佐证,如 337 矿床中 ~135Ma 铀矿体被晚期辉绿玢岩脉所切割(图 6b)(吴烈勤等,2003); 仙石(339)矿床中团块状铀矿物被晚期铀矿物-方解石脉重新胶结(吴烈勤等,2003),且晚期铀矿物颗粒呈破碎角砾充填在后期热液方解石脉中(Luo *et al.*, 2015a)。

2 角闪石⁴⁰Ar-³⁹Ar 年代学

2.1 样品特征

本文用于⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素定年的角闪石样品分别采自第一组 NWW 向 333 铀矿区附近采石场辉绿岩(QZSX)和 332 铀区内(K332-2)辉绿岩、第二组 NWW 向湖子堆矿洞辉绿岩(HZDX)、NEE 向张广营(ZGY)地区(337 矿区)闪长玢岩以及 NNE 向湖子堆矿洞附近的辉绿玢岩(HZDS)。野外观察可见这些基性岩脉与花岗岩均呈截然接触关系,其中 NWW 向湖子堆矿洞(HZDX)基性岩脉中暗色矿物颗粒较细小,可见有绿泥石化(图 5),局部可见碳酸盐化(方解石)。332 矿区(K332-2)附近的辉绿岩和张广营(ZGY)地区(337 矿区)的闪长玢岩均具有明显的辉绿结构,可见辉石矿物颗粒,无明显蚀变矿物。333 铀矿区附近采石场的辉绿岩和湖子堆矿洞 NEE 向辉绿玢岩(HZDS)均呈灰绿色,其组成的矿物相对新鲜。表 1 系统总结了下庄地区主要的基性岩脉及受其控制的矿床和矿化点,表中列出了不同基性岩脉的年龄以及与基性岩脉相关典型铀矿床的成矿时代。

2.2 测试方法

选取的样品经过破碎、筛选至 40~60 目,在双目镜下挑选,使角闪石的纯度大于 99%,用超声波洗净。将洗净后的样品封进石英管中,然后在核反应堆进行快中子辐照。本次样品辐照工作在中国原子能科学研究院核反应堆进行。使用 49-2 反应堆 H4 孔道进行中子活化,照射时间为 30h。同时,接受辐照的还有监测中子通量的 Ga1550 黑云母国际标样,采用 Ga1550 目前广泛引用的年龄标定值 98.79 ± 0.96 Ma(Renne *et al.*, 1998)。辐照后的样品放置到放射性剂量降至安全操作范围时,进行阶段升温测试工作。样品由中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素实验室 MM5400 惰性气体质谱仪测试。在对温控表和炉内温度进行校正后,所采用温度范围为 800~1400℃。数据经过本底校正、质量歧视校正、K 和 Ca 同位素反应校正、³⁷Ar 和 ³⁹Ar 放射性衰变校正。用 CaF₂ 和 K₂SO₄ 确定 Ca 和 K 同位素反应的校正参数: $(^{40}Ar/^{39}Ar)_K = 3.3 \times 10^{-4}$, $(^{36}Ar/^{37}Ar)_{Ca} = 2.69 \times 10^{-4}$, $(^{36}Ar/^{37}Ar)_{Ca} = 8.52 \times 10^{-4}$ 。年龄计算中衰变常数采用: $\lambda = (5.543 \pm 0.010) \times 10^{-10} a^{-1}$ (Steiger and Jäger, 1977)。数据不确定度为 95% 置信区间(2σ)。详细实验流程见王非等(2006)。

2.3 测试结果

粤北下庄地区基性岩脉中 5 个角闪石⁴⁰Ar-³⁹Ar 阶段升温测年数据见表 2 相应的坪年龄谱和反等时线年龄如图 7。在 800~1400℃ 温度范围内,对下庄地区基性岩脉的 5 个角闪石样品进行不同阶段的释热分析。其中, NWW 向第一组

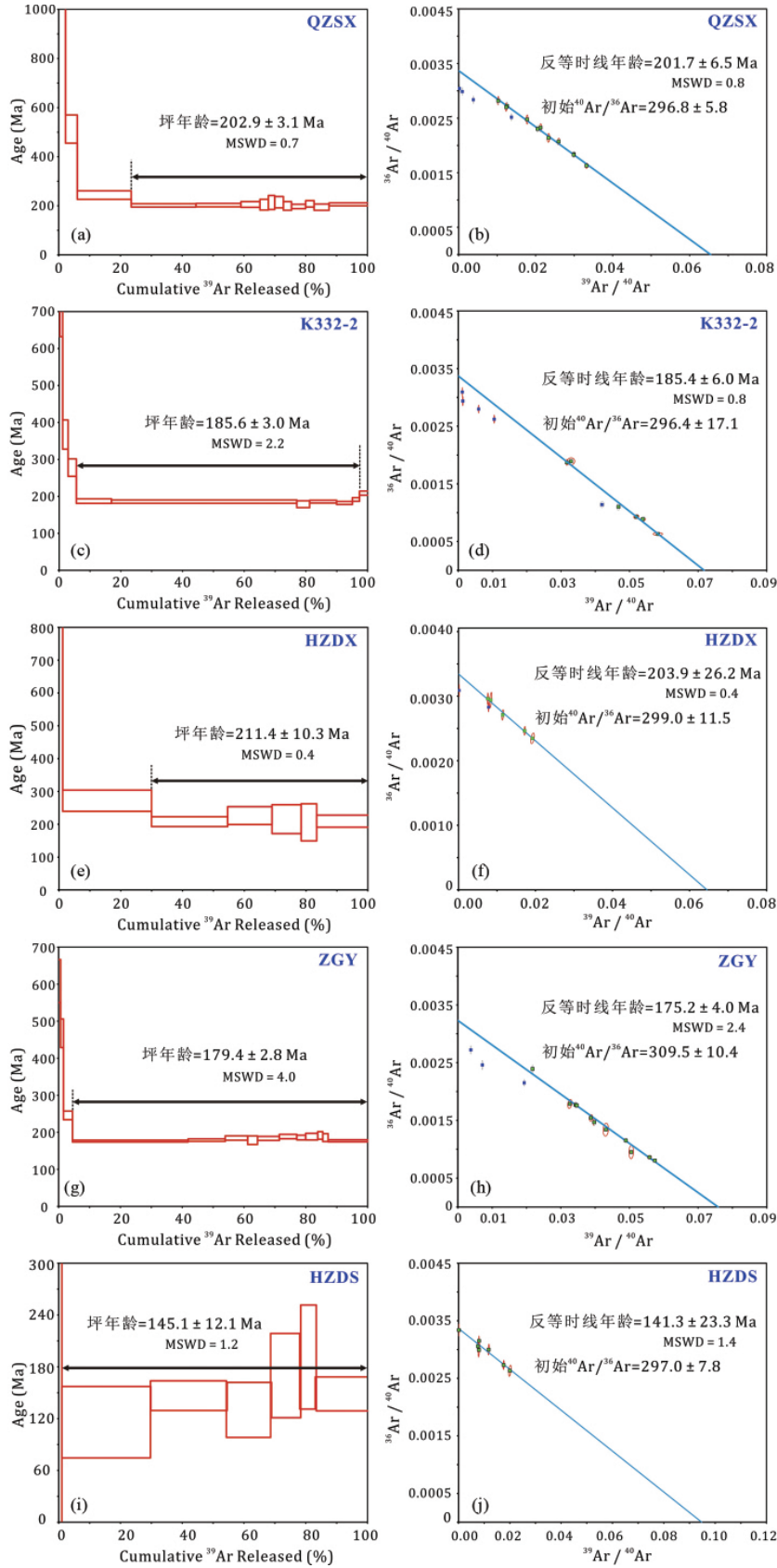


图7 粤北下庄地区基性岩脉中五个角闪石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄图和反等时线年龄图
 Fig. 7 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ age spectrum and inverse isochron for five hornblendes from the mafic dykes in the Xiazhuang uranium ore field, northern Guangdong

333 矿区采石场 (QZSX) 和 332 矿区 (K332-2) 基性岩脉的角闪石样品分别在 980 ~ 1400°C 和 1000 ~ 1230°C 获得坪年龄为 202.9 ± 3.1 Ma 和 185.6 ± 3.0 Ma (图 7a, c), 对应的 ^{39}Ar 释放量分别为 76.5% 和 94.4%。相应的 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 反等时线年龄分别为 201.6 ± 6.5 Ma (MSWD = 0.8) 和 185.4 ± 5.9 Ma (MSWD = 2.7) (图 7b, d), $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值分别为 296.8 ± 5.8 和 296.4 ± 17.1。NW 向第二组湖子堆矿洞 (HZDX) 基性岩脉的角闪石样品在 1020 ~ 1200°C 获得的坪年龄为 211.4 ± 10.3 Ma (MSWD = 0.4) (图 7e), 对应的 ^{39}Ar 释放量为 70%。相应的 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 反等时线年龄分别为 203.9 ± 26.2 Ma (MSWD = 0.4) (图 7f), $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值为 299.0 ± 11.5。张广营 (ZGY) 地区 (337 矿区) NEE 向基性岩脉的角闪石样品在 1020 ~ 1400°C 获得坪年龄为 179.6 ± 2.8 Ma (MSWD = 4.0) (图 7g), 对应 95.5% 的 ^{39}Ar 释放量。相应的 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 反等时线年龄为 175.2 ± 4.0 Ma (MSWD = 2.4) (图 7h), $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值为 309.5 ± 10.4。湖子堆矿洞附近 NNE 向晚期辉绿玢岩 (HZDS) 角闪石样品在 980 ~ 1200°C 获得的坪年龄为 145.1 ± 12.1 Ma (MSWD = 1.2) (图 7i), 对应 98.9% 的 ^{39}Ar 释放量。相应的 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 反等时线年龄为 141.3 ± 23.3 Ma (MSWD = 1.4), $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值为 297.0 ± 7.8 (图 7j)。

3 讨论

3.1 基性岩脉角闪石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及其可靠性

前人通过详细的基性岩脉 K-Ar 和 Ar-Ar 年代学研究, 获得下庄地区存在三期基性岩脉: 145 ~ 140 Ma、110 ~ 105 Ma 和 ~ 90 Ma (李献华等, 1997)。值得注意的是, 由于下庄矿区内基性岩脉大多出现了不同程度的热液蚀变, 当热液温度超过基性岩脉中含钾矿物放射性成因 Ar 的封闭温度时, 全岩 K-Ar 和 Ar-Ar 法所记录的年龄可能仅为后期蚀变作用或热事件的年龄, 而不一定是基性岩脉的侵位年龄。事实上, 研究显示下庄铀矿田中蚀变严重的基性岩脉中辉石几乎全部被交代成了纤闪石 (Wang *et al.*, 2015), 说明部分地区后期热液流体对基性岩脉中矿物的改造蚀变非常强烈。Wang *et al.* (2015) 采用 SHRIMP 锆石 U-Pb 方法获得 NW 向第二组黄陂-张广营基性岩脉的结晶年龄 193 ± 4 Ma, 含增生边的热液锆石年龄 177 ± 4 Ma 被认为是记录后期热事件的年龄。通常, 基性岩浆在上侵过程中会常常捕获基底和围岩中的锆石, 且基性岩浆本身往往难以结晶出大量锆石, 故基性岩脉中锆石 U-Pb 年龄是否能代表其自身的结晶年龄尚不确定。

中生代以来, 粤北地区遭受过多期次构造-岩浆-成矿作用事件的影响。角闪石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄图, 显示本次研究的这些基性岩脉中 5 个角闪石样品很可能受到一定程度的蚀变作用, 导致这些样品在低温阶段显示出明显的异常。即在低温阶段时坪年龄图表现出不规则, 但在整个高温阶段可以形成的稳定坪年龄。本文测试结果表明 (表 2), 5 个角闪石

样品的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄和 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 反等时线年龄在误差范围内基本一致, 由反等时线获得这些角闪石样品的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值均与现代大气氩同位素比值 (298.56 ± 0.31; Lee *et al.*, 2006) 在误差范围内一致, 表明角闪石形成时没有捕获过剩氩。因此, 五个样品的坪年龄可以代表这些基性岩脉中角闪石的结晶年龄。值得注意的是, 湖子堆矿洞辉绿玢岩 (HZDS) 样品在高温阶段中表现出视年龄稍微偏高且轻微不规则的坪年龄图, 可能是样品中矿物边部受到了轻微热液作用而导致在低温阶段出现 Ar 丢失现象。本文测定的第二组辉绿岩 (HZDX) 角闪石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄与其锆石 U-Pb 年龄 (193 ± 4 Ma, Wang *et al.*, 2015) 在误差范围内基本一致。同时, 野外地质特征显示 NW 向的第一组和第二组基性岩脉均被 NE 和 NEE 向基性岩脉切割 (图 1、图 6)。所以, 岩脉之间的穿插关系, 也支持第一组和第二组基性岩脉成岩时代偏老的地质事实。因此, 当基性岩脉样品的坪年龄图在高温阶段显示出轻微的不规则, 但整个高温阶段仍可以形成稳定的坪年龄, 且该年龄接近样品的成岩年龄。故采用角闪石 Ar-Ar 年龄定年方法可以获得下庄地区复杂的基性岩脉最接近的真实年龄。

精确厘定下庄基性岩脉的成岩时代, 对探讨基性岩脉与铀成矿关系可提供关键的时限约束, 尤其是对铀矿床成矿模型的建立具有至关重要的作用。因此, 为了进一步精确限定这些脉岩的侵位年龄, 笔者选择下庄地区与相应矿床走向相同的基性岩脉, 并尽可能远离矿区热液蚀变影响的基性岩脉样品。挑选出受热液影响最小的角闪石单矿物。本文对 NW 向第一组位于 332 铀矿区 (K332-2) 和 333 铀矿区附近采石场 (QZSX) 和第二组湖子堆矿洞 (HZDX) 基性岩脉样品, 采用单矿物角闪石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年法获得的年龄分别为 202.9 ± 3.0 Ma ~ 185.6 ± 3.0 Ma 和 211.4 ± 10.3 Ma。此外, NEE 向张广营 (ZGY) 地区 (337 矿区) 闪长玢岩中角闪石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄为 179.6 ± 2.8 Ma; NNE 向湖子堆矿洞辉绿玢岩 (HZDS) 的角闪石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄为 145.1 ± 12.1 Ma。近来, Zhang *et al.* (2018a) 通过 LA-ICP-MS 磷灰石 U-Pb 法, 获得下庄铀矿田相邻的赣南艾高铀矿区 NW 向基性岩脉年龄 ca. 190 Ma。同时, Wang *et al.* (2015) 利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法测定贵东岩体北部苦竹坑辉长岩脉年龄为 198 ± 1 Ma。综合这些研究工作 (李献华等, 1997; Wang *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2018a), 笔者认为下庄地区至少存在三期基性岩脉: 200 ~ 190 Ma、~ 180 Ma、145 ~ 140 Ma。

3.2 基性岩脉的侵位年龄与铀矿化年龄的关系

长久以来, 下庄铀矿田一直是我国学者研究花岗岩型铀矿床的典型范例。尽管, 花岗岩区铀的成矿作用与成岩时差问题很早就引起关注 (杜乐天, 1982; 胡瑞忠, 1989; 胡瑞忠等, 1993, 2004), 但早期获得的花岗岩、基性岩脉以及铀成矿年龄的准确性仍值得商榷。随着更多精确年龄数据的报道, 对这些铀矿床成因的认识也进一步深入。如前人认为下

表2 粤北下庄地区基性岩脉中五5个角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段升温测年数据Table 2 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ stepwise heating analytical data for five hornblendes from the mafic dykes in the Xiaozhuang uranium ore field, northern Guangdong

温度(°C)	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_k$	$^{40}\text{Ar}^*$	$^{39}\text{Ar}_k$	Age	$\pm 2s$
					(%)			
HZDS (J=0.0077030 ± 0.0000193)								
800	5465.50	158.4324	18.29163	84.30	1.33	1.03	904.8	1645.2
980	123.62	12.5814	0.39305	8.56	6.85	28.80	115.5	41.0
1020	55.95	17.4878	0.15761	10.94	19.25	24.69	146.2	17.6
1060	84.22	10.3714	0.25539	9.66	11.37	14.40	129.8	31.5
1100	130.81	12.8301	0.40341	12.76	9.65	9.47	169.5	49.2
1120	123.29	19.6043	0.37439	14.46	11.53	5.04	191.0	59.8
1200	49.00	21.7012	0.13481	11.09	22.22	16.58	148.3	20.1
HZDX (J=0.0077030 ± 0.0000193)								
800	5441.05	2.7109	16.80042	475.23	8.75	1.19	2783.3	457.7
980	126.67	12.4569	0.36155	21.05	16.44	28.76	271.7	32.2
1020	57.33	17.1829	0.14584	15.83	7.21	24.66	208.1	15.1
1060	86.16	10.9506	0.23647	17.32	9.91	14.37	226.4	27.3
1100	129.67	13.8715	0.38760	16.43	2.52	9.44	215.6	43.9
1120	117.00	21.7933	0.34979	15.66	3.13	5.02	205.9	56.7
1200	51.05	21.4858	0.12559	15.94	0.65	16.56	209.4	18.4
K332-3 (J=0.0077470 ± 0.0000194)								
800	744.33	6.4124	2.18773	98.90	13.21	0.26	1028.6	149.7
870	844.23	2.4939	2.61312	72.40	8.56	0.88	805.1	173.0
950	167.09	6.0094	0.46920	29.07	7.31	1.76	367.2	39.6
1000	94.95	3.6364	0.24998	21.44	2.51	2.68	277.9	23.7
1040	31.29	8.8038	0.06095	14.09	4.68	11.37	187.3	6.2
1070	16.99	11.9483	0.01393	13.97	1.36	60.11	185.8	4.4
1100	30.22	6.8477	0.05898	13.42	4.13	4.15	178.8	9.3
1140	19.09	9.5938	0.02032	13.96	2.54	8.73	185.7	3.7
1180	18.41	9.0324	0.01881	13.68	3.71	5.12	182.1	4.1
1230	21.26	7.4196	0.02542	14.43	7.44	2.32	191.6	5.0
1400	23.66	8.1517	0.02917	15.80	6.31	2.62	208.8	5.6
QZSX (J=0.0077200 ± 0.0000193)								
800	4429.94	33.3695	13.48742	460.16	0.09	0.50	2740.8	343.4
860	1060.46	16.9880	3.17228	126.24	1.73	1.69	1230.3	166.7
920	259.58	12.9674	0.73994	42.43	6.16	3.82	512.4	57.6
980	71.24	26.2980	0.18638	18.67	25.62	17.48	243.5	17.3
1010	32.79	22.4470	0.06632	15.27	5.68	20.97	201.5	6.7
1030	32.96	17.3595	0.06496	15.37	45.95	14.57	202.8	7.0
1050	48.21	14.5961	0.11502	15.58	1.92	6.16	205.4	11.5
1070	78.34	18.1253	0.21828	15.51	9.50	2.72	204.6	21.7
1090	95.12	25.9863	0.27516	16.24	6.69	2.05	213.5	28.6
1120	79.78	18.3752	0.22054	16.33	0.15	2.80	214.7	23.2
1150	54.96	25.6329	0.14292	15.09	6.86	2.65	199.3	17.4
1200	37.83	20.1227	0.08376	14.94	8.80	4.57	197.3	8.8
1250	42.15	19.4703	0.09540	15.77	6.80	2.75	207.8	13.1
1330	46.18	21.2742	0.11318	14.69	1.24	4.85	194.3	12.8
1400	29.49	24.2837	0.05457	15.62	51.86	12.42	205.8	5.8
ZGY (J=0.0077140 ± 0.0000193)								
930	257.36	33.0762	0.70931	51.85	19.58	0.65	608.4	58.0
960	135.98	34.0133	0.34370	38.23	27.30	0.92	467.4	38.6
990	51.02	15.2784	0.11381	18.86	6.47	2.91	245.6	11.5
1020	17.19	15.3895	0.01798	13.27	6.21	37.42	176.3	2.4

续表 2

Continued Table 2

温度(°C)	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	³⁷ Ar/ ³⁹ Ar	³⁶ Ar/ ³⁹ Ar	⁴⁰ Ar* / ³⁹ Ar _k	⁴⁰ Ar*	³⁹ Ar _k	Age	±2s
					(%)			
1040	20.21	12.6625	0.02668	13.48	5.98	12.02	178.9	3.3
1070	28.87	12.5563	0.05446	13.92	7.71	7.24	184.5	5.8
1100	45.33	15.0133	0.11246	13.46	9.32	3.19	178.7	11.6
1130	28.50	15.0248	0.05424	13.85	47.96	7.08	183.5	5.4
1160	24.85	14.3041	0.04033	14.25	6.63	5.64	188.6	5.9
1190	25.30	22.0850	0.04502	14.02	54.38	2.87	185.7	6.2
1220	19.54	15.3697	0.02274	14.23	71.87	3.89	188.3	9.0
1250	29.96	26.6590	0.06067	14.48	7.23	1.66	191.5	10.3
1280	22.86	17.1287	0.03524	14.01	60.41	1.73	185.6	10.6
1400	17.68	14.3503	0.01913	13.33	74.49	12.77	177.0	2.7

庄地区与帽峰岩体密切相关的 337 矿床(~ 135Ma) 是成矿温度高(290 ~ 340°C)、矿岩时差小的岩浆热液矿床的典型代表(倪师军, 1987; 吴烈勤等, 2003)。然而, 矿区内与铀成矿密切相关的下庄岩体、帽峰岩体和笋洞岩体年龄分别为 235. 8 ± 7. 6Ma、219. 6 ± 0. 9Ma 和 189. 1 ± 0. 7Ma(徐夕生等, 2003; 凌洪飞等, 2005; Chen *et al.*, 2012)。显而易见, 如此巨大的矿岩时差(至少 ~ 50Myr), 基本可排除下庄地区与花岗岩有关的岩浆热液型铀矿床的存在。

目前, 铀成矿年龄的统计结果表明华南地区不同类型的铀矿床有着大致六个主成矿期: ~ 135Ma、120 ~ 115Ma、105 ~ 100Ma、90 ~ 85Ma、75 ~ 70Ma 和 50 ~ 45Ma(胡瑞忠等, 2004, 2007; Hu *et al.*, 2008; Luo *et al.*, 2015a, b), 且与华南岩石圈伸展作用事件的时间具有较好的对应关系(胡瑞忠等, 2004, 2007, 2015; 王正其和李子颖, 2007; 朱捌, 2010; Hu *et al.*, 2008; Luo *et al.*, 2015a, b)。同时, 胡瑞忠等(2007) 明确指出以往的研究工作主要从大区域角度初步证实这种对应关系, 在矿田(床) 尺度范围内基性岩脉与铀成矿年龄的对应关系还有待进一步证实。本文获得的角闪石 Ar-Ar 年龄进一步确认下庄地区发育 NNE 向 145 ~ 140Ma 的基性岩脉。结合前人已报道的下庄矿田邻区的长江铀矿区内辉绿岩(角闪石 Ar-Ar: 145. 1 ± 1. 5Ma, Zhang *et al.*, 2018b) 和大吉山钨矿区角闪辉绿岩(全岩 K-Ar: 139. 9 ± 2. 8Ma, 李献华等, 1997; 142. 4 ± 2. 5Ma, Xie *et al.*, 2006a), 江西武山铜矿区闪斜煌斑岩(全岩 Ar-Ar: 139. 7 ± 2. 1Ma ~ 143. 5 ± 2. 7Ma) 和 640 铀矿区拉辉煌斑岩(全岩 Ar-Ar: 139. 8 ± 2. 8Ma, Xie *et al.*, 2006a), 以及切穿湖南千里山花岗岩的 NE 向辉绿岩脉(全岩 Ar-Ar: 142. 3 ± 2. 8Ma, 刘义茂等, 1997) 等同期基性岩脉, 暗示了该期基性岩脉在南岭地区广泛发育, 表明南岭地区在这一时期处在广泛的岩石圈伸展构造背景。同时, 该期基性岩脉的侵位年龄与下庄铀矿区内最早的铀矿化年龄 135 ± 4Ma 基本对应, 进一步证实了在矿田尺度上铀的成矿作用与岩石圈的伸展作用存在时间上的对应关系(胡瑞忠等, 2004, 2007; Hu *et al.*, 2008; Luo *et al.*,

2015a)。

3.3 下庄地区 200 ~ 190Ma(角闪石 Ar-Ar) 基性岩脉的构造意义

华南地区侏罗纪早期的岩浆活动对限定中生代以来华南板块的构造演化至关重要。本研究利用角闪石 Ar-Ar 法新获得的下庄两组 NWW 向基性岩脉和一组 NEE 向基性岩脉的年龄为 200 ~ 180Ma, 这些基性岩脉的年龄与 Wang *et al.* (2015) 报道的下庄基性岩脉锆石 U-Pb 年龄在误差范围内总体一致, 进一步证实粤北下庄地区存在早侏罗世的基性岩浆活动。尽管与其对应期次的铀矿化年龄迄今还未见报道, 但这些早期基性岩脉的存在对铀成矿作用的认识(下文详述) 及区域地质构造演化具有极其重要的地质意义。Zhou *et al.* (2006) 认为华南地区早中生代的岩浆活动(250 ~ 205Ma) 与印支期碰撞造山密切相关, 而晚中生代的岩浆作用主要受太平洋板块 NW-NWW 向俯冲的影响。在 205 ~ 180Ma 存在一个明显的岩浆间歇期, 代表了华南大地构造背景由特提斯构造域向太平洋构造域的转换(舒良树和周新民, 2002; Zhou *et al.*, 2006)。陈培荣等(2002) 则提出华南地区出现的 180 ~ 150Ma 双峰式火山和碱性玄武岩是印支期碰撞造山后大陆裂解的产物。在下庄及其邻区赣南隘高出现 200 ~ 180Ma 的基性岩脉, 为约束印支期碰撞造山后华南大陆伸展裂解作用的时限提供了新的证据。近年来, 越来越多的研究发现, 华南地区可能广泛存在 200 ~ 180Ma 的岩浆活动, 而非前人认为的岩浆寂静期, 如粤北下庄辉绿岩(~ 193Ma, Wang *et al.*, 2015)、苦竹坑辉长岩(~ 198Ma, Wang *et al.*, 2015) 和霞岚辉长岩(~ 195Ma, Zhu *et al.*, 2010; Yu *et al.*, 2010), 江西白面石和东坑玄武岩(194 ~ 188Ma, 项媛馨和巫建华, 2012; Cen *et al.*, 2016), 赣南程龙和车步辉长岩(197 ~ 191Ma; 王国昌, 2016), 赣南寨背、柯树北、珠兰埠和陂头 A-型花岗岩及塔背正长岩(189 ~ 177Ma, 陈培荣等, 2004; Li and Li, 2007; He *et al.*, 2010; Jiang *et al.*, 2017; 王国昌, 2016) 和闽西北光泽 A-型花岗岩

(~189Ma, 王国昌, 2016) 等。这些岩体(195~180Ma)和基性岩脉(200~190Ma)的陆续发现,表明华南地区此刻处在伸展构造地质背景,标志着印支期碰撞造山作用发生后华南地区岩石圈伸展作用可能至少在200~190Ma已经开始。

3.4 基性岩脉与铀成矿作用关系

在世界范围内,学者们很早就注意到基性岩脉(煌斑岩墙)与热液铀矿的形成密切相关(Cuney, 1978; Leroy, 1978; 王炎庭, 1986; 胡瑞忠, 1989; Ruzicka, 1993; 胡瑞忠等, 1993, 2007; Johnson and Cross, 1995; Hu *et al.*, 2008),尤其是法国中央地块中的海西期热液铀矿床与我国华南花岗岩型铀矿最为典型(王炎庭, 1986; 胡瑞忠, 1989; 胡瑞忠等, 1993, 2007; Hu *et al.*, 2008; 杜乐天, 2015)。前人对基性岩脉与铀成矿作用关系的研究从未间断,早期的工作认为基性岩浆活动提供了大量矿化剂(富CO₂的流体),从而有利于成矿流体的形成以及基性岩脉中高的Fe²⁺含量有利于成矿流体中U⁶⁺还原形成沥青铀矿沉淀(胡瑞忠, 1989, 1990; 胡瑞忠和金景福, 1990; 王学成等, 1991; 胡瑞忠等, 1993, 2004)。邓平等(2003a)通过对仙石铀矿床成矿流体中碳和H-O同位素的解析,提出幔源流体参与铀矿作用。目前,对成矿物质中铀的来源也存在不同认识:(1)主要来自赋矿花岗岩围岩(胡瑞忠, 1989; 朱捌等, 2006; 商朋强, 2007; Hu *et al.*, 2008; 凌洪飞, 2011; 骆金诚, 2015);(2)直接来自与基性岩脉具有相似源区性质的岩石圈富集地幔(姜耀辉等, 2004; 王正其和李子颖, 2007; 王正其等, 2010)。因此,要查明基性岩脉与铀成矿关系的本质,诚如王学成等(1991)所说:实质上是要解决铀成矿过程中源-运-储有关的三个基本问题:

(一)基性岩脉能否为铀成矿提供铀源?前人对基性岩脉中铀的分布特征及含量已开展过相应研究工作,认为基性岩脉并不太可能为铀成矿提供铀源(Leroy, 1978; 王学成, 1991)。尤其是,王学成等(1991)系统研究了华南产铀岩体和非产铀岩体中基性岩脉的铀含量,发现不同地区基性岩脉中铀的平均含量无明显区别,集中在 $2.4 \times 10^{-6} \sim 2.7 \times 10^{-6}$ 。结合花岗岩中铀的含量及其活动性,基本可以确定基性岩脉不太可能为花岗岩型铀矿床提供铀源。对于花岗岩型铀矿床中铀的来源,事实上在四十年前国际学者已达成共识,铀主要来自赋矿花岗岩(Cuney, 1978; Leroy, 1978),主要证据:(1)花岗岩的含铀量及活性,明显高于基性岩,且铀矿区内赋矿花岗岩中通常大量出现晶质铀矿(Leroy, 1978; 王学成等, 1991; 张展适, 2011; Chen *et al.*, 2012);(2)铀矿物或铀矿石稀土元素配分模式与赋矿花岗岩类似,而与基性岩脉的稀土配分模式差异明显,说明铀矿物中的铀主要来自赋矿花岗岩(朱捌等, 2006; 张展适, 2011; Mercadier *et al.*, 2011; 骆金诚, 2015);(3)花岗岩中的铀主要以含铀副矿物和固定晶格铀的形式存在于黑云母及其所包裹的副矿物中,发生交代作用后,云母中的裂隙铀、黑云母晶格中以及

其包裹的副矿物中的固定铀均容易迁移活化运移(倪师军, 1987; 程华汉和杜乐天, 1998; 卢海萍等, 2003)。

(二)基性岩脉能否为铀的运移提供有利条件?由于岩浆的氧逸度达不到铀形成U⁶⁺所需条件,铀不会大量进入岩浆分异出的热液中(碱性和富卤素岩浆除外),因此,很少有岩浆热液铀矿床的出现(凌洪飞, 2011)。故此处探讨的是指与赋矿花岗岩存在较大成岩成矿时差的花岗岩型铀矿床。通常,花岗岩区的基性岩脉是该地区较晚期岩浆活动的产物,在时间上基性岩脉的侵位年龄往往与铀成矿作用的年代较为接近。针对这一特点,一些学者提出基性岩脉所代表的岩浆活动可以为铀的活化提供矿化剂ΣCO₂(Leroy, 1978; 胡瑞忠, 1989, 1990; 胡瑞忠等, 1993; Hu *et al.*, 2008)。论证这一问题的关键在于确定岩脉的侵位与铀矿化事件的年龄。基于目前下庄地区获得的基性岩脉年龄与铀矿化年龄数据,笔者认为在大的区域尺度上,下庄矿田铀矿化的年龄与基性岩脉的侵位具有很好的对应关系,但还需从矿床尺度上进一步证实。如下庄矿区内目前识别出最早期矿化的仙石矿床(339)和石土岭(337)(~135Ma, 朱捌等, 2006; Luo *et al.*, 2015a)与本文获得的145~140Ma基性岩脉在年龄上较为接近,且稍晚于基性岩脉的侵位。因此,在矿床尺度上铀矿化年龄与基性岩脉的侵位年龄接近时,前述观点可以合理的解释基性岩脉为铀的活化提供矿化剂ΣCO₂。

值得指出的是,近来发现在矿床尺度上基性岩脉明显早于铀矿化的现象,如赣南隘高铀矿区内基性岩脉的侵位早于铀矿化作用~120Ma(Zhang *et al.*, 2018a);下庄矿田内新识别的基性岩脉年龄200~180Ma,显而易见,比矿区内已确认最老的仙石(339)和337矿床的铀矿化年龄(~135Ma)至少早~45Ma(Wang *et al.*, 2015; Luo *et al.*, 2015a; 本文)。针对本研究中第一组~200Ma基性岩脉及其相关的332和333铀矿床而言,基性岩脉的侵位明显比332和333铀矿床中铀的成矿作用时代(55~165Ma; 徐达忠等, 1999; 吴烈勤等, 2003)更早。虽然,目前还没有与其对应期次的铀矿化年龄的报道,但笔者认为并不能否认在铀矿床的形成过程中,区域上与铀矿化同期或接近的基性岩浆活动可为铀的活化提供矿化剂ΣCO₂的可能性。主要存在三方面的证据:(1)在下庄地区乃至整个华南地区,与铀矿化作用密切相关的成矿阶段方解石δ¹³C = -8.5‰ ~ -3.1‰,主体值范围接近地幔流体δ¹³C = -8.0‰ ~ -4.0‰,表明成矿流体中碳(矿化剂ΣCO₂)主要来源于地幔(胡瑞忠, 1989, 1990; 胡瑞忠等, 1993; Hu *et al.*, 2008; 邓平等, 2003a; 朱捌等, 2006; 张展适, 2011);(2)与沥青铀矿伴生的黄铁矿³He/⁴He = 0.06 ~ 1.04Ra,显示下庄铀矿He具有壳-幔混合来源的特征,表明地幔流体参与了铀成矿作用(王学成等, 1991; 商朋强, 2007; 张展适, 2011);(3)部分矿床中矿化阶段石英的H-O同位素显示有岩浆水参与铀成矿,如小水、337和339等矿床(邓平等, 2003a; 朱捌等, 2006; 王正其等, 2007; 张展适, 2011)。所以,当基性岩脉与相关铀矿床(是指铀矿体与基性

岩脉存在空间上的接触关系) 的成岩与铀成矿作用年龄存在巨大差异时, 只能说明该矿床内早期形成的基性岩脉并不能为后期铀的运移提供矿化剂 ΣCO_2 和/或流体。然而, 铀矿区内与基性岩脉侵位密切相关的深大断裂可联通岩石圈地幔, 当岩石圈发生广泛的伸展作用时, 可通过控制幔源矿化剂 ΣCO_2 的提供与铀成矿作用发生联系, 且伸展拉张的时代大致反映了向地壳浅层热液体系提供幔源矿化剂 ΣCO_2 的时代(胡瑞忠等, 1993, 2004)。这与前述下庄铀矿区内基性岩脉的侵位年龄明显早于铀的矿化作用年龄时, 铀成矿过程中仍有地幔流体的参与(如方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ 和黄铁矿的 He-Ar 同位素证据) 相印证。基于此, 笔者认为此时与深大断裂密切相关的基性岩脉仍可为地幔脱气作用(矿化剂 ΣCO_2) 提供流体的运移通道, 进而促进铀的成矿作用。

(三) 基性岩脉能否为铀的沉淀富集提供场所? 下庄地区广泛发育的“交点型”铀矿, 为这一论点提供了实例。王学成等(1991) 从基性岩脉中本身的机械物理性质和化学成分特征方面做了详细探讨, 论证了基性岩脉对铀的沉淀富集主要在于基性岩脉与花岗岩的物理、化学性质截然不同, 而导致两者接触处形成的“界面效应”。近来, 研究发现粤北铀矿区内基性岩脉的侵位比铀成矿作用事件早很多(即基性岩脉的侵位年龄与铀的矿化年龄存在巨大时差), 有学者提出基性岩脉并不能为后期铀的成矿作用提供矿化剂 ΣCO_2 , 但基性岩脉中 Fe^{2+} 还是可作为还原剂促使成矿流体中 U^{6+} 还原沉淀形成铀矿物(Wang *et al.*, 2015)。基性岩脉比寄主花岗岩的更具有还原特性, 尤其是含大量含铁矿物黑云母、角闪石和辉石, 这些矿物可以促进氧化性流体中铀的沉淀作用(Raffensperger and Garven, 1995; Tappa *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2015), 如 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-} + 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + 2\text{Ca}^{2+} + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{UO}_2 + 3\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ 和/或 $\text{UO}_2\text{F}_4^{2-} + 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + 2\text{Ca}^{2+} + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{UO}_2 + 3\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{CaF}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 。矿区内强烈蚀变的基性岩脉中出现广泛的赤铁矿化及伴随大量的方解石-铀矿床出现(图 4), 也证实了这一过程的存在。

综上所述, 当铀矿区内基性岩脉与铀矿体存在空间联系时: (1) 若基性岩脉的侵位时代与铀的成矿作用年龄接近时, 与基性岩脉相应的岩浆活动可为铀的矿化作用提供矿化剂 ΣCO_2 和/或流体, 且基性岩脉还可为铀的沉淀富集提供理想的条件(胡瑞忠, 1989, 1990; 胡瑞忠和金景福, 1990; 王学成等, 1991; 胡瑞忠等, 1993; Hu *et al.*, 2008); (2) 若基性岩脉的侵位早于铀的成矿作用, 与基性岩脉密切相关的深大断裂可为铀成矿作用提供流体(矿化剂 ΣCO_2) 运移的通道, 同时基性岩脉也可为后期铀的沉淀富集提供场所, 进而促进铀的成矿作用。目前, 这一认识能够很好的解释粤北下庄地区基性岩脉与铀矿化之间的成因联系。

但须需注意的是, 华南某些花岗岩型铀矿区内基性岩脉并不十分发育, 个别矿区甚至缺失基性岩脉的现象(胡瑞忠等, 1993), 此种条件下铀又是如何沉淀富集成矿? 因此, 当矿区内存在基性岩脉且与铀矿体无直接联系, 此类基性岩脉

对铀的沉淀富集机理的认识还值得进一步深入探讨。

4 结语

本文采用单矿物角闪石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 定年方法, 获得粤北下庄地区 NWW 向第一组和第二组辉绿岩脉侵位年龄 200 ~ 190Ma, 新识别出一期 NEE 向辉绿岩年龄 ~ 180Ma 以及 NNE 向辉绿岩脉年龄 145 ~ 140Ma。综合前人已有的研究, 笔者认为粤北下庄地区至少发育三期基性岩脉, 且华南地区在 200 ~ 190Ma 和 145 ~ 140Ma 期间可能存在广泛的岩石圈伸展作用。粤北地区识别出 200 ~ 190Ma 基性岩脉, 标志着华南地区在印支期碰撞造山作用结束后岩石圈伸展裂解作用可能至少在 200 ~ 190Ma 已经开始。

结合成岩成矿作用的时差以及铀矿体与基性岩脉的时空关系, 笔者认为基性岩脉与铀成矿作用的联系, 极大地受成岩成矿作用时差的制约。尤其值得注意的是, 精确厘定基性岩脉的侵位时代与铀的成矿作用年龄, 是探讨基性岩脉与铀成矿作用关系的前提。当基性岩脉与铀的成矿作用年龄接近或具有对应关系时, 基性岩脉不仅可以提供幔源流体(ΣCO_2 矿化剂) 参与铀的成矿作用, 也可为铀的沉淀富集提供理想场所(还原障); 当基性岩脉明显早于铀的矿化作用时, 基性岩脉不仅能为后期铀的沉淀富集提供条件, 且与基性岩脉相关的深大断裂也可为幔源流体(ΣCO_2 矿化剂和/或 He) 参与铀的成矿过程提供运移通道。因而, 当铀矿区内基性岩脉与铀矿体存在密切的接触关系时, 无论基性岩脉的侵位与铀的矿化作用是否存在时差, 笔者认为基性岩脉均可为后期铀的沉淀富集提供场所, 进而促进铀的成矿作用。

因此, 只有在深入剖析典型铀矿区内基性岩脉与铀成矿作用的联系后, 才能为后期寻找同种类型铀矿床提供可靠的科学依据。未来, 可在已确定目标花岗岩体为富铀岩体的前提下, 重点寻找切割花岗岩体且与硅化、碳酸盐化和绿泥石化等密切相关的蚀变基性岩脉, 进而有利于逐步缩小勘探靶区范围。需要指出的是, 铀矿区内基性岩脉年龄的精确测定, 值得更加深入的研究和广泛的关注, 它对铀矿床成矿模型的建立和未来找矿勘探的导向至关重要。相信在不久的将来, 随着越来越多精确的成岩成矿年龄工作的报道, 定会引起人们对先前提出的铀矿床成因认识和成矿模型的不思考。

致谢 感谢凌洪飞教授和谢桂青研究员详细地审阅本文, 并提出了诸多宝贵的修改建议。中国科学院地质与地球物理研究所杨列坤老师在角闪石 Ar-Ar 年龄测定过程中给予了帮助; 东华理工大学张展适教授为本文的撰写提供了重要的文献资料; 特此致谢。

References

Cen T, Li WX, Wang XC, Pang CJ, Li ZX, Xing GF, Zhao XF and Tao

- JH. 2016. Petrogenesis of Early Jurassic basalts in southern Jiangxi Province, South China: Implications for the thermal state of the Mesozoic mantle beneath South China. *Lithos*, 256 – 257: 311 – 330
- Chen AF and Zhao HB. 1986. Fluid inclusion study of the Xiaozhuang uranium deposit. *Geochimica*, (2): 174 – 182 (in Chinese with English abstract)
- Chen PR, Hua RM, Zhang BT, Lu JJ and Fan CF. 2002. Early Yanshanian post-orogenic granitoids in the Nanling region: Petrological constraints and geodynamic settings. *Science in China (Series D)*, 45(8): 755 – 768
- Chen PR, Zhou XM, Zhang WL, Li HM, Fan CF, Sun T, Chen WF and Zhang M. 2005. Petrogenesis and significance of Early Yanshanian syenite-granite complex in eastern Nanling Range. *Science in China (Series D)*, 48(7): 912 – 924
- Chen XD and Shi LB. 1983. Primary study on diabase dyke swarms in Wutai-Taihang area. *Chinese Science Bulletin*, (16): 1002 – 1005 (in Chinese)
- Chen YW, Bi XW, Hu RZ and Dong SH. 2012. Element geochemistry, mineralogy, geochronology and zircon Hf isotope of the Luxi and Xiaozhuang granites in Guangdong Province, China: Implications for U mineralization. *Lithos*, 150: 119 – 134
- Cheng HH and Du LT. 1998. Study on heavy minerals of some uranium deposits. *Uranium Geology*, 14(1): 26 – 31 (in Chinese with English abstract)
- Cuney M. 1978. Geologic environment, mineralogy, and fluid inclusions of the Bois Noirs-Limouzat uranium vein, Forez, France. *Economic Geology*, 73(8): 1567 – 1610
- Deng P, Shen WZ, Ling HF, Ye HM, Wang XC, Pu W and Tan ZZ. 2003a. Uranium mineralization related to mantle fluid: A case study of the Xianshi deposit in the Xiaozhuang uranium ore field. *Geochimica*, 32(6): 520 – 528 (in Chinese with English abstract)
- Deng P, Shen WZ, Ling HF, Ye HM, Wang XC and Tan ZZ. 2003b. Uranium mineralization related to mantle fluid of 338 deposit in the Xiaozhuang uranium field. *Uranium Geology of South China*, 20(2): 37 – 47 (in Chinese with English abstract)
- Ding RQ. 2002. Discussion on economic amenability of “intersection”-type uranium deposit in Xiaozhuang area. *Uranium Geology*, 18(6): 348 – 351, 358 (in Chinese with English abstract)
- Ding RQ and Liang TX. 2003. Preliminary discussion on tectonic-magmatic evolution with respect to metallogenesis of rich uranium deposits in Xiaozhuang ore-field. *Uranium Geology*, 19(1): 21 – 27 (in Chinese with English abstract)
- Du LT. 1982. On the Granite-type Uranium Deposits. Beijing: Atomic Energy Press, 1 – 404 (in Chinese)
- Du LT. 2015. Global Hydrothermal Deposit Geochemistry: Re-developing the Contemporary Metallogenic Theory for International Hydrothermal Uranium Deposit. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 143 (in Chinese)
- Ernst RE, Head JW, Parfitt E, Grosfils E and Wilson L. 1995. Giant radiating dyke swarms on earth and Venus. *Earth-Science Reviews*, 39(1–2): 1 – 58
- Feng ZJ, Lai ZX, Mo JH, Hu F and Yang W. 2016. A study of metallogenic mechanism of “intersection” type uranium deposit and exploration thinking of Xiaozhuang orefield. *Mineral Deposits*, 35(5): 1047 – 1061 (in Chinese with English abstract)
- Ge XY, Li XH and Zhou HW. 2003. Geochronologic, geochemistry and Sr-Nd isotopes of the Late Cretaceous mafic dike swarms in southern Hainan Island. *Geochimica*, 32(1): 11 – 20 (in Chinese with English abstract)
- Halls HC. 1982. The importance and potential of mafic dyke swarms in studies of geodynamic processes. *Geoscience Canada*, 9(3): 145 – 154
- He DB. 2017. Comparative study of different types of uranium deposits in the Xiaozhuang ore field, North Guangdong, China. Ph. D. Dissertation. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology, 1 – 182 (in Chinese with English summary)
- He ZY, Xu XS and Niu YL. 2010. Petrogenesis and tectonic significance of a Mesozoic granite-syenite-gabbro association from inland South China. *Lithos*, 119(3–4): 621 – 641
- Hu RZ and Jin JF. 1988. Genesis and origin of the Guidong granitic batholith. *Journal of Chengdu College of Geology*, 15(3): 17 – 25 (in Chinese with English abstract)
- Hu RZ. 1989. Mineralizing mechanism of XW uranium deposit. *Journal of Chengdu College of Geology*, 16(3): 1 – 9 (in Chinese with English abstract)
- Hu RZ. 1990. A possible mineralization model of granite-type uranium deposit. *Chinese Science Bulletin* 35(21): 1822 – 1826
- Hu RZ and Jin JF. 1990. Mechanism of the migration and deposition of uranium in ascending hydrothermal solutions: Evidence from the Xiwang uranium deposit. *Geology Review*, 36(4): 317 – 325 (in Chinese with English abstract)
- Hu RZ, Li CY, Ni SJ, Liu J and Yu JS. 1993. Research on ΣCO_2 source in ore-forming hydrothermal solution of granite-type uranium deposit, South China. *Science in China (Series B)*, 36(10): 1252 – 1262
- Hu RZ, Bi XW, Su WC, Peng JT and Li CY. 2004. The relationship between uranium metallogenesis and crustal extension during the Cretaceous-Tertiary in South China. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 153 – 160 (in Chinese with English abstract)
- Hu RZ, Bi XW, Peng JT, Liu S, Zhong H, Zhao JH and Jiang GH. 2007. Some problems concerning relationship between Mesozoic-Cenozoic lithospheric extension and uranium metallogenesis in South China. *Mineral Deposits*, 26(2): 139 – 152 (in Chinese with English abstract)
- Hu RZ, Bi XW, Zhou MF, Peng JT, Su WC, Liu S and Qi HW. 2008. Uranium metallogenesis in South China and its relationship to crustal extension during the Cretaceous to Tertiary. *Economic Geology*, 103(3): 583 – 598
- Hu RZ, Burnard PG, Bi XW, Zhou MF, Peng JT, Su WC and Zhao JH. 2009. Mantle-derived gaseous components in ore-forming fluids of the Xiangshan uranium deposit, Jiangxi Province, China: Evidence from He, Ar and C isotopes. *Chemical Geology*, 266(1–2): 86 – 95
- Hu RZ, Mao JW, Hua RM and Fan WM. 2015. Intra-continental Mineralization of South China Craton. Beijing: Science Press, 1 – 903 (in Chinese)
- Jiang YH, Jiang SY and Ling HF. 2004. Mantle-derived fluids and uranium mineralization. *Earth Science Frontiers*, 11(2): 491 – 499 (in Chinese with English abstract)
- Jiang YH, Wang GC, Qing L, Zhu SQ and Ni CY. 2017. Early Jurassic A-type granites in Southeast China: Shallow dehydration melting of Early Paleozoic granitoids by basaltic magma intraplating. *The Journal of Geology*, 125(3): 351 – 366
- Johnson JP and Cross KC. 1995. U-Pb geochronological constraints on the genesis of the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag deposit, South Australia. *Economic Geology*, 90(5): 1046 – 1063
- Lai SC and Xu HJ. 1993. Characteristics of lamprophyre in the area of Maopai gold field and its relationship with gold mineralization. *Gold*, 14(8): 7 – 11 (in Chinese with English abstract)
- Lee JY, Marti K, Severinghaus JP, Kawamura K, Yoo HS, Lee JB and Kim JS. 2006. A redetermination of the isotopic abundances of atmospheric Ar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(17): 4507 – 4512
- Leroy J. 1978. The Margnac and Fanay uranium deposits of the La Crouzille district (Western Massif Central, France): Geologic and fluid inclusion studies. *Economic Geology*, 73(8): 1611 – 1634
- Li JH, He WY and Qian XL. 1997. Genetic mechanism and tectonic setting of Proterozoic mafic dyke swarm: Its implication for paleoplate reconstruction. *Geological Journal of China Universities*, 3(3): 272 – 281 (in Chinese with English abstract)
- Li LS and Xie YH. 2011. A study of geological characteristics and alteration of wall rock in Aigao uranium deposit. *Technology and Life*, (11): 91 – 94 (in Chinese)
- Li XH, Hu RZ and Rao B. 1997. Geochronology and geochemistry of Cretaceous mafic dikes from northern Guangdong, SE China.

- Geochimica, 26(2): 14–31 (in Chinese with English abstract)
- Li ZX and Li XH. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35(2): 179–182
- Ling HF, Shen WZ, Deng P, Jiang SY, Gao JF, Ye HM, Pu W and Tan ZZ. 2004. Age, geochemistry and petrogenesis of the Sundong granite, northern Guangdong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 413–424 (in Chinese with English abstract)
- Ling HF, Shen WZ, Deng P, Jiang SY, Jiang YH, Qiu JS, Huang GL, Ye HM and Tan ZZ. 2005. Study of geochemistry and petrogenesis of the Maofeng granite, northern Guangdong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 677–687 (in Chinese with English abstract)
- Ling HF. 2011. Origin of hydrothermal fluids of granite-type uranium deposits: Constraints from redox conditions. *Geological Review*, 57(2): 193–206 (in Chinese with English abstract)
- Liu RZ. 2003. Several questions discussion of intersection-type uranium deposit. *Uranium Geology of South China*, 20(1): 41–48 (in Chinese with English abstract)
- Liu YM, Dai TM, Lu HZ, Xu YZ, Wang CL and Kang WQ. 1997. ⁴⁰Ar-³⁹Ar and Sm-Nd isotopes ages of rock-forming and ore-forming for Qianlishan granite. *Science in China (Series D)*, 27(5): 425–430 (in Chinese)
- Lu HP, Wang RC, Lu XC, Xu SJ, Chen J and Gao JF. 2003. Dissolution of zircon at 180°C hydrothermal condition. *Progress in Nature Sciences*, 13(10): 1042–1047 (in Chinese)
- Luo JC. 2015. Genesis of granite-hosted uranium deposits in the northern Guangdong, China: Constraints from mineralogy, uranium mineral U-Pb geochronology and geochemistry. Ph. D. Dissertation. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 1–162 (in Chinese with English summary)
- Luo JC, Hu RZ, Fayek M, Li CS, Bi XW, Abdu Y and Chen YW. 2015a. In-situ SIMS uraninite U-Pb dating and genesis of the Xianshi granite-hosted uranium deposit, South China. *Ore Geology Reviews*, 65: 968–978
- Luo JC, Hu RZ and Shi SH. 2015b. Timing of uranium mineralization and geological implications of Shazijiang granite-hosted uranium deposit in Guangxi, South China: New constraint from chemical U-Pb age. *Journal of Earth Science*, 26(6): 911–919
- Luo JC, Hu RZ, Fayek M, Bi XW, Shi SH and Chen YW. 2017. Newly discovered uranium mineralization at ~2.0Ma in the Menggongjie granite-hosted uranium deposit, South China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 137: 241–249
- Mercadier J, Cuney M, Lach P, Boiron MC, Bonhoure J, Richard A, Leisen M and Kister P. 2011. Origin of uranium deposits revealed by their rare earth element signature. *Terra Nova*, 23(4): 264–269
- Ni SJ. 1987. Characteristics of REE geochemistry and source material of the uranium deposit No. 337. *Journal of Chengdu College of Geology*, 14(4): 18–28 (in Chinese with English abstract)
- Peng P. 2005. Petrogenesis and tectonic significance of the ca. 1.8Ga mafic dyke swarms in the central North China Craton. Ph. D. Dissertation. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 1–178 (in Chinese with English summary)
- Qi YQ, Hu RZ, Liu S, Feng CX, Tian JJ, Feng GY and Wang T. 2011. Geochemical characteristics of the Yanshanian mafic dykes in the Jinqiu basin, Gan-Hang tectonic belt and its petrogenesis. *Acta Geologica Sinica*, 85(3): 354–365 (in Chinese with English abstract)
- Qi YQ, Hu RZ, Liu S, Coulson IM, Qi HW, Tian JJ, Feng CX and Wang T. 2012. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of Mesozoic mafic dikes from the Gan-Hang tectonic belt, South China: Petrogenesis and geodynamic significance. *International Geology Review*, 54(8): 920–939
- Qi YQ, Hu RZ, Liu S, Coulson IM, Qi HW, Tian JJ and Zhu JJ. 2016. Petrogenesis and geodynamic setting of Early Cretaceous mafic-ultramafic intrusions, South China: A case study from the Gan-Hang tectonic belt. *Lithos*, 258–259: 149–162
- Qi YQ, Hu RZ, Zhang H, Ren GM, Wu LY, Zhu JJ, Wang XS, Meng CZ and Jin XL. 2016. Zircon U-Pb geochronology and geochemical characteristics of the mafic intrusions in northwestern Guizhou Province, and their significances to the lead-zinc mineralization. *Acta Geologica Sinica*, 90(5): 933–949 (in Chinese with English abstract)
- Raffensperger JP and Garven G. 1995. The formation of unconformity-type uranium ore deposits. 2. Coupled hydrochemical modeling. *American Journal of Science*, 295(6): 639–696
- Renne PR, Swisher CC, Deino AL, Karner DB, Owens TL and DePaolo DJ. 1998. Intercalibration of standards, absolute ages and uncertainties in ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating. *Chemical Geology*, 145(1–2): 117–152
- Ruzicka V. 1993. Vein uranium deposits. *Ore Geology Reviews*, 8(3–4): 247–276
- Shang PQ. 2007. Restraining mechanism of lithospheric extension on uranium mineralization in the Xiazhuang orefield, northern Guangdong Province, China. Ph. D. Dissertation. Beijing: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1–110 (in Chinese with English summary)
- Shi YC, Li DW and Cai QZ. 1992. The study of mineral exploration and assessment of metallogenetic potentials in intersection-type uranium deposit in Xiazhuang area. *China Nuclear Science and Technology Report*, (1): 14–26 (in Chinese)
- Shu LS and Zhou XM. 2002. Late Mesozoic tectonism of Southeast China. *Geological Review*, 48(3): 249–260 (in Chinese with English abstract)
- Steiger RH and Jäger E. 1977. Subcommittee on Geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 36(3): 359–362
- Tappa MJ, Ayuso RA, Bodnar RJ, Aylor JG, Beard J, Henika WS, Vazquez JA and Wooden JL. 2014. Age of host rocks at the Coles Hill uranium deposit, Pittsylvania county, Virginia, based on zircon U-Pb geochronology. *Economic Geology*, 109(2): 513–530
- Wang F, He HY, Zhu RX, Yang LK, Sang HQ and Wang YL. 2006. Laser step-heating ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating on young volcanic rocks. *Chinese Science Bulletin*, 51(23): 2892–2896
- Wang GC. 2016. Petrogenesis of Mesozoic intrusive rocks in Northwest Fujian and South Jiangxi Province and their geodynamic implications. Ph. D. Dissertation. Nanjing: Nanjing University, 1–108 (in Chinese with English summary)
- Wang LX, Ma CQ, Lai ZX, Marks MAW, Zhang C and Zhong YF. 2015. Early Jurassic mafic dykes from the Xiazhuang ore district (South China): Implications for tectonic evolution and uranium metallogenesis. *Lithos*, 239: 71–85
- Wang XC. 1986. Geological and geochemical characteristics of Guidong body and metallogeny of No. 339 deposit. Master Degree Thesis. Nanjing: Nanjing University, 1–137 (in Chinese)
- Wang XC. 1989. Study on origin of the dark dykes from uranium-bearing granite of South China and its relations to uranium mineralization. Ph. D. Dissertation. Nanjing: Nanjing University, 1–127 (in Chinese)
- Wang XC, Zhang BT and Zhang ZH. 1991. A study of the relationship between the dark dyke and the uranium mineralization. *Mineral Deposits*, 10(4): 359–370 (in Chinese with English abstract)
- Wang YT. 1986. Characteristics of uraniferous granite in France—with concurrent discussion about the comparison of uraniferous granites between China and France. *Uranium Geology*, (1): 41–46 (in Chinese with English abstract)
- Wang ZQ and Li ZY. 2007. Discussion on mantle-derived uranium mineralization. *Geological Review*, 53(5): 608–615 (in Chinese with English abstract)
- Wang ZQ, Wu LQ and Zhang GY. 2007. Research on metallogenetic conditions intersection-type uranium ore-deposits in Zhongdong area, northern Guangdong Province. *China Nuclear Science and Technology Report*, (2): 157–177 (in Chinese with English abstract)

- Wang ZQ, Li ZY, Wu LQ and Chen GS. 2010. Geochemical evidences for mantle-derived uranium metallogenesis: A case study of Xiaoshui intersection-type uranium deposit in Xiazhuang area. *Uranium Geology*, 26(1): 24–34 (in Chinese with English abstract)
- Wu LQ, Tan ZZ, Liu RZ and Huang GL. 2003. Discussion on uranium ore-formation age in Xiazhuang ore-field, northern Guangdong. *Uranium Geology*, 19(1): 28–33 (in Chinese with English abstract)
- Wu LQ and Tan ZZ. 2004. Discussion on prospecting potential for rich uranium deposits in Xiazhuang uranium ore-field, northern Guangdong. *Uranium Geology*, 20(1): 10–15 (in Chinese with English abstract)
- Xiang YX and Wu JH. 2012. SHRIMP zircon U-Pb age of Yutian Group basalts in Longnan area of southern Jiangxi Province and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 31(5): 716–725 (in Chinese with English abstract)
- Xie GQ, Peng JT, Hu RZ and Jia DC. 2001. Geochemical characteristics of lamprophyres in the Xikuangshan antimony ore deposits, Hunan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 629–636 (in Chinese with English abstract)
- Xie GQ, Hu RZ, Mao JW, Pirajno F, Li RL, Cao JJ, Jiang GH and Zhao JH. 2006a. K-Ar dating, geochemical, and Sr-Nd-Pb isotopic systematics of Late Mesozoic mafic dikes, southern Jiangxi Province, Southeast China: Petrogenesis and tectonic implications. *International Geology Review*, 48(11): 1023–1051
- Xie GQ, Mao JW, Hu RZ, Franco P, Li RL and Cao JJ. 2006b. K-Ar dating, geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic systematics of Paleocene mafic rocks in Central Jiangxi, SE China: Evidence for lithosphere replacement. *Geochemical Journal*, 40(5): 485–500
- Xiong FH, Ma CQ, Jiang HA, Liu B and Huang J. 2014. Geochronology and geochemistry of Middle Devonian mafic dykes in the East Kunlun orogenic belt, Northern Tibet Plateau: Implications for the transition from Prototethys to Paleotethys orogeny. *Geochemistry*, 74(2): 225–235
- Xu DZ, Liu LQ and Hu BQ. 1999. Study of pneumatohydrothermal high temperature uranium metallogenetic characteristics and uranium metallogenetic ages in Xiazhuang uranium ore field. *Uranium Geology*, 15(5): 266–270, 278 (in Chinese with English abstract)
- Xu HJ, Ma CQ, Song YR, Zhang JF and Ye K. 2012. Early Cretaceous intermediate-mafic dykes in the Dabie orogen, eastern China: Petrogenesis and implications for crust-mantle interaction. *Lithos*, 154: 83–99
- Xu XS, Deng P, O'Reilly SY, Griffin WL, Zhou XM and Tan ZZ. 2003. Single zircon LAM-ICPMS U-Pb dating of Guidong complex (SE China) and its petrogenetic significance. *Chinese Science Bulletin*, 48(17): 1892–1899
- Yu DG. 1992. Metallogenetic environment and genetic model of uranium in Meso-Cenozoic volcano-magmatic belt in Southeast China. *Uranium Geology*, 8(2): 75–82 (in Chinese with English abstract)
- Yu XQ, Wu GG, Zhao XX, Gao JF, Di YJ, Zheng YP, Dai YP, Li CL and Qiu JT. 2010. The Early Jurassic tectono-magmatic events in southern Jiangxi and northern Guangdong provinces, SE China: Constraints from the SHRIMP zircon U-Pb dating. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(5): 408–422
- Zhang CL, Zhou DW, Jin HL, Han S and Liu YY. 1999. Study on the Sr, Nd, Pb and O isotopes of basic dyke swarms in the Wudang block and basic volcanics of the Yaolinghe Group. *Acta Petrologica Sinica*, 15(3): 430–436 (in Chinese with English abstract)
- Zhang D, Zhao KD, Chen W and Jiang SY. 2018a. Early Jurassic mafic dykes from the Aigao uranium ore deposit in South China: Geochronology, petrogenesis and relationship with uranium mineralization. *Lithos*, 308–309: 118–133
- Zhang L, Chen ZL, Li XF, Li SR, Santosh M and Huang GL. 2018b. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of granites in the Zhuguangshan complex, South China: Implications for uranium mineralization. *Lithos*, 308–309: 19–33
- Zhang ZS. 2011. The Magmatism in the Xiazhuang Uranium Ore Field and Its Link to Uranium Mineralization. Beijing: China Atomic Energy Press, 1–127 (in Chinese with English abstract)
- Zhou DW, Zhang CL, Liu L, Wang JL, Wang Y and Liu JP. 2000. Synthetic study on Proterozoic basic dyke swarms in the Qinling orogenic belt and its adjacent block as well as a discussion about some questions related to them. *Acta Petrologica Sinica*, 16(1): 22–28 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XM, Sun T, Shen WZ, Shu LS and Niu YL. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. *Episodes*, 29(1): 26–33
- Zhu B, Ling HF, Shen WZ, Gao JF, Deng P, Huang GL and Tan ZZ. 2006. Isotopic geochemistry of Shituling uranium deposit, northern Guangdong Province, China. *Mineral Deposits*, 25(1): 71–82 (in Chinese with English abstract)
- Zhu B. 2010. The study of mantle liquid and uranium metallogenesis: Take uranium ore field of South Zhuguang mountain as an example. Ph. D. Dissertation. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1–114 (in Chinese with English summary)
- Zhu WG, Zhong H, Li XH, He DF, Song XY, Ren T, Chen ZQ, Sun HS and Liao JQ. 2010. The Early Jurassic mafic-ultramafic intrusion and A-type granite from northeastern Guangdong, SE China: Age, origin, and tectonic significance. *Lithos*, 119(3–4): 313–329
- Zou DF, Li FL, Zhang S, Huang B and Zong KQ. 2011. Ming of No. 335 ore deposit in Xiazhuang uranium orefield, northern Guangdong Province: Evidence from LA-ICP-MS U-Pb dating of pitchblende. *Mineral Deposits*, 30(5): 912–922 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈安福, 赵洪波. 1986. 夏庄铀矿床矿物包裹体研究. *地球化学*, (2): 174–182
- 陈培荣, 华仁民, 章邦桐, 陆建军, 范春方. 2002. 南岭燕山早期后造山花岗岩类: 岩石学制约和地球动力学背景. *中国科学(D辑)*, 32(4): 279–289
- 陈培荣, 周新民, 张文兰, 李惠民, 范春方, 孙涛, 陈卫锋, 张敏. 2004. 南岭东段燕山早期正长岩-花岗岩杂岩的成因和意义. *中国科学(D辑)*, 34(6): 493–503
- 陈孝德, 史兰斌. 1983. 五台-太行辉绿岩岩墙群的初步研究. *科学通报*, (16): 1002–1005
- 程华汉, 杜乐天. 1998. 几个铀矿床交代作用中重砂矿物变化的研究. *铀矿地质*, 14(1): 26–31
- 邓平, 沈渭洲, 凌洪飞, 叶海敏, 王学成, 濮巍, 谭正中. 2003a. 地幔流体与铀成矿作用: 以下庄矿田仙石铀矿床为例. *地球化学*, 32(6): 520–528
- 邓平, 沈渭洲, 凌洪飞, 叶海敏, 王学成, 谭正中. 2003b. 下庄矿田338矿床地幔流体与铀成矿作用. *华南铀矿地质*, 20(2): 37–47
- 丁瑞钦. 2002. 下庄地区“交点”型铀矿床的经济可采性探讨. *铀矿地质*, 18(6): 348–351, 358
- 丁瑞钦, 梁天锡. 2003. 下庄矿田构造岩浆演化与富铀成矿作用初探. *铀矿地质*, 19(1): 21–27
- 杜乐天. 1982. 花岗岩型铀矿文集. 北京: 原子能出版社, 1–404
- 杜乐天. 2015. 全球热液铀矿地球化学—对当代国际热液铀矿理论的重建. 北京: 地质出版社, 1–143
- 冯志军, 赖中信, 莫济海, 胡飞, 阳卫. 2016. 下庄矿田“交点”型铀矿床成矿机理研究及勘查思路探讨. *矿床地质*, 35(5): 1047–1061

- 葛小月, 李献华, 周汉文. 2003. 琼南晚白垩世基性岩墙群的年代学、元素地球化学和 Sr-Nd 同位素研究. 地球化学, 32(1): 11-20
- 何德宝. 2017. 粤北下庄矿田不同类型铀矿床成矿机制对比研究. 博士学位论文. 北京: 核工业北京地质研究院, 1-182
- 胡瑞忠, 金景福. 1988. 论贵东花岗岩体的成因及其起源. 成都地质学院学报, 15(3): 17-25
- 胡瑞忠. 1989. XW 铀矿床成矿机理. 成都地质学院学报, 16(3): 1-9
- 胡瑞忠. 1990. 花岗岩型铀矿床一种可能的成矿模式. 科学通报, (7): 526-528
- 胡瑞忠, 金景福. 1990. 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. 地质论评, 36(4): 317-325
- 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. 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. 地学前缘, 11(1): 153-160
- 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 刘燊, 钟宏, 赵军红, 蒋国豪. 2007. 华南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. 矿床地质, 26(2): 139-152
- 胡瑞忠, 毛景文, 华仁民, 范蔚茗. 2015. 华南陆块陆内成矿作用. 北京: 科学出版社, 1-903
- 姜耀辉, 蒋少涌, 凌洪飞. 2004. 地幔流体与铀成矿作用. 地学前缘, 11(2): 491-499
- 赖绍聪, 徐海江. 1993. 江西茅排金矿区含金煌斑岩特征及其与金矿化的关系. 黄金, 14(8): 7-11
- 李江海, 何文渊, 钱祥麟. 1997. 元古代基性岩墙群的成因机制、构造背景及其古板块再造意义. 高校地质学报, 3(3): 272-281
- 李立生, 谢溢华. 2011. 隘高矿点地质特征及围岩蚀变研究. 科技与生活, (11): 91-94
- 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. 地球化学, 26(2): 14-31
- 凌洪飞, 沈渭洲, 邓平, 蒋少涌, 高剑峰, 叶海敏, 濮巍, 谭正中. 2004. 粤北笋洞花岗岩的形成时代、地球化学特征与成因. 岩石学报, 20(3): 413-424
- 凌洪飞, 沈渭洲, 邓平, 蒋少涌, 姜耀辉, 邱检生, 黄国龙, 叶海敏, 谭正中. 2005. 粤北帽峰花岗岩体地球化学特征及成因研究. 岩石学报, 21(3): 677-687
- 凌洪飞. 2011. 论花岗岩型铀矿床热液来源——来自氧逸度条件的制约. 地质论评, 57(2): 193-206
- 刘汝洲. 2003. 浅谈交点型铀矿中的几个问题. 华南铀矿地质, 20(1): 41-48
- 刘义茂, 戴樟谟, 卢焕章, 胥友志, 王昌烈, 康卫清. 1997. 千里山花岗岩成岩成矿的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 和 Sm-Nd 同位素年龄. 中国科学(D 辑), 27(5): 425-430
- 卢海萍, 王汝成, 陆现彩, 徐士进, 陈骏, 高剑峰. 2003. 180℃热液条件下锆石表面溶解行为研究. 自然科学进展, 13(10): 1042-1047
- 骆金诚. 2015. 粤北花岗岩型铀矿床成因机制研究: 矿物学和铀矿物 U-Pb 年代学及地球化学约束. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 1-162
- 倪师军. 1987. 337 铀矿床 REE 地球化学特征与成矿物质来源. 成都地质学院学报, 14(4): 18-28
- 彭澎. 2005. 华北克拉通中部 ca. 1.8Ga 镁铁质岩墙群的成因和构造意义. 博士学位论文. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 1-178
- 齐有强, 胡瑞忠, 刘燊, 冯彩霞, 田建吉, 冯光英, 王涛. 2011. 赣杭构造带金衢盆地燕山期基性岩地球化学特征及成因探讨. 地质学报, 85(3): 354-365
- 齐有强, 胡瑞忠, 张海, 任光明, 武丽艳, 朱经经, 王新松, 孟昌忠, 金翔霖. 2016. 贵州西北部基性侵入岩锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学特征及铅锌成矿意义. 地质学报, 90(5): 933-949
- 商朋强. 2007. 岩石圈伸展对粤北下庄矿田铀成矿的制约机制研究. 博士学位论文. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 1-110
- 史运澄, 李德文, 蔡启政. 1992. 下庄矿田“交点型”铀矿化地质特征远景评价及找矿探矿的研究. 中国核科技报告, (1): 14-26
- 舒良树, 周新民. 2002. 中国东南部晚中生代构造作用. 地质论评, 48(3): 249-260
- 王非, 贺怀宇, 朱日祥, 杨列坤, 桑海清, 王英兰. 2006. 激光阶段加热 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法在年轻火山岩上的应用. 科学通报, 51(9): 1079-1082
- 王国昌. 2016. 闽西北与赣南地区中生代侵入岩成因及其地球动力学意义研究. 博士学位论文. 南京: 南京大学, 1-108
- 王学成. 1986. 贵东岩体地质地球化学特征及 339 矿床成因研究. 硕士学位论文. 南京: 南京大学, 1-137
- 王学成. 1989. 华南产铀花岗岩体内暗色岩脉的成因及其与铀成矿关系研究. 博士学位论文. 南京: 南京大学, 1-127
- 王学成, 章邦桐, 张祖还. 1991. 暗色岩脉与铀成矿关系研究. 矿床地质, 10(4): 359-370
- 王炎庭. 1986. 法国产铀花岗岩特征——兼论中法产铀花岗岩对比. 铀矿地质, (1): 41-46
- 王正其, 李子颖. 2007. 幔源铀成矿作用探讨. 地质论评, 53(5): 608-615
- 王正其, 吴烈勤, 张国玉. 2007. 粤北中洞地区“交点型”铀矿成矿控制因素研究. 中国核科技报告, (2): 157-177
- 王正其, 李子颖, 吴烈勤, 陈国胜. 2010. 幔源铀成矿作用的地球化学证据——以下庄小水“交点型”铀矿床为例. 铀矿地质, 26(1): 24-34
- 吴烈勤, 谭正中, 刘汝洲, 黄国龙. 2003. 粤北下庄矿田铀成矿时代探讨. 铀矿地质, 19(1): 28-33
- 吴烈勤, 谭正中. 2004. 粤北下庄矿田富铀矿找矿前景探讨. 铀矿地质, 20(1): 10-15
- 项媛馨, 巫建华. 2012. 赣南龙南地区余田群玄武岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质通报, 31(5): 716-725
- 谢桂青, 彭建堂, 胡瑞忠, 贾大成. 2001. 湖南锡矿山铀矿床区煌斑岩的地球化学特征. 岩石学报, 17(4): 629-636
- 徐达忠, 刘林清, 胡宝群. 1999. 下庄矿田气热高温铀成矿特征及年龄研究. 铀矿地质, 15(5): 266-270, 278
- 徐夕生, 邓平, O'Reilly SY, Griffin WL, 周新民, 谭正中. 2003. 华南贵东杂岩体单颗粒锆石激光探针 ICPMS U-Pb 定年及其成岩意义. 科学通报, 48(12): 1328-1334

- 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. 铀矿地质, 8(2): 75-82
- 张成立, 周鼎武, 金海龙, 韩松, 刘颖宇. 1999. 武当地块基性岩墙群及耀岭河群基性火山岩的 Sr、Nd、Pb、O 同位素研究. 岩石学报, 15(3): 430-436
- 张展适. 2011. 下庄铀矿田岩浆作用及其与铀成矿关系. 北京: 中国原子能出版社, 1-127
- 周鼎武, 张成立, 刘良, 王居里, 王焰, 刘金平. 2000. 秦岭造山带及相邻地块元古代基性岩墙群研究综述及相关问题讨论. 岩石学报, 16(1): 22-28
- 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. 矿床地质, 25(1): 71-82
- 朱捌. 2010. 地幔流体与铀成矿作用研究——以诸广山南部铀矿田为例. 博士学位论文. 成都: 成都理工大学, 1-114
- 邹东风, 李方林, 张爽, 黄彬, 宗克清. 2011. 粤北下庄 335 矿床成矿时代的厘定——来自 LA-ICP-MS 沥青铀矿 U-Pb 年龄的制约. 矿床地质, 30(5): 912-922