

桃山-诸广铀成矿带成岩成矿年代学研究进展 及存在问题*

吴 佳^{1,2}, 巫建华^{1,2}, 刘晓东^{1,2**}

(1 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 2 东华理工大学地球科学学院, 江西 南昌 330013)

摘 要 桃山-诸广铀成矿带位于钦杭结合带以南的华夏地块西部, 属华东南铀成矿省, 是中国最重要的花岗岩型铀成矿带。文章收集了该成矿带近十年获得的 118 组岩浆岩同位素年龄数据和 41 组铀成矿同位素年龄数据, 通过遴选可信度较高的年龄数据, 厘定成岩成矿年龄, 并探讨岩浆岩活动与铀成矿时代的关系。结果表明: 桃山-诸广铀成矿带的岩浆岩是加里东期、印支期和燕山期不同岩浆旋回的产物, 下庄铀矿田和诸广铀矿田的储矿岩体主要为印支期, 而桃山铀矿田的储矿岩体为燕山期; 沥青铀矿测年结果显示, 铀成矿具有多期多阶段性, 主成矿期为燕山晚期, 但高温绢英岩化型铀矿床属燕山早期铀矿化的产物; 铀成矿与赋矿岩体之间存在较大的矿岩时差, 但高温绢英岩化型和交点型铀矿床的矿化时期与矿田内基性岩浆活动的时间吻合, 暗示基性岩浆活动可能与铀成矿作用存在成因联系。数据分析还表明, 部分岩浆岩的锆石 U-Pb 加权平均年龄数据存在 $n < 10$ 或 $MSWD > 2$ 的问题, 部分包含了高铀锆石的年龄数据, 降低了锆石 U-Pb 年龄的可信度; 而基性脉岩的锆石 U-Pb 加权平均年龄一般只能说明基性脉岩的形成年龄不早于这个年龄, 不能代表基性脉岩的形成年龄。

关键词 地球化学; 桃山-诸广铀成矿带; 成岩成矿年代学; 矿岩时差; 研究进展

中图分类号: P618.14; P597.3

文献标志码: A

Progresses and problems on chronology of rock forming and mineralization in Taoshan-Zhuguang uranium metallogenic belt

WU Jia^{1,2}, WU JianHua^{1,2} and LIU XiaoDong^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 2 School of Earth Science, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

Abstract

The Taoshan-Zhuguang uranium metallogenic belt, located at west portion of Cathaysian block, south of the Qinzhou-Hangzhou junction zone, is one of the most important granite-related uranium metallogenic belts in southeast China uranium province. Over the past decade, 118 isotopic ages of magmatic rocks and 41 isotopic ages of uranium mineralization have been obtained by various studies. Following the analysis and evaluation of those previous chronology data, this study focuses on the screening of appropriate and reliable chronology data for host rock forming and uranium mineralization, and further discussing the relations of magmatic activity to uranium mineralization in Taoshan-Zhuguang uranium metallogenic belt. The results show that the multi-cycle magmatic activities in this metallogenic belt include three stages of Caledonian, Indosinian and Yanshanian. The ages of ore-bearing host rocks in Xiazhuang and Zhuguang uranium ore fields are mainly in Indosinian epoch,

* 本文得到中国核工业地质局项目(编号: U20110816)和江西省教育厅科学技术研究项目(编号: GJJ180366)联合资助

第一作者简介 吴 佳, 女, 1983 年生, 博士研究生, 地质资源与地质工程专业。Email: jwu@ecut.edu.cn

** 通讯作者 刘晓东, 男, 1963 年生, 教授, 主要从事铀矿地质的研究。Email: liuof99@163.com

收稿日期 2021-05-20; 改回日期 2021-12-25。张绮玲编辑。

while the ages in Taoshan uranium ore field are mainly in Yanshanian epoch. Metallogenic ages of pitchblende indicated multi-periods and multi-stages uranium mineralization in study areas. In addition to the major uranium mineralization occurred in late Yanshanian, early Yanshanian uranium mineralization have been revealed, such as the high temperature sericitization type uranium deposits. Generally, there is a large gap between the ages of host rock and uranium mineralization, however the close temporal relations of mafic-dykes and high temperature sericitization type uranium deposits implies the possible genetic relationship between them. In the processing of data analysis, it is suggested that, in case of $n < 10$ or $MSWD > 2$ in data set or with the high-uranium contents in zircon, the zircon U-Pb isotopic age is normally not reliable. And the zircon U-Pb isotopic age for mafic-dykes only presents the upper age limit of its formation.

Keywords: geochemistry, Taoshan-Zhuguang uranium metallogenic belt, chronology of rock forming and mineralization, age gap between host rock and mineralization, progresses

长期以来,桃山-诸广铀成矿带的岩浆活动和铀成矿作用一直受到业内的重视,前人利用不同测年方法进行成岩成矿年代学研究,认为岩浆岩属于燕山期不同阶段的产物,铀成矿年龄基本上小于 100 Ma(吴烈勤等,2003;杜乐天等,2011)。近十年来,随着高精度测年方法的应用,许多岩体的形成时代被重新厘定,部分矿床成矿年龄大于 100 Ma 的事实被进一步确认。但是,由于部分岩浆岩的年龄数据忽略了高铀锆石、捕获锆石、样品数量和 MSWD 值等因素,年龄的可信度较低,导致不同学者获得的同一岩体的年龄值差别较大,给岩浆岩的时序厘定造成了困难,也掩盖了岩浆活动与铀成矿年龄之间的关系。本文收集了近十年桃山-诸广铀成矿带获得的 118 组岩浆岩同位素年龄数据和 41 组铀成矿同位素年龄数据,试图在剔除可信度较低数据的基础上,厘定桃山-诸广铀成矿带岩浆岩的形成时代和铀成矿的年龄,指出现有年龄数据存在的主要问题,进而探讨岩浆活动与铀成矿之间的关系。鉴于现有的岩浆岩年龄数据较多,且测试方法不一,为了便于结果对比和使用统一的年代学数据评价指标,本次工作从收集的 LA-ICP-MS 或 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄数据中遴选出酸性岩浆岩的形成年龄,从收集的 K-Ar 或 Ar-Ar 法年龄数据中遴选出基性脉岩的形成年龄,从收集的沥青铀矿原位定年数据中遴选出铀矿的成矿年龄,基本达到了研究目的。

1 区域地质背景

华南地区岩浆活动强烈,铀矿资源丰富,已探明的铀资源量大约占全国铀资源总量的 50% (OECD-NEA/IAEA, 2016),主要类型包括火山岩

型铀矿、花岗岩型铀矿和碳硅泥岩型铀矿(图 1),其中花岗岩型铀矿约占中国已探明铀资源储量的 22.9%(蔡煜琦等,2015;巫建华等,2017)。

华南由扬子始板块和华夏微始板块组成,两板块在中元古代—新元古代青白口纪早期以古华南海相隔;青白口纪晚期,古华南海消亡,扬子始板块与华夏微始板块沿凭祥-宜丰-景德镇-苏州断裂带碰撞拼合,其间形成了长约 1500 km 的 NE 向江南造山带,并构成罗迪尼亚超级大陆的一部分;新元古代南华纪,随着罗迪尼亚超级大陆的裂解,扬子-华夏古板块发生裂解,茶林-祁东-萍乡-广丰-江山-绍兴断裂带以北转变为被动陆缘的浅海台地,以南的湘东—粤北—赣南—浙西地区成为华南裂谷海盆的一部分;早古生代志留纪,扬子古板块与华夏微古板块沿茶林-祁东-萍乡-广丰-江山-绍兴断裂带再次拼合,其间形成了钦(州湾)—杭(州湾)结合带及其西侧的湘桂加里东造山带和东侧的华东南加里东造山带,形成初步统一的中国南方大陆(舒良树,2012;江西省地质矿产勘查开发局,2017;郭国林等,2021)。桃山-诸广铀成矿带地跨赣、粤、湘三省,位于钦杭结合带以南的华夏地块西部,属华东南铀成矿省,是中国最重要的花岗岩型铀成矿带(图 1),占全国花岗岩型铀矿的 49.2%(Deng et al., 2012;蔡煜琦等,2015)。自早古生代以来,该带经历了多期次的构造岩浆活动,受加里东、印支和燕山等构造活动的影响,形成了不同时代的花岗岩和丰富的矿产资源(Xu et al., 2003; Wang et al., 2015;宋美佳,2017),主要的产铀花岗岩体包括桃山、诸广和贵东三大复式花岗岩体,发育有桃山、诸广(包括鹿井和诸广南)、下庄铀矿田,共计 80 多个铀矿床、数以万计的铀矿(化)点和异常点(李建红等,2012)。

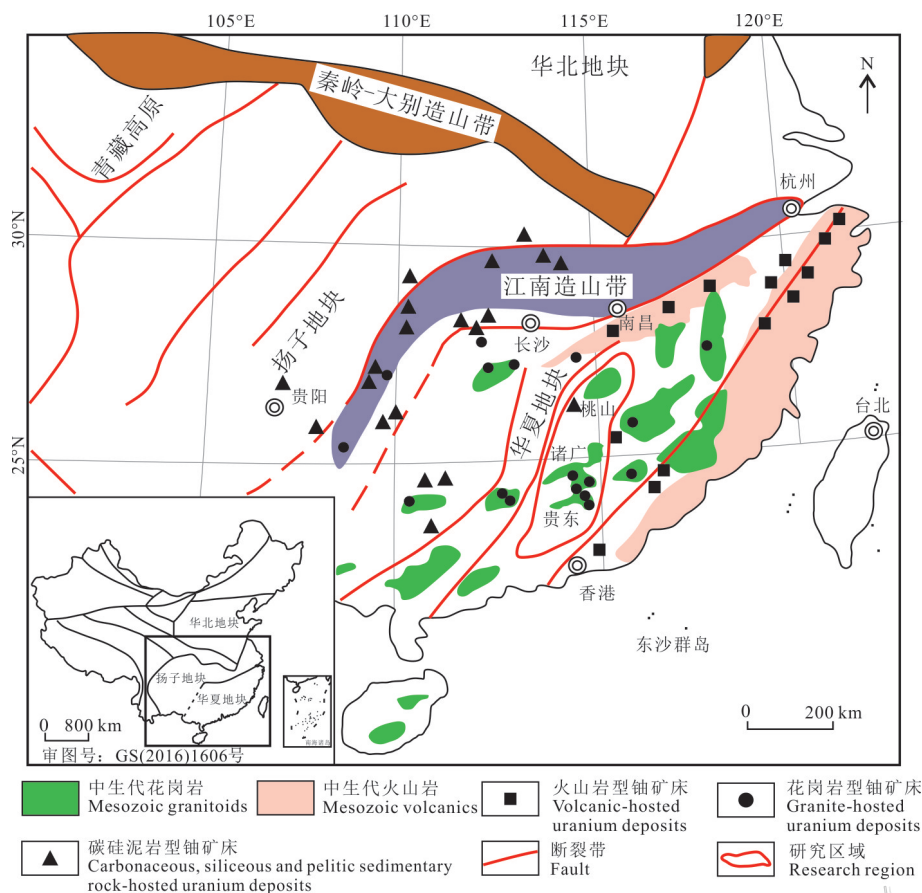


图1 华南大地构造简图及铀矿分布示意图(据胡瑞忠等,2019修改)

Fig.1 Tectonic setting and simplified geologic map of South China showing the U provinces and distribution of uranium deposits (modified after Hu et al., 2019)

2 铀矿田岩浆活动具有多旋回性

前人对桃山-诸广铀成矿带中的桃山、诸广和下庄3个铀矿田内的岩浆岩主要采用K-Ar法、Ar-Ar法、Rb-Sr法、单颗粒锆石U-Pb同位素稀释法等工作,认识到3个铀矿田的岩体均为复式岩体,但主要归于燕山期第一阶段、第二阶段和第三阶段(杜乐天等,2011)。但近十年来,随着高精度锆石U-Pb同位素定年技术(LA-ICP-MS、SHRIMP)的应用,获得了桃山、诸广和下庄铀矿田的一大批岩浆岩同位素年龄(表1),证实贵东岩体东部下庄铀矿田的花岗岩主体属印支期,北缘的火山岩和花岗岩属加里东期,诸广岩体南部诸广铀矿田的岩浆岩主体属印支期,只有桃山铀矿田的花岗岩主体属燕山期。但是,由于这些年龄数据中部分包括高铀锆石的年龄,部分年龄的 $n < 10$,部分年

龄的MSWD > 2,降低了年龄数据的可信度,导致不同学者报道的同一岩体的年龄数值差别很大。如下庄铀矿田的下庄岩体9个年龄数据(表1序号92~100)中的最大年龄与最小年龄相差15 Ma,下庄铀矿田的鲁溪岩体9个年龄数据(表1序号105~113)中的最大年龄与最小年龄相差也近15 Ma。通过遴选可信度较高的年龄数据后,桃山-诸广铀成矿带岩浆岩具有多旋回的特征,加里东期、印支期和燕山期岩浆岩可厘定如下。

(1) 加里东期岩浆岩

加里东期岩浆岩主要有桃山铀矿田的漳灌岩体((409.2±1.8)Ma,表1序号15),诸广铀矿田的寨前岩体((414.5±4.5)Ma,表1序号65)、桂东岩体((417.3±4.8)Ma,表1序号66)和扶溪岩体((426.7±5.4)Ma,表1序号67),下庄铀矿田的苗云岩体((442.7±3.2)Ma,表1序号118)、河口盆地的碎斑熔岩((443.6±5.4)Ma,表1序号114)和英安岩((448.7±

表1 桃山-诸广铀成矿带岩浆岩同位素年龄一览表

Tabel 1 Isotopic ages of magmatic rocks in the Taoshan-Zhuguang uranium metallogenic belt

序号	铀矿田	岩浆旋回	岩体/盆地	岩性	分析方法	年龄/Ma	n/颗	MSWD	高铀锆石	资料来源
1	桃山	燕山早	罗布里岩体	二长花岗岩	LA-ICP-MS	146±3	13	2.2	无	Zhao et al., 2015
2		燕山早	打鼓寨岩体	中粒二云母花岗岩	LA-ICP-MS	152±3	10	2.9	4	Zhao et al., 2015
3		燕山早	打鼓寨岩体	中粒二云母花岗岩	LA-ICP-MS	154±2	18	2.6	4	Zhao et al., 2011
4		燕山早	打鼓寨岩体	中粒斑状二云母花岗岩	SHRIMP II	163±3	5	1.2	无	刘汉彬等, 2014
5		燕山早	打鼓寨岩体	中粒斑状黑云母花岗岩	SHRIMP II	168±11	4	5.8	无	刘汉彬等, 2014
6		燕山早	黄陂岩体	中粗粒黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	160.9±2.4	13	1.7	无	田泽瑾等, 2014
7		燕山早	黄陂岩体	中粗粒黑云母花岗岩	SHRIMP II	164±3	4	0.98	无	刘汉彬等, 2014
8		燕山早	黄陂岩体	黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	154±2	15	2.7	3	Zhao et al., 2011
9		燕山早	黄陂岩体	黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	167±2	14	3.6	8	Zhao et al., 2015
10		燕山早	钨峰岩体	中粒斑状黑云母花岗岩	SHRIMP II	164±2	8	0.59	无	刘汉彬等, 2014
11		印支	蔡江岩体	斑状黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	228±2	14	1.8	无	Zhao et al., 2013
12		印支	蔡江岩体	斑状黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	230±2	17	4.4	4	Zhao et al., 2015
13		印支	蔡江岩体	中粗粒斑片麻状	LA-ICP-MS	229.98±0.98	16	2	无	田泽瑾等, 2014
14		印支	蔡江岩体	黑云母花岗岩	SHRIMP II	230±2	13	1.6	无	刘汉彬等, 2014
15		加里东	漳灌岩体	片麻状混合花岗岩	LA-ICP-MS	409.2±1.8	15	1.5	无	刘汉彬等, 2014
16	诸广	燕山晚	九峰岩脉	辉绿岩	K-Ar	88.0±1.6				李献华等, 1997
17		燕山晚	九峰岩脉	角闪石	K-Ar	103.1±2.0				李献华等, 1997
18		燕山晚	油洞岩脉	辉绿岩	Ar-Ar	110.6±2.0				曹豪杰等, 2013
19		燕山晚	鹿井岩脉	花岗斑岩	Ar-Ar	116.24±0.49				蒋红安等, 2020
20		燕山晚	鹿井岩脉	煌斑岩	Ar-Ar	128.27±0.86				蒋红安等, 2020
21		燕山早	长江岩脉	角闪石	K-Ar	140.2±2.8				李献华等, 1997
22		燕山早	长江岩脉	辉绿岩	Ar-Ar	145.1±1.5				Zhang et al., 2018
23		燕山早	鹿井NWW向岩脉	辉绿岩	Ar-Ar	169.1±3.8				李杰等, 2021
24		燕山早	脉	辉绿岩	Ar-Ar	171.7±1.6				李杰等, 2021
25		燕山早	广南岩体	中粒少斑状二云母二长花岗岩	SHRIMP II	148.2±1.7	13	0.93	无	郭爱民等, 2017
26		燕山早	三江口岩体	黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	155.2±2.1	13	0.76	1	Zhang et al., 2018
27		燕山早	三江口岩体	中粒似斑状二云母花岗岩	LA-ICP-MS	157±2	8	0.76	3	孙立强, 2018
28		燕山早	红山岩体	细粒二云母花岗岩	SHRIMP II	155±2	4	0.67	无	朱捌, 2010
29		燕山早	赤坑岩体	二云母花岗岩	LA-ICP-MS	152.2±3.0	12	1.6	2	Zhang et al., 2018
30		燕山早	赤坑岩体	中粒二云母花岗岩	SHRIMP II	154±1	11	0.41	无	邓平等, 2011
31		燕山早	企岭岩体	二云母花岗岩	LA-ICP-MS	153.9±2.1	16	0.38	1	Zhang et al., 2018
32		燕山早	企岭岩体	中粒二云母花岗岩	SHRIMP II	156±2	13	2.5	1	邓平等, 2011
33		燕山早	茶山岩体	中细粒含白云母黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	148.2±1.9	8	2.6	1	兰鸿锋等, 2020
34		燕山早	茶山岩体	中粒黑云母花岗岩	SHRIMP II	157±3	10	2.7	1	邓平等, 2011
35		燕山早	长江岩体	中粗粒-中粒黑云母花岗岩	电子探针测年	155			无	张龙等, 2016
36		燕山早	长江岩体	黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	151.8±1.7	19	0.26	不详	Song et al., 2016
37		燕山早	长江岩体	黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	157.6±1.8	15	0.08	2	Zhang et al., 2017
38		燕山早	长江岩体	黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	158.8±1.9	15	0.27	1	Zhang et al., 2017
39		燕山早	长江岩体	中粗粒黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	157.2±1.7	17	1.8	2	黄国龙等, 2014
40		燕山早	长江岩体	细粒不等粒黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	161.6±2.1	15	2.5	无	黄国龙等, 2014
41		燕山早	长江岩体	中粒黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	159.5±1.2	18	1.2	无	黄国龙等, 2014
42		燕山早	长江岩体	中粒黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	166±3	19	3.1	2	孙立强, 2018
43		燕山早	长江岩体	中粒黑云母花岗岩	SHRIMP II	160±2	9	1.8	无	邓平等, 2011
44		燕山早	九峰岩体	黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	159.9±1.9	14	0.55	无	Zhang et al., 2017
45		燕山早	九峰岩体	中粒等粒状黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	168±2	14	1.8	2	孙立强, 2018

续表 1-1

Continued Table 1-1

序号	铀矿田	岩浆旋回	岩体/盆地	岩性	分析方法	年龄/Ma	n/颗	MSWD	高铀锆石	资料来源	
46	诸广	印支	大洞岩体	中粗粒斑状黑云母二长花岗岩	SHRIMP II	207.5±2.7	10	1.6	3	郭爱民等,2017	
47		印支	大窝子岩体	粗粒似斑状黑云母花岗岩	SHRIMP II	231±2	9	0.81	无	Deng et al., 2012	
48		印支	百顺岩体	白云母二长花岗岩	LA-ICP-MS	226.2±2.2	20	0.101	不详	Song et al., 2016	
49		印支	油洞岩体	二云母花岗岩	LA-ICP-MS	226.4±3.5	15	0.83	2	Zhang et al., 2018	
50		印支	油洞岩体	中粒小斑状二云母花岗岩	SHRIMP II	232.0±4.0	12	3.2	4	黄国龙等,2012	
51		印支	寨地岩体	中粒二云母花岗岩	SHRIMP II	231±3	11	1.8	无	Deng et al., 2012	
52		印支	寨地岩体	中粒等粒状二云母花岗岩	LA-ICP-MS	234±3	12	0.64	5	孙立强,2018	
53		印支	龙华山岩体	黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	235.8±1.8	26	2.2	无	Gao et al., 2018	
54		印支	龙华山岩体	粗粒似斑状黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	231±2	14	0.48	2	孙立强,2018	
55		印支	龙华山岩体	粗粒似斑状黑云母花岗岩	SHRIMP II	236±2	11	1.3	无	Deng et al., 2012	
56		印支	江南岩体	黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	233±3	10	0.027	无	孙立强,2018	
57		印支	江南岩体	粗粒似斑状黑云母花岗岩	SHRIMP II	239±2	10	1.7	4	Deng et al., 2012	
58		印支	白云岩体	黑云母二长花岗岩	LA-ICP-MS	222.3±1.8	19	0.39	不详	Song et al., 2016	
59		印支	白云岩体	粗粒似斑状黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	233±3	11	0.039	2	孙立强,2018	
60		印支	白云岩体	粗粒似斑状黑云母花岗岩	SHRIMP II	239±4	11	3.2	4	Deng et al., 2012	
61		印支	乐洞岩体	中粒等粒状二云母花岗岩	LA-ICP-MS	233±3	12	0.22	无	孙立强,2018	
62		印支	乐洞岩体	中粒二云母花岗岩	SHRIMP II	239±5	7	2.5	1	Deng et al., 2012	
63		印支	高坪地区	细粒黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	244±2	8	1.4	8	虞航等,2017	
64		印支	高坪地区	细粒黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	252.9±1.9	10	1.8	7	虞航等,2017	
65		加里东	寨前岩体	中粒-粗中粒角闪石黑云母二长花岗岩	SHRIMP II	414.5±4.5	13	0.52	无	郭爱民等,2017	
66		加里东	桂东岩体	细中粒-中粒角闪石黑云母花岗岩闪长岩	SHRIMP II	417.3±4.8	12	0.84	无	郭爱民等,2017	
67		加里东	扶溪岩体	花岗闪长岩	LA-ICP-MS	426.7±5.4	20	1.4	无	Zhang et al., 2018	
68		加里东	扶溪岩体	花岗闪长岩	LA-ICP-MS	440.7±3.3	18	2.4	3	于玉帅等,2017	
69		下庄	燕山晚	NNE向岩脉	辉绿玢岩	K-Ar	91.3±1.8				李献华等,1997
70	燕山晚		NEE向岩脉	辉绿玢岩	K-Ar	92.7±1.8				李献华等,1997	
71	燕山晚		NWW向岩脉	角闪石	Ar-Ar	106.6±12.2				李献华等,1997	
72	燕山晚		NWW向岩脉	角闪石	Ar-Ar	110.4±3.2				李献华等,1997	
73	燕山晚		NWW向岩脉	角闪石	K-Ar	109.9±2.3				李献华等,1997	
74	燕山早		NWW向岩脉	角闪石	K-Ar	139.0±2.6				李献华等,1997	
75	燕山早		NWW向岩脉	角闪石	K-Ar	142.6±3.0				李献华等,1997	
76	燕山早		NNE向岩脉	角闪石	K-Ar	141.4±2.6				李献华等,1997	
77	燕山早		NWW向岩脉	辉绿岩	Ar-Ar	185.6±3.0				骆金诚等,2019	
78	燕山早		NNE向岩脉	辉绿玢岩	Ar-Ar	145.1±12.1				骆金诚等,2019	
79	燕山早		NEE向岩脉	闪长玢岩	Ar-Ar	179.4±2.8				骆金诚等,2019	
80	燕山早		WNW向岩脉	辉绿岩	SHRIMP II	193±4				Wang et al., 2015	
81	燕山早		WNW向岩脉	辉长岩	LA-ICP-MS	198±1				Wang et al., 2015	
82	燕山早		石土岭矿床	碱交代岩	Ar-Ar	144.09±0.82				张佳等,2015	
83	燕山早		司前岩体	中细粒二云母花岗岩	LA-ICP-MS	151±11	5	0.25	不详	Xu et al., 2003	
84	燕山早		桃村坝岩体	中粗粒似斑状黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	161.5±1.8	20	1.7	无	单芝波等,2014	
85	燕山早		竹山下岩体	细粒白云母花岗岩	SHRIMP II	161.0±3.0	8	1.16	无	王联社等,2010	
86	燕山早		隘子岩体	中粒斑状含角闪石黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	160.1±6.1	16		不详	Xu et al., 2003	
87	燕山早		笋洞岩体	中粒二云母花岗岩	单颗粒锆石稀释法	189.1±0.7	2		1	凌洪飞等,2004	
88	印支		NWW向岩脉	辉绿玢岩	Ar-Ar	202.9±3.1				无	骆金诚等,2019
89	印支		NWW向岩脉	辉绿玢岩	Ar-Ar	211.4±10.3				无	骆金诚等,2019
90	印支		帽峰岩体	细粒二云母花岗岩	LA-ICP-MS	219.6±0.9	4	1.08	3	凌洪飞等,2005	
91	印支		帽峰岩体	中细粒二云母花岗岩	LA-ICP-MS	227.1±4.8	10	3.7	不详	王军等,2014	

续表 1-2

Continued Table 1-2

序号	铀矿田	岩浆旋回	岩体/盆地	岩性	分析方法	年龄/Ma	n/颗	MSWD	高铀锆石	资料来源
92		印支	下庄岩体	中粗粒二云母花岗岩	LA-ICP-MS	230.1±2.7	17	0.79	3	高彭, 2016
93		印支	下庄岩体	中粗粒二云母花岗岩	LA-ICP-MS	233.0±2.8	17	0.38	2	高彭, 2016
94		印支	下庄岩体	中粗粒二云母花岗岩	LA-ICP-MS	237.4±2.9	16	0.56	7	高彭, 2016
95		印支	下庄岩体	中粒二云母花岗岩	LA-ICP-MS	234.5±1.2	15	1.3	不详	Chen et al., 2012
96		印支	下庄岩体	中粒二云母花岗岩	LA-ICP-MS	234.4±1.4	15	2.2	不详	Chen et al., 2012
97		印支	下庄岩体	中粒二云母花岗岩	LA-ICP-MS	235.8±7.6	11		不详	Xu et al., 2003
98		印支	下庄岩体	中粒二云母花岗岩	LA-ICP-MS	236.7±0.7	8	0.26	无	张佳, 2014
99		印支	下庄岩体	中粒黑云母花岗岩	SHRIMP II	235.9±3.3	12	1.4	无	吴佳等, 2022
100		印支	下庄岩体	中粒黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	245.4±5.9	7		不详	王军等, 2014
101		印支	白水寨岩体	细粒黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	233.6±1.4	12	0.15	9	刘文泉等, 2019
102		印支	白水寨岩体	粗粒黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	241.1±1.6	12	0.113	5	刘文泉等, 2019
103		印支	高栋岩体	中粒二云母花岗岩	LA-ICP-MS	232.8±2.6	20	0.35	4	高彭, 2016
104		印支	高栋岩体	中粒二云母花岗岩	LA-ICP-MS	236.2±2.6	20	0.74	2	高彭, 2016
105	下庄	印支	鲁溪岩体	中粗粒巨斑状黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	231.3±2.7	18	0.9	2	高彭, 2016
106		印支	鲁溪岩体	中粗粒巨斑状黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	236.6±2.6	20	0.27	2	高彭, 2016
107		印支	鲁溪岩体	中粗粒巨斑状黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	236.6±2.7	19	0.44	2	高彭, 2016
108		印支	鲁溪岩体	黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	236.9±1.7	15	3.2	不详	Chen et al., 2012
109		印支	鲁溪岩体	黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	237.3±1.6	16	2.5	不详	Chen et al., 2012
110		印支	鲁溪岩体	粗粒斑状黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	237.3±0.93	10	0.49	无	张佳, 2014
111		印支	鲁溪岩体	中粗粒巨斑状含角闪石黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	239±5	22	1.8	不详	Xu et al., 2003
112		印支	鲁溪岩体	粗粒黑云母花岗岩	SHRIMP II	240.9±2.4	11	0.38	无	吴佳等, 2022
113		印支	鲁溪岩体	粗粒巨斑状含角闪石黑云母花岗岩	LA-ICP-MS	246.2±4.4	17	1.6	不详	王军等, 2014
114	加里东	河口盆地		碎斑熔岩	SHRIMP II	443.6±5.4	13	1.3	无	巫建华等, 2012
115	加里东	河口盆地		英安岩	LA-ICP-MS	448.7±1.7	15	0.84	无	易立文等, 2014
116	加里东	南迳盆地		英安岩	SHRIMP II	439.9±3.7	15	0.5	无	丁辉等, 2017
117	加里东	南迳盆地		安山岩	SHRIMP II	442.1±3.9	14	0.75	无	丁辉等, 2017
118	加里东	苗云岩体		中细粒二云母花岗岩	SHRIMP II	442.7±3.2	15	0.84	无	马树松等, 2019

1.7)Ma,表1序号115)、南迳盆地的英安岩((439.9±3.7)Ma,表1序号116)和安山岩((442.1±3.9)Ma,表1序号117)等,年龄范围为409~448 Ma。

(2) 印支期岩浆岩

印支期岩浆岩主要有桃山铀矿田的蔡江岩体(228~230 Ma,表1序号11、13、14),诸广铀矿田的百顺岩体((226.2±2.2)Ma,表1序号48)、油洞岩体((226.4±3.5)Ma,表1序号49)、寨地岩体((231±3)Ma,表1序号51)、龙华山岩体((236±2)Ma,表1序号55)、江南岩体((233±3)Ma,表1序号56)、白云岩体((222.3±1.8)Ma,表1序号58)、乐洞岩体((233±3)Ma,表1序号61),下庄铀矿田的基性脉岩(211~202 Ma,表1序号88和89)、下庄岩体((235.9±3.3)Ma,表1序号99)、鲁溪岩体(237~241 Ma,表1序号110和112),年龄范围为202~241 Ma。

(3) 燕山期岩浆岩

燕山期岩浆岩可分为早、晚2期。燕山早期岩浆岩主要有桃山铀矿田的黄陂岩体((160.9±2.4)Ma,表1序号6),诸广铀矿田的长江基性脉岩(140~145 Ma,表1序号21和22)、鹿井基性脉岩(169~171 Ma,表1序号23、24)和广南岩体((148.2±1.7)Ma,表1序号25)、三江口岩体((155.2±2.1)Ma,表1序号26)、赤坑岩体((154±1)Ma,表1序号30)、企岭岩体((153.9±2.1)Ma,表1序号31)、长江岩体(155~159 Ma,表1序号35和41),下庄铀矿田的基性脉岩(139~179 Ma,表1序号74~79)、桃村坝岩体((161.5±1.8)Ma,表1序号84)和隘子岩体((160.1±6.1)Ma,表1序号86),年龄范围为140~179 Ma;燕山晚期岩浆岩主要有诸广铀矿田的基性脉岩(88~128 Ma,表1序号16~20)、下庄铀矿田的基性脉岩

(91~110 Ma, 表1序号69~73), 年龄范围为88~128 Ma。

3 铀成矿具有多期多阶段性

研究表明,桃山-诸广铀成矿带的矿床依据矿床构造、热液蚀变特征可划分为4类:①硅化带型,包括诸广铀矿田的鹿井矿床、棉花坑矿床、书楼丘矿床和长排矿床,下庄铀矿田的希望矿床、新桥西矿床等;②矿脉与暗色岩墙交点型(简称“交点型”),包括下庄铀矿田的下庄矿床、大帽峰矿床、磔下矿床、仙人嶂矿床和仙石矿床等;③低温伊利石化蚀变破碎带型(简称“低温伊利石化型”),包括桃山铀矿田的大布矿床和大府上矿床等;④高温绢英岩化蚀变碎裂岩带型(简称“高温绢英岩化型”),包括诸广铀矿田的澜河矿床、东坑矿床,下庄铀矿田的竹山下矿床、石土岭矿床、白水寨矿床、张光营矿床、鲁溪矿床等(杜乐天等,2011)。根据铀矿化时代,可分为早、晚2期:早期沥青铀矿呈角砾状,成矿温度较高,下庄铀矿田竹山下铀矿床出现晶质铀矿、白钨矿和电气石高温矿物组合,矿化年龄为125.0~166.4 Ma(胡宝群等,1999;2001),石土岭矿床矿石U-Pb等时线年龄为138 Ma(吴烈勤等,2003);晚期沥青铀矿呈细脉状产出,成矿温度为中低温,仙石铀矿床沥青铀矿U-Pb年龄为(81.2±7.7)Ma(毛景文等,2006)。但早期铀矿化直到2009年才引起关注,并认为石土岭矿床属于早期铀矿化、富矿(杜乐天等,2009)。随着铀矿物原位微区U-Pb定年技术的应用,桃山-诸广铀成矿带铀矿床获得了一批可靠性更高的沥青铀矿U-Pb年龄(表2),证实铀成矿具有多期多阶段性。从表2可以看出:

(1) 高温绢英岩化型铀矿床属燕山早期铀矿化的产物,交点型铀矿床也存在燕山早期铀矿化的年龄。竹山下矿床(铀矿化年龄为134 Ma,表2序号36和37)、石土岭矿床(铀矿化年龄为(138.5±1.9)Ma、>(136±3)Ma和(162±27)Ma,表2序号38、39和40)、白水寨矿床(铀矿化年龄为(175±16)Ma,表2序号41)均属高温绢英岩化型铀矿床,铀矿化年龄均大于130 Ma,属燕山早期铀矿化的产物。仙石矿床属交点型铀矿床(早期铀矿化年龄为(134.6±4.4)Ma,表2序号33~35),也存在大于130 Ma的铀矿化年龄,暗示也存在燕山早期的铀矿化;

(2) 交点型、硅化带型和低温伊利石化型铀矿

床主要属燕山晚期铀矿化的产物。鹿井矿床(铀矿化年龄为(85±2)Ma,表2序号7)、棉花坑矿床(铀矿化年龄约为70 Ma、90 Ma、100 Ma和120 Ma,表2序号9~17)、书楼丘矿床(铀矿化年龄为(71.4±1.3)Ma和(74.4±1.7)Ma,表2序号18~19)、长排矿床(铀矿化年龄为(62.4±2.5)Ma和(70.2±0.5)Ma,表2序号20和21)和希望矿床(铀矿化年龄为>(75±2)Ma、(81.8±1.1)Ma和(107±16)Ma,表2序号23~25)均属硅化带型铀矿床,铀矿化年龄均小于130 Ma,属燕山晚期铀矿化的产物。大帽峰矿床(铀矿化年龄为85 Ma,表2序号26)、磔下矿床(铀矿化年龄为(91.8±1.3)Ma、(92.2±1.3)Ma和(93.5±1.2)Ma,表2序号27~29)、仙人嶂矿床(铀矿化年龄为81 Ma,表2序号30)和仙石矿床(晚期铀矿化年龄为(79±11)Ma、(96.4±1.4)Ma、(103.7±1.8)Ma和(113.4±2.1)Ma,表2序号31~34)均属交点型铀矿床,铀矿化年龄均小于130 Ma,属燕山晚期铀矿化的产物。大布铀矿床(早期铀矿化年龄为65 Ma、(68±4)Ma和(83±4)Ma,表2序号2、4、5)属低温伊利石化型铀矿床,也存在小于130 Ma的铀矿化年龄,暗示存在燕山晚期的铀矿化;

(3) 硅化带型和低温伊利石化型铀矿床还存在喜马拉雅期的铀矿化。大布铀矿床(晚期铀矿化年龄为41 Ma和(38±1)Ma,表2序号1和3)属低温伊利石化型铀矿床,鹿井矿床(晚期铀矿化年龄为(54±1)Ma,表2序号6)、棉花坑矿床(铀矿化年龄为(60.8±0.6)Ma,表2序号8)和希望矿床(铀矿化年龄为61 Ma,表2序号22)属硅化带型铀矿床,它们都存在小于65 Ma的铀矿化年龄,暗示存在喜马拉雅期的铀矿化。

4 岩浆活动与铀矿化的关系

4.1 铀矿床主要赋存在印支期花岗岩和燕山早期花岗岩

桃山-诸广铀成矿带储矿岩体的时代具有多期次性,桃山铀矿田的大布铀矿床赋存在打鼓寨中粒二云母花岗岩(LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为(163±3)Ma,刘汉彬等,2014);诸广铀矿田的棉花坑矿床、长排矿床分别赋存在油洞中粗粒二云母花岗岩(LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为(226.4±3.5)Ma, Zhang et al., 2018)和长江中粒黑云母花岗岩(LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为(159.5±1.2)Ma,黄国龙等,2014);下

表2 桃山-诸广铀成矿带沥青铀矿成矿年龄一览表

Tabel 2 The age of uranium mineralization (pitchblende) in the Taoshan-Zhuguang uranium metallogenic belt

序号	铀矿田	矿床名称	赋矿岩体	矿床类型	成矿阶段	分析方法	成矿年龄/Ma	资料来源
1	桃山	大布铀矿床	打鼓寨岩体	低温伊利石化型	喜马拉雅期	电子探针测年	41	张鸿,2000
2		大布铀矿床	打鼓寨岩体	低温伊利石化型	燕山晚期	电子探针测年	65	张鸿,2000
3		大布铀矿床	打鼓寨岩体	低温伊利石化型	喜马拉雅期	U-Pb 等时线	38±1	夏毓亮,2019
4		大布铀矿床	打鼓寨岩体	低温伊利石化型	燕山晚期	U-Pb 等时线	68±4	夏毓亮,2019
5		大布铀矿床	打鼓寨岩体	低温伊利石化型	燕山晚期	U-Pb 等时线	83±4	夏毓亮,2019
6	诸广	鹿井矿床	中粗粒斑状黑云母花岗岩	硅化带型	喜马拉雅期	U-Pb 等时线	54±1	夏毓亮,2019
7		鹿井矿床	中粗粒斑状黑云母花岗岩	硅化带型	燕山晚期	U-Pb 等时线	85±2	夏毓亮,2019
8		棉花坑矿床	油洞岩体 长江岩体	硅化带型	喜马拉雅期	LA-ICP-MS	60.8±0.6	钟福军等,2019
9		棉花坑矿床	油洞岩体 长江岩体	硅化带型	燕山晚期	LA-ICP-MS	66.8±1.6	钟福军等,2019
10		棉花坑矿床	油洞岩体 长江岩体	硅化带型	燕山晚期	Sm-Nd 等时线	70±11	黄国龙等,2010
11		棉花坑矿床	油洞岩体	硅化带型	燕山晚期	SIMS	90±43	Bonnetti et al., 2018
12		棉花坑矿床	长江岩体	硅化带型	燕山晚期	SIMS	93±15	Bonnetti et al., 2018
13		棉花坑矿床	油洞岩体	硅化带型	燕山晚期	电子探针测年	67±2.4	张龙等,2018
14		棉花坑矿床	长江岩体	硅化带型	燕山晚期	电子探针测年	67±3.3	张龙等,2018
15		棉花坑矿床	油洞岩体 长江岩体	硅化带型	燕山晚期	电子探针测年	91±2.4	张龙等,2018
16		棉花坑矿床	油洞岩体 长江岩体	硅化带型	燕山晚期	电子探针测年	102±2.4	张龙等,2018
17		棉花坑矿床	油洞岩体 长江岩体	硅化带型	燕山晚期	电子探针测年	119±5.9	张龙等,2018
18		书楼丘矿床	长江岩体	硅化带型	燕山晚期	LA-ICP-MS	71.4±1.3	钟福军等,2019
19		书楼丘矿床	长江岩体	硅化带型	燕山晚期	LA-ICP-MS	74.4±1.7	钟福军等,2019
20		长排矿床	油洞岩体	硅化带型	燕山晚期	LA-ICP-MS	62.4±2.5	钟福军等,2019
21		长排矿床	长江岩体	硅化带型	燕山晚期	LA-ICP-MS	70.2±0.5	钟福军等,2019
22		希望矿床 330	下庄岩体	硅化带型	喜马拉雅期	U-Pb 等时线	61	李子颖等,2010
23		希望矿床 330	下庄岩体	硅化带型	燕山晚期	LA-ICP-MS	81.8±1.1	何德宝,2017
24		希望矿床 330	下庄岩体	硅化带型	燕山晚期	SIMS	> 75±2	Bonnetti et al., 2018
25		希望矿床 330	下庄岩体	硅化带型	燕山晚期	SIMS	107±16	Bonnetti et al., 2018
26		大帽峰矿床	基性岩墙	交点型	燕山晚期	U-Pb 等时线	85	李子颖等,2010
27		磬下矿床 335	基性岩墙	交点型	燕山晚期	LA-ICP-MS	91.8±1.3	何德宝,2017
28		磬下矿床 335	基性岩墙	交点型	燕山晚期	LA-ICP-MS	92.2±1.3	何德宝,2017
29		磬下矿床 335	基性岩墙	交点型	燕山晚期	LA-ICP-MS	93.5±1.2	邹东风等,2011
30		仙人嶂矿床 338	基性岩墙	交点型	燕山晚期	U-Pb 等时线	81	李子颖等,2010
31	下庄	仙石矿床 339	基性岩墙	交点型	燕山晚期	SIMS	79±11	Bonnetti et al., 2018
32		仙石矿床 339	基性岩墙	交点型	燕山晚期	LA-ICP-MS	96.4±1.4	何德宝,2017
33		仙石矿床 339	基性岩墙	交点型	燕山晚期	SIMS	103.7±1.8	Luo et al., 2015
34		仙石矿床 339	基性岩墙	交点型	燕山晚期	SIMS	113.4±2.1	Luo et al., 2015
35		仙石矿床 339	基性岩墙	交点型	燕山早期	SIMS	134.6±4.4	Luo et al., 2015
36	石土岭	竹山下矿床 333	帽峰岩体、下庄岩体	高温绢英岩化型	燕山晚期	U-Pb 等时线	129	李子颖等,2010
37		竹山下矿床 333	帽峰岩体、下庄岩体	高温绢英岩化型	燕山早期	U-Pb 等时线	134	李子颖等,2010
38		石土岭矿床 337	帽峰岩体	高温绢英岩化型	燕山早期	SIMS	> 136±3	Bonnetti et al., 2018
39		石土岭矿床 337	帽峰岩体	高温绢英岩化型	燕山早期	SIMS	162±27	Bonnetti et al., 2018
40		石土岭矿床 337	帽峰岩体	高温绢英岩化型	燕山早期	LA-ICP-MS	138.5±1.9	何德宝,2017
41		白水寨矿床	白水寨岩体	高温绢英岩化型	燕山早期	SIMS	175±16	Bonnetti et al., 2018

庄铀矿田希望矿床赋存在下庄中粒黑云母花岗岩 (SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 (235.9 ± 3.3) Ma, 吴佳等, 2022) 中, 石土岭矿床赋存在帽峰细粒二云母花岗岩 (LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 (219.6 ± 0.9) Ma, 凌洪飞等, 2005) 中。

可见, 下庄铀矿田和诸广铀矿田的储矿岩体主

要为印支期, 而桃山铀矿田的储矿岩体为燕山期。

4.2 铀成矿与赋矿岩体之间存在较大的矿岩时差

矿岩时差的概念是 20 世纪 60 年代由中国铀矿地质工作者提出的, 是指铀成矿与提供成矿物质的花岗质岩浆岩之间存在很大的年龄间隔 (杜乐天, 2011)。桃山-诸广铀成矿带铀成矿与赋矿岩体之间

存在较大的矿岩时差,如桃山铀矿田的大布铀矿床赋存在打鼓寨岩体((163±3)Ma,刘汉彬等,2014)中,最大成矿年龄为(83±4)Ma(夏毓亮,2019),矿岩时差达80 Ma,诸广铀矿田的棉花坑矿床赋存在油洞岩体((226.4±3.5)Ma,Zhang et al., 2018)和长江岩体((159.5±1.2)Ma,黄国龙等,2014)中,最大成矿年龄为(119.0±5.9)Ma(张龙等,2018),矿岩时差分别达107 Ma和40 Ma;下庄铀矿田的希望矿床赋存在下庄岩体((235.9±3.3)Ma,吴佳等,2022)中,最大成矿年龄为(107±16)Ma(Bonnetti et al., 2018),矿岩时差大于100 Ma。铀成矿与赋矿岩体之间矿岩时差相隔很大,表明成矿作用和花岗岩体形成根本不是同一地质作用。

4.3 高温绢英岩化型和交点型铀矿床的矿化时期与基性岩浆活动的时间吻合

下庄铀矿田的石土岭铀矿床、竹山下铀矿床、白水寨矿床为高温绢英岩化型铀矿床,铀矿化时间为129~175 Ma(表2序号36~41),与矿田内139~179 Ma(表1序号74~79)的基性岩浆活动的时代吻合;大帽峰矿床、礞下矿床、仙人嶂矿床和仙石矿床为交点型铀矿床,铀矿化时间为81~135 Ma(表2序号26~35),与矿田内91~139 Ma(表2序号69~74)的基性岩浆活动的时代吻合。“双混合”成因模式认为,热液铀矿床的成矿热液是富含矿化剂的高浓度原生流体与大气降水混合而成,原生流体主要来自岩浆结晶分异的流体(陈肇博,1985)。高温绢英岩化型铀矿床虽然不赋存在基性脉岩中,但铀矿化的时代与基性脉岩的形成时代吻合,交点型铀矿床铀矿化的时代不仅与基性脉岩的形成时代吻合,而且赋存在基性脉岩中。这些都为基性岩浆期后流体作为铀成矿热液中的原生流体创造了条件,暗示高温绢英岩化型和交点型铀矿床与基性岩浆活动可能存在成因上的联系。

5 问题讨论

在桃山-诸广铀成矿带的成岩成矿年代学研究中取得了一定的进展,但同时也能看出已有的年代学研究还存在以下问题。

5.1 年龄数据处理问题

桃山-诸广铀成矿带岩浆岩年代学研究中已获得一批高精度的锆石 U-Pb 年龄数据,数据分析表明,部分花岗岩的锆石 U-Pb 定年数据显示样品分析点数较少。如表1序号4、5、7、10、27、28、33、43、

47、62、63、83、85、87、90、98、100等17个锆石 U-Pb 年龄结果来自于分析点 $n < 10$ 颗的加权平均年龄计算。从数理统计角度来看,样品数小于10的结果存在较多的不确定性,可能使年龄数据的可信度降低。

部分花岗岩的锆石 U-Pb 定年数据显示 MSWD 值太大。如表1序号1、2、3、5、8、9、12、33、34、40、42、50、53、60、62、68、91、96、108、109等20个锆石 U-Pb 年龄的 MSWD 值 > 2 。当 MSWD 过于大时,则需谨慎对待测年结果(范文博等,2013),尤其是 MSWD > 2 时,也会降低年龄数据的可信度。

5.2 高铀锆石的问题

在锆石 U-Pb 同位素定年中,U含量较高的锆石对其锆石定年结果存在一定的影响(Williams et al., 2000;Leech, 2008;White et al., 2012;Gao et al., 2014;李秋立,2016;吴佳等,2022)。吴佳等(2022)对下庄铀矿田鲁溪岩体和下庄岩体锆石 U-Pb 年龄结果开展了相关性研究,单独讨论了高铀锆石的影响,发现锆石的 $w(U) > 2000 \times 10^{-6}$ 时,虽然存在部分与 $w(U) < 2000 \times 10^{-6}$ 的锆石一致的年龄,但多数年龄明显增大或减小。因此,高铀锆石年龄不一定能代表寄主岩石的形成年龄,在加权平均年龄数据处理中应尽量剔除。

分析前人的年龄数据发现,桃山-诸广铀成矿带普遍存在高铀锆石的问题,多数学者在加权平均年龄数据处理时并没有剔除高铀锆石(表1序号2、3、8、9、12、26、27、29、31、32、33、34、37、38、39、42、45、46、49、50、52、54、57、59、60、62、63、64、68、87、90、92、93、94、101、102、103、104、105、106、107),高铀锆石的影响可能使年龄数据可信度偏低。

5.3 基性脉岩锆石 U-Pb 年龄问题

Wang等(2015)采用锆石 U-Pb 方法获得下庄铀矿田的辉绿岩年龄为(193±4)Ma和辉长岩年龄为(198±1)Ma,明显大于辉绿岩(185.6±3.0)Ma的 Ar-Ar 法年龄(骆金诚等,2019)和(142.6±3.0)Ma的 K-Ar 法年龄(李献华等,1997)。事实上,由于基性岩浆硅不饱和,理论上不能形成锆石,基性脉岩中的锆石是捕获锆石(骆金诚等,2019)。因此,基性脉岩的锆石 U-Pb 年龄一般只能说明基性脉岩的形成年龄不早于这个年龄,不能代表基性脉岩的形成年龄。

测年方法选择时要根据具体情况来分析,任何一种分析方法都有其适用性和局限性,对于基性脉岩而言,现阶段用角闪石 Ar-Ar 法可能比锆石 U-Pb 方法定年获得的年龄可靠。K-Ar 法做锆石测年时

通常被认为年龄可信度低,是因为岩石中的钾含量低了,而从基性脉岩中挑选出含钾高的矿物如钾长石、云母进行K-Ar法、Ar-Ar法定年时,测出的年龄可信度高(桑海清等,2006)。

6 结 论

综上所述,可以得出以下主要结论。

(1) 桃山-诸广铀成矿带的岩浆岩是加里东期、印支期和燕山期不同岩浆旋回的产物,下庄铀矿田和诸广铀矿田的储矿岩体主要为印支期,而桃山铀矿田的储矿岩体主要为燕山期。

(2) 沥青铀矿测年显示铀成矿具有多期多阶段性,高温绢英岩化型铀矿床属燕山早期铀矿化的产物,而交点型、硅化带型和低温伊利石化型铀矿床主要属燕山晚期铀矿化的产物。

(3) 铀成矿与赋矿岩体之间存在较大的矿岩时差,但高温绢英岩化型和交点型铀矿床的矿化时期与矿田内基性岩浆活动的时间吻合,暗示基性岩浆活动可能与铀成矿作用存在成因联系。

(4) 数据分析还表明,部分岩浆岩的锆石U-Pb加权平均年龄数据存在 $n < 10$ 或MSWD > 2 的问题,部分包含了高铀锆石的年龄数据,降低了锆石U-Pb年龄的可信度;而基性脉岩的锆石U-Pb年龄一般只能说明基性脉岩的形成年龄不早于这个年龄,不能代表基性脉岩的形成年龄。

致 谢 两位匿名审稿专家提出的宝贵修改意见,极大地帮助了本文的最终定稿,作者深表谢忱!

References

- Bonnetti C, Liu X D, Mercadier J, Cuney M, Deloule E, Villeneuve J and Liu W Q. 2018. The genesis of granite-related hydrothermal uranium deposits in the Xiazhuang and Zhuguang ore fields, North Guangdong province, SE China: Insights from mineralogical, trace elements and U-Pb isotopes signatures of the U mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 92: 588-612.
- Cai Y Q, Zhang J D, Li Z Y, Guo Q Y, Song J Y, Fan H H, Liu W S, Qi F C and Zhang M L. 2015. Outline of uranium resources characteristics and metallogenetic regularity in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(6): 1051-1069(in Chinese with English abstract).
- Cao H J, Huang G H, Xu L L, Huang L Z, Wang X D, Wu J Y and Wang C S. 2013. The Ar-Ar age of geochemical characteristics of diabase dykes of the Youdong fault zone in south of Zhuguang granite pluton[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(7): 957-966(in Chinese with English abstract).
- Chen Y W, Bi X W, Hu R Z and Dong S H. 2012. Element geochemistry, mineralogy, geochronology and zircon Hf isotope of the Luxi and Xiazhuang granites in Guangdong Province, China: Implications for U mineralization[J]. *Lithos*, 150: 119-134.
- 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).
- Deng P, Ren J S, Ling H F, Shen W Z, Sun L Q, Zhu B and Tan Z Z. 2011. Yanshanian granite batholiths of southern Zhuguang Mountain: SHRIMP Zircon U-Pb dating and tectonic implications[J]. *Geological Review*, 57(6): 881-888(in Chinese with English abstract).
- Deng P, Ren J S, Ling H F, Shen W Z, Sun L Q, Zhu B and Tan Z Z. 2012. SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications for Indosinian granitoids of southern Zhuguangshan granitic composite, South China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 57(13): 1542-1552.
- Ding H, Wu J H, Lao Y J and Liu S. 2017. The establishment of the Nanjing Formation in Longtoushai Group in eastern Nanling Region and the determination of its age[J]. *Geological Bulletin of China*, 36(9): 1645-1655 (in Chinese with English abstract).
- Du L T and Wang W G. 2009. New exploration target for granite-type uranium deposits in South China: A case study on uranium mineralization of sericitic alteration[J]. *Uranium Geology*, 25(2): 85-90 (in Chinese with English abstract).
- Du L T. 2011. On the theory system of hydrothermal uranium metalization in China[J]. *Uranium Geology*, 27(2): 65-80(in Chinese with English abstract).
- Du L T, Wang W G and Liu Z Y. 2011. Evaluation of uranium deposits in China (Vol. I: Granitic uranium deposits) [R]. Beijing: China Nuclear Geology. Unpublished Report. 1357p(in Chinese).
- Fan W B, Wang W L, Chen Y L and Li D P. 2013. Methods for least squares fitting of a straight line and their application in geochronology[J]. *Geological Review*, 59(5): 801-815(in Chinese with English abstract).
- Gao P. 2016. A geochemical study of Mesozoic granites from the Nanling Range in South China (dissertation for Doctor degree)[D]. Supervisor: Zheng Y F. Hefei: University of Science and Technology of China. 167p(in Chinese with English abstract).
- Gao P, Zheng Y F, Chen Y X, Zhao Z F and Xia X P. 2018. Relict zircon U-Pb age and o isotope evidence for reworking of Neoproterozoic crustal rocks in the origin of Triassic S-type granites in South China[J]. *Lithos*, 300-301: 261-277.
- Gao Y Y, Li X H, Griffin W L, O'Reilly S Y and Wang Y F. 2014. Screening criteria for reliable U-Pb geochronology and oxygen isotope analysis in uranium-rich zircons: A case study from the Suzhou A-type granites, SE China[J]. *Lithos*, 192-195: 180-191.
- Geological and Mineral Exploration and Development Bureau of Jiangxi Province. 2017. Regional geology of China. Jiangxi chronicle[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1069p(in Chinese).

- Guo A M, Chen B H, Chen J F, Zhou C, Si C S and Zheng Z F. 2017. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of granitoids from northern Zhuguangshan granitic composite batholith, Hunan Province[J]. *Geology in China*, 44(4): 781-792(in Chinese with English abstract).
- Guo G L, Wu J H, Yang D G and Jiang W J. 2021. Tectonics and regional geology of China[M]. Beijing: Geological Publishing House. 455p(in Chinese).
- He D B. 2017. Comparative study of different types of uranium deposits in the Xiazhuang ore field, northern Guangdong Province(dissertation for Doctor degree) [D]. Supervisor: Fan H H. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology. 182p(in Chinese with English abstract).
- Hu B Q and Xu D Z. 1999. Study on the mineralization process of Zhushanxia uranium deposit[J]. *Mineral Resources and Geology*, 13(4): 222-226(in Chinese with English abstract).
- Hu B Q, Bai L H and Xu D Z. 2001. The early high-temperature uranium mineralization in Xiazhuang ore-field and its significance[J]. *Uranium Geology*, 17(5): 280-284(in Chinese with English abstract).
- Hu R Z, Luo J C, Chen Y W and Pan L C. 2019. Several progresses in the study of uranium deposits in South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9): 2625-2636(in Chinese with English abstract).
- Huang G L, Yin Z P, Ling H F, Deng P, Zhu B and Shen W Z. 2010. Formation age, geochemical characteristics and genesis of pitchblende from No.302 uranium deposit in northern Guangdong[J]. *Mineral Deposits*, 29(2): 352-359(in Chinese with English abstract).
- Huang G L, Cao H J, Ling H F, Shen W Z, Wang X D and Fu S C. 2012. Zircon SHRIMP U-Pb age, geochemistry and genesis of Youdong granite in northern Guangdong[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(4): 577-586(in Chinese with English abstract).
- Huang G L, Liu X Y, Sun L Q, Li Z S and Zhang S J. 2014. Zircon U-Pb dating, geochemical characteristic and genesis of the Changjiang granite in northern Guangdong[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(5): 836-849(in Chinese with English abstract).
- Jiang H A, Zou M L, Ouyang P N, Wang Q L, Li J and Yan Y. 2020. ^{40}Ar - ^{39}Ar age of the late stage veins in central Zhuguangshan pluton of South China and its relationship with uranium metallogenesis[J]. *Geological Bulletin of China*, 39(5): 728-734 (in Chinese with English abstract).
- Lan H F, Wang H Z, Ling H F, Chen W F, Wang K X and Wang D. 2020. Petrogenesis of the Chashan granite in the northern Guangdong Province and its implication for the metallogenic potential of tungsten and uranium mineralization[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(9): 1143-1165(in Chinese with English abstract).
- Leech M L. 2008. Does the Karakoram fault interrupt Mid-Crustal channel flow in the western Himalaya[J]? *Earth and Planetary Science Letters*, 276: 314-322.
- Li J H and Xia Z Q. 2012. The typical deposit type and rock-forming-mineralization sequence model of Taoshan-Zhuguangshan uranium metallogenic belt[J]. *Mineral Deposits*, 31(S1): 205-206(in Chinese with English abstract).
- Li J, Huang H Y, Liu Z J, Zhang T, Wang Q L, Jiang H A and Zou M L. 2021. ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology characteristics of diabase in Lujing area of middle Zhuguangshan[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 51(2): 442-454(in Chinese with English abstract).
- Li Q L. 2016. "High-U Effect" during SIMS zircon U-Pb dating[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(3): 405-412(in Chinese with English abstract).
- 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 Z Y et al. 2010. Magmatism and uranium metallogeny in Guidong area of eastern Nanling Mountains, South China[M]. Beijing: Geological Publishing House. 292p(in Chinese).
- Ling H F, Shen W Z, Deng P, Jiang S Y, Gao J F, Ye H M, Pu W and Tan Z Z. 2004. Age, geochemistry and petrogenesis of the Sundong granite, northern Guangdong Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 413-424(in Chinese with English abstract).
- Ling H F, Shen W Z, Deng P, Jiang S Y, Jiang Y H, Qiu J S, Huang G L, Ye H M and Tan Z Z. 2005. Study of geochemistry and petrogenesis of the Maofeng granite, northern Guangdong Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 677-687(in Chinese with English abstract).
- Liu H B, Jin G S, Li J J, Han J, Zhang J F, Zhang J and Ding Y J. 2014. The simple grained zircon U-Pb dating and its geological significance of Taoshan compound granite massif[J]. *World Nuclear Geoscience*, 31(2): 109-114(in Chinese with English abstract).
- Liu H B, Jin G S, Han J, Li J J, Zhang J and Zhang J F. 2015. The metallogenic age of hydrothermal type uranium deposits in southeast China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89 (S1): 157-159(in Chinese with English abstract).
- Liu W Q, Jiang W B, Li H D, Li J and Liang Y Y. 2019. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry, Hf isotope and genesis of the ore-rich granite in the Zhutongjian uranium deposit, northern Guangdong[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(7): 1720-1737(in Chinese with English abstract).
- Luo J C, Hu R Z, Fayek M, Li C H, Bi X W, Abdu Y and Chen Y W. 2015. In-situ SIMS uraninite U-Pb dating and genesis of the Xianshi granite-hosted uranium deposit, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 968-978.
- Luo J C, Qi Y Q, Wang L X, Chen Y W, Tian J J and Shi S H. 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[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9): 2660-2678(in Chinese with English abstract).
- Ma S S, Liu S, Huang M H, Wu J H and Guo H F. 2019. U-Pb geochronology, geochemistry and genesis of Miaoyun pluton in South Jiangxi Province[J]. *Science Technology and Engineering*, 19(26): 55-67(in Chinese with English abstract).

- Mao J W, Hu R Z, Chen Y C and Wang Y T. 2006. Large-scale mineralization and large-clusters of mineral deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1033p(in Chinese).
- OECD-NEA/IAEA. 2016. Uranium 2016: Resources, production and demand[M]. Paris: OECD publishing. 546p.
- Sang H Q, Wang F, He H Y, Wang Y L, Yang L K and Zhu R X. 2006. Intercalibration of ZBH-25 biotite reference material utilized for K-Ar and ^{40}Ar - ^{39}Ar age determination[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12): 3059-3078(in Chinese with English abstract).
- Shan Z B, Li K, Ling H F, Shen W Z, Huang G L and Zhu B. 2014. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry, and petrogenesis of the Taocunba granite, northern Guangdong Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 20(3): 341-352(in Chinese with English abstract).
- Shu L S. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1035-1053(in Chinese with English abstract).
- Song M J, Shu L S and Santosh M. 2016. Early Mesozoic granites in the Nanling Belt, South China: Implications for intracontinental tectonics associated with stress regime transformation[J]. *Tectonophysics*, 676: 148-169.
- Song M J. 2017. Early Paleozoic and Early Mesozoic intracontinental tectonic evolution in South China (dissertation for Doctor degree)[D]. Supervisor: Shu L S and Wang L S. Nanjing: Nanjing University. 154p(in Chinese with English abstract).
- Sun L Q. 2018. Petrogenesis of Mesozoic granites in the Zhuguangshan area in the Nanling Region and their implications for the uranium mineralization (dissertation for doctor degree) [D]. Supervisor: Ling H F. Nanjing: Nanjing University. 179p(in Chinese with English abstract).
- Tian Z J, Chen Z Y, Wang D H, Chen Z H, Huang F, Zhao Z and Hou K J. 2014. Zircon U-Pb geochronology and uranium-production capacity of the Taoshan complex in southern Jiangxi[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 33(1): 133-141(in Chinese with English abstract).
- Wang J, Zhang H R, Lai Z X and Yang K G. 2014. Controlling effect on uranium ore-forming of fault structure and its metallogenic model in Xiazhuang ore-field[J]. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science)*, 37(2): 136-142(in Chinese with English abstract).
- Wang L S, Deng P, Zhu B, Shen W Z and Tan Z Z. 2010. U-Pb isotopic dating of zircon and geochemical characteristics of Zhushanxia pluton, northern Guangdong[J]. *Uranium Geology*, 26(5): 264-270 (in Chinese with English abstract).
- Wang L X, Ma C Q, Lai Z X, Marks M, Zhang C and Zhong Y F. 2015. Early Jurassic mafic dykes from the Xiazhuang ore district (South China): Implications for tectonic evolution and uranium metallogenesis[J]. *Lithos*, 239: 71-85.
- White L T and Ireland T R. 2012. High-uranium matrix effect in zircon and its implications for SHRIMP U-Pb age determinations[J]. *Chemical Geology*, 306-307: 78-91.
- Williams I S and Hergt J M. 2000. U-Pb dating of Tasmanian dolerites: A cautionary tale of SHRIMP analysis of high-U zircon [A]. In: Woodhead J D and Noble W P, eds. *Beyond 2000: New Frontiers in Isotope Geoscience (incorporating ACOG 4): Abstracts and proceedings*[C]. Mulgrave VIC: Eastern Press. 185-188.
- Wu J, Wu J H and Liu X D. 2022. "High-uranium Effect" of zircon dating in the uranium ore district: Implications of zircon SHRIMP U-Pb ages from the Luxi and Xiazhuang granites[J]. *Geotectonica et Metallogenia*. In press(in Chinese with English abstract).
- Wu J H, Xiang Y X, Huang G R, Liu X D and Liu S. 2012. Caledonian zircon SHRIMP U-Pb age of porphyroclastic lava in northern Guangdong Province and its geological significance[J]. *Geological Journal of China Universities*, 18(4): 601-608 (in Chinese with English abstract).
- Wu J H, Guo G L, Guo J L, Zhang Q, Wu R G and Yu D G. 2017. Spatial-temporal distribution of Mesozoic igneous rock and their relationship with hydrothermal uranium deposits in eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1591-1614(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).
- Xia Y L. 2019. Geochronology of uranium mineralization in China[M]. Beijing: China Atomic Energy Press. 301p(in Chinese).
- Xu X S, Deng P, O'Reilly S Y, Griffin W L, Zhou X M and Tan Z Z. 2003. Single zircon LAM-ICPMS U-Pb dating of Guidong complex (SE China) and its petrogenetic significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(17): 1892-1899.
- Yi L W, Ma C Q, Wang L X, Lai Z X, Li X Y, Yang Y N, Wu F and Hu Y R. 2014. Discovery of Late Ordovician subvolcanic rocks in South China: Existence of subduction-related dacite from Early Paleozoic[J]? *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 39(6): 637-653(in Chinese with English abstract).
- Yu H, Cai Y Q, Li W L, Huang G H, Pang Y Q, Jiang W B and Zhang C. 2017. LA-ICP-MS Zircon U-Pb ages of the fine-grained granites in Gaoping area, South Zhuguang Mountains and their geological significances[J]. *Geological Review*, 63(3): 781-792(in Chinese with English abstract).
- Yu Y S, Dai P Y, Guo F S, Xie X Z and Bao B. 2017. Genesis and age of Fuxi granodiorite, southern Zhuguang mountain, northern Guangdong province: constrain from mineralogy chemistry, geochemistry and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating[J]. *Geological Science and Technology Information*, 36(6): 71-82(in Chinese with English abstract).
- Zhang H. 2000. Characteristics of uraninite of Dabu uranium deposit in Jiangxi Province[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 27(Supp): 103-106(in Chinese with English abstract).
- Zhang J. 2014. Study on diagenetic age, alteration age and ore-forming age in Xiazhuang uranium ore-field (dissertation for Master degree)[D]. Supervisor: Liu H B. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology. 81p(in Chinese with English abstract).

- Zhang J, Liu H B, Li J J, Jin G S, Zhang J F and Han J. 2015. Ar-Ar age of alkali metasomatic potassium feldspar in Xiaozhuang uranium deposit[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(S1): 236-237(in Chinese with English abstract).
- Zhang L, Chen Z Y, Tian Z J and Huang G L. 2016. The application of electron microprobe dating method on uranium minerals in Changjiang granite, Northern Guangdong[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 35(1): 98-107(in Chinese with English abstract).
- Zhang L, Chen Z Y, Li S R, Santosh M, Huang G L and Tian Z J. 2017. Isotope geochronology, geochemistry, and mineral chemistry of the U-bearing and barren granites from the Zhuguangshan complex, South China: Implications for petrogenesis and uranium mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 91: 1040-1065.
- Zhang L, Chen Z Y, Li S R and Huang G L. 2018. Characteristics of uranium minerals in wall-rock alteration zones of the Mianhua-keng (No. 302) uranium deposit, northern Guangdong, South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(9): 2657-2670(in Chinese with English abstract).
- Zhang L, Chen Z Y, Li X F, Li S R, Santosh M and Huang G L. 2018. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of granites in the Zhuguangshan complex, South China: Implications for uranium mineralization[J]. *Lithos*, 308-309: 19-33.
- Zhao K D, Jiang S Y, Dong C Y, Chen W F, Chen P R, Ling H F, Zhang J and Wang K X. 2011. Uranium-bearing and barren granites from the Taoshan Complex, Jiangxi Province, South China: Geochemical and petrogenetic discrimination and exploration significance[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 110: 126-135.
- Zhao K D, Jiang S Y, Chen W F, Chen P R and Ling H F. 2013. Zircon U-Pb chronology and elemental and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry of two Triassic A-type granites in South China: Implication for petrogenesis and Indosinian transtensional tectonism[J]. *Lithos*, 160-161: 292-306.
- Zhao Z F, Gao P and Zheng Y F. 2015. The source of Mesozoic granitoids in South China: Integrated geochemical constraints from the Taoshan batholith in the Nanling Range[J]. *Chemical Geology*, 395: 11-26.
- Zhong F J, Yan J, Xia F, Pan J Y, Liu W Q, Lai J and Zhao Q F. 2019. In-situ U-Pb isotope geochronology of uraninite for Changjiang granite-type uranium ore field in northern Guangdong, China: Implications for uranium mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9): 2727-2744(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 (dissertation for Doctor degree) [D]. Supervisor: Tian J C. Chengdu: Chengdu University of Technology. 114p(in Chinese with English abstract).
- Zou D F, Li F L, Zhang S, Huang B and Zong K Q. 2011. Timing of No. 335 ore deposit in Xiaozhuang uranium orefield, northern Guangdong Province: Evidence from LA-ICP-MS U-Pb dating of pitchblende[J]. *Mineral Deposits*, 30(5): 912-922(in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献
- 蔡煜琦, 张金带, 李子颖, 郭庆银, 宋继叶, 范洪海, 刘武生, 漆富成, 张明林. 2015. 中国铀矿资源特征及成矿规律概要[J]. *地质学报*, 89(6): 1051-1069.
- 曹豪杰, 黄国龙, 许丽丽, 黄乐真, 王小冬, 吴建勇, 王春双. 2013. 诸广花岗岩体南部油洞断裂带辉绿岩脉的 Ar-Ar 年龄及其地球化学特征[J]. *地质学报*, 87(7): 957-966.
- 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.
- 邓平, 任纪舜, 凌洪飞, 沈渭洲, 孙立强, 朱捌, 谭正中. 2011. 诸广山南体燕山期花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其构造意义[J]. *地质论评*, 57(6): 881-888.
- 丁辉, 巫建华, 劳玉军, 刘帅. 2017. 南岭东段龙头寨群南迳组的建立及其地质时代厘定[J]. *地质通报*, 36(9): 1645-1655.
- 杜乐天, 王文广. 2009. 华南花岗岩型铀矿找矿新目标: 绢英岩化铀矿类型[J]. *铀矿地质*, 25(2): 85-90.
- 杜乐天. 2011. 中国热液铀矿成矿理论体系[J]. *铀矿地质*, 27(2): 65-80.
- 杜乐天, 王文广, 刘正义. 2011. 中国铀矿床研究评价(第一卷: 花岗岩型铀矿床) [R]. 北京: 中国核工业地质局. 1357 页.
- 范文博, 王文龙, 陈岳龙, 李大鹏. 2013. 最小二乘直线拟合方法及其在同位素地质年代学中的应用研究[J]. *地质论评*, 59(5): 801-815.
- 高彭. 2016. 华南陆块南岭地区中生代花岗岩地球化学研究(博士论文)[D]. 导师: 郑永飞. 合肥: 中国科学技术大学. 167 页.
- 郭爱民, 陈必河, 陈剑锋, 周超, 司程山, 郑正福. 2017. 南岭诸广山北体复式花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及多期岩浆活动[J]. *中国地质*, 44(4): 781-792.
- 郭国林, 巫建华, 杨东光, 江文剑. 2021. 大地构造学与中国区域地质学[M]. 北京: 地质出版社. 455 页.
- 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(博士论文)[D]. 导师: 范洪海. 北京: 核工业北京地质研究院. 182 页.
- 胡宝群, 徐达忠. 1999. 竹山下铀矿床成矿过程探讨[J]. *矿产与地质*, 13(4): 222-226.
- 胡宝群, 白丽红, 徐达忠. 2001. 下庄铀矿田早期高温成矿作用及其意义[J]. *铀矿地质*, 17(5): 280-284.
- 胡瑞忠, 骆金诚, 陈佑纬, 潘力川. 2019. 华南铀矿床研究若干进展[J]. *岩石学报*, 35(9): 2625-2636.
- 黄国龙, 尹征平, 凌洪飞, 邓平, 朱捌, 沈渭洲. 2010. 粤北地区 302 矿床沥青铀矿的形成时代、地球化学特征及其成因研究[J]. *矿床地质*, 29(2): 352-359.
- 黄国龙, 曹豪杰, 凌洪飞, 沈渭洲, 王小冬, 伏顺成. 2012. 粤北油洞岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其成因研究[J]. *地质学报*, 86(4): 577-586.
- 黄国龙, 刘鑫扬, 孙立强, 李钟枢, 张世佳. 2014. 粤北长江岩体的锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及其成因研究[J]. *地质学报*, 88(5): 836-849.

- 江西省地质矿产勘查开发局, 编著. 2017. 中国区域地质志·江西志[M]. 北京: 地质出版社. 1069页.
- 蒋红安, 邹明亮, 欧阳平宁, 王前林, 李杰, 颜越. 2020. 华南诸广山岩体中段岩脉 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及与铀成矿关系[J]. 地质通报, 39(5): 728-734.
- 兰鸿锋, 王洪作, 凌洪飞, 陈卫锋, 王凯兴, 王丹. 2020. 粤北茶山岩体岩石成因与铀、钨成矿潜力探讨[J]. 地质学报, 94(4): 1143-1165.
- 李建红, 夏宗强. 2012. 桃山-诸广山铀成矿带典型矿床式和成岩成矿序列模式[J]. 矿床地质, 31(S1): 205-206.
- 李杰, 黄宏业, 刘子杰, 张涛, 王前林, 蒋红安, 邹明亮. 2021. 诸广中段鹿井地区辉绿岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 51(2): 442-454.
- 李秋立. 2016. 离子探针锆石U-Pb定年的“高U效应”[J]. 矿物岩石地球化学通报, 35(3): 405-412.
- 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.
- 李子颖, 等. 2010. 南岭贵东岩浆岩与铀成矿作用[M]. 北京: 地质出版社. 292页.
- 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[J]. 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[J]. 岩石学报, 21(3): 677-687.
- 刘汉彬, 金贵善, 李军杰, 韩娟, 张建锋, 张佳, 丁迎军. 2014. 桃山复式花岗岩体单颗粒锆石U-Pb年龄及地质意义[J]. 世界核地质科学, 31(2): 109-114.
- 刘汉彬, 金贵善, 韩娟, 李军杰, 张佳, 张建锋. 2015. 华东南地区热液型铀成矿年代[J]. 地质学报, 89(S1): 157-159.
- 刘文泉, 江卫兵, 李海东, 李俊, 梁园园. 2019. 粤北竹筒尖铀矿床特富矿赋矿花岗岩锆石U-Pb年代学、地球化学、Hf同位素及其成因研究[J]. 地质学报, 93(7): 1720-1737.
- 骆金诚, 齐有强, 王连训, 陈佑伟, 田建吉, 石少华. 2019. 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[J]. 岩石学报, 35(9): 2660-2678.
- 马树松, 刘帅, 黄美化, 巫建华, 郭恒飞. 2019. 赣南苗云岩体U-Pb年代学、地球化学特征及其成因[J]. 科学技术与工程, 19(26): 55-67.
- 毛景文, 胡瑞忠, 陈毓川, 王义天. 2006. 大规模成矿作用与大型矿集区[M]. 北京: 地质出版社. 1033页.
- 桑海清, 王非, 贺怀宇, 王英兰, 杨列坤, 朱日祥. 2006. K-Ar法地质年龄国家一级标准物质ZBH-25黑云母的研制[J]. 岩石学报, 22(12): 3059-3078.
- 单芝波, 李坤, 洪凌飞, 沈渭洲, 黄国龙, 朱捌. 2014. 粤北桃花坝花岗岩锆石U-Pb年代学、地球化学及成因研究[J]. 高校地质学报, 20(3): 341-352.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 31(7): 1035-1053.
- 宋美佳. 2017. 华南早古生代与早中生代陆内构造演化(博士学位论文)[D]. 导师: 舒良树, 王良书. 南京: 南京大学. 154页.
- 孙立强. 2018. 南岭诸广山地区中生代花岗岩成因及其对铀成矿作用的启示(博士学位论文)[D]. 导师: 凌洪飞. 南京: 南京大学. 179页.
- 田泽瑾, 陈振宇, 王登红, 陈郑辉, 黄凡, 赵正, 侯可军. 2014. 赣南桃山复式岩体的锆石U-Pb年代学及其产铀性探讨[J]. 岩矿测试, 33(1): 133-141.
- 王军, 张辉仁, 赖中信, 杨坤光. 2014. 粤北下庄矿田断裂构造对铀成矿的控制作用及其成矿模式[J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 37(2): 136-142.
- 王联社, 邓平, 朱捌, 沈渭洲, 谭正中. 2010. 粤北竹山下岩体锆石U-Pb同位素定年及其地球化学特征[J]. 铀矿地质, 26(5): 264-270.
- 巫建华, 项媛馨, 黄国荣, 刘晓东, 刘帅. 2012. 广东北部碎斑熔岩加里东期锆石SHRIMP U-Pb年龄的收获及其地质意义[J]. 高校地质学报, 18(4): 601-608.
- 巫建华, 郭国林, 郭佳磊, 张旗, 吴仁贵, 余达淦. 2017. 中国东部中生代岩浆岩的时空分布及其与热液型铀矿的关系[J]. 岩石学报, 33(5): 1591-1614.
- 吴佳, 巫建华, 刘晓东, 王凯兴, 刘帅. 2022. 铀矿区花岗岩锆石定年的“高铀效应”: 来自鲁溪和下庄花岗岩SHRIMP锆石U-Pb年龄的启示[J]. 大地构造与成矿学, 录用待刊.
- 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[J]. 铀矿地质, 19(1): 28-33.
- 夏毓亮. 2019. 中国铀成矿地质年代学[M]. 北京: 中国原子能出版社. 301页.
- 易立文, 马昌前, 王连训, 赖中信, 李湘玉, 杨亚楠, 吴飞, 胡晏如. 2014. 华南晚奥陶世火山岩的发现: 早古生代与俯冲有关的英安岩[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 39(6): 637-653.
- 于玉帅, 戴平云, 郭福生, 谢小占, 鲍波. 2017. 粤北扶溪岩体成因及时代: 来自矿物化学、岩石地球化学及LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄证据[J]. 地质科技情报, 36(6): 71-82.
- 虞航, 蔡煜琦, 李伟林, 黄国龙, 庞雅庆, 江卫兵, 张闯. 2017. 诸广山南部高坪地区细粒花岗岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及其地质意义[J]. 地质评论, 63(3): 781-792.
- 张鸿. 2000. 江西省大布铀矿床沥青铀矿特征[J]. 成都理工学院学报, 27(S1): 103-106.
- 张佳. 2014. 下庄铀矿田成岩成矿及蚀变年代特征研究(硕士学位论文)[D]. 导师: 刘汉彬. 北京: 核工业北京地质研究院. 81页.
- 张佳, 刘汉彬, 李军杰, 金贵善, 张建锋, 韩娟. 2015. 下庄铀矿田碱交代钾长石Ar-Ar定年研究[J]. 地质学报, 89(S1): 236-237.
- 张龙, 陈振宇, 田泽瑾, 黄国龙. 2016. 电子探针测年方法应用于粤北长山岩体的铀矿物年龄研究[J]. 岩矿测试, 35(1): 98-107.
- 张龙, 陈振宇, 李胜荣, 黄国龙. 2018. 粤北棉花坑(302)铀矿床围岩蚀变分带的铀矿物研究[J]. 岩石学报, 34(9): 2657-2670.
- 钟福军, 严杰, 夏菲, 潘家永, 刘文泉, 赖静, 赵奇峰. 2019. 粤北长江花岗岩型铀矿田沥青原位U-Pb年代学研究及其地质意义[J]. 岩石学报, 35(9): 2727-2744.
- 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)[D]. 导师: 田景春. 成都: 成都理工大学. 114页.
- 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[J]. 矿床地质, 30(5): 912-922.