

编号: 0258-7106(2011)05-0912-11

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

邹东风¹ 李方林^{2**} 张爽¹ 黄彬¹ 宗克清²

(1 中国地质大学研究生院, 湖北 武汉 430074; 2 中国地质大学地球科学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 文章采用 LA-ICP-MS 测试技术对下庄矿田 335 矿床的沥青铀矿开展了 U-Pb 微区定年工作。335 矿床沥青铀矿的成分特征及微观形貌特征显示, 本区沥青铀矿在初始形成之后受到过后期的一些地质事件的影响。本次获得沥青铀矿的最大年龄为 $(93.5 \pm 1.2) \text{Ma}$ 。结合华南岩石圈伸展发生的时间、辉绿岩脉对铀矿的控制作用及区内辉绿岩脉的侵位时间, 对本区铀矿的形成特点进行了探讨。结果表明, 该年龄符合华南铀矿在时间上的一些客观成矿规律, 可基本上代表 335 矿床的成矿年龄。

关键词 地球化学; 成矿时代; LA-ICP-MS 沥青铀矿; 铀矿床; 粤北

中图分类号: P619.14

文献标志码: A

Timing of No. 335 ore deposit in Xiazhuang uranium orefield, northern Guangdong Province: Evidence from LA-ICP-MS U-Pb dating of pitchblende

ZOU DongFeng¹, LI FangLin², ZHANG Shuang¹, HUANG Bin¹ and ZONG KeQing²

(1 Postgraduate School, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 2 Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract

In this paper, an accurate U-Pb age of pitchblende was obtained from the No. 335 uranium deposit in the Xiazhuang uranium orefield by using the LA-ICP-MS technique. The compositional and micro-morphologic characteristics of the pitchblende from the No. 335 ore deposit show that it has been altered by some subsequent geological events. $(93.5 \pm 1.2) \text{Ma}$ is the oldest age in this study. A discussion has been made on the basis of integration of lithosphere extension timing of South China, the control of the diabase dike over the uranium mineralization and the emplacement time of diabase dikes in this ore deposit. It is revealed that the obtained age can reflect some rules of uranium ore formation in South China and might approximately represent the ore-forming age of the No. 335 ore deposit.

Key words: geochemistry, metallogenic epoch, LA-ICP-MS, pitchblende, uranium deposit, northern Guangdong

华南是中国重要的铀矿产区之一, 主要产出有花岗岩型、火山岩型和碳硅泥岩型铀矿床(胡瑞忠等, 2007)。早在上世纪八十年代就有学者提出华南各类型铀矿成矿时代一致性的论述(杜乐天等,

1984)。已经确定华南白垩纪—第三纪期间发生过几期大规模的岩石圈伸展运动(李献华等, 1997; Li, 2000; 华仁民等, 2005b)。近年来, 有关华南大地构造与成矿学的研究表明铀矿成矿主要是受

* 本文得到南岭贵东花岗岩体构造变形与铀矿成矿关系研究(2009016103)项目资助

第一作者简介 邹东风, 男, 1987年生, 硕士研究生, 主要从事勘查地球化学研究。Email: zoudf012@126.com

** 通信作者 李方林, 男, 1961年生, 教授, 主要从事地球化学研究与教学。Email: fanglinli@cug.edu.cn

收稿日期 2010-12-07; 改回日期 2011-05-07。张绮玲编辑。

华南燕山晚期岩石圈伸展的控制(胡瑞忠等,2004;华仁民等,2005a,2005b;Hu et al,2008)。此外,年代学的统计结果也表明华南不同类型铀矿有着大致相同的6个主成矿期且与华南岩石圈伸展的时间具有一定的对应关系(胡瑞忠等,2007)。但这种对应关系多是根据大尺度范围考虑的,还有待在矿田(床)尺度范围内做进一步的佐证(胡瑞忠等,2007)。

粤北下庄铀矿田是中国最早发现和最重要的花岗岩型铀矿田之一,矿田内分布有330、331、335、337和338等几个大型的铀矿床(吴烈勤等,2003)。前人对该矿田内的多个矿床做过相关的定年工作,但效果并不理想。主要表现在同一个矿床同时拥有多个不同的年龄值,且不同人获得的年龄值差异较大,造成对该矿田成矿时代及成矿期次划分紊乱,严重阻碍了对该类型矿床成矿作用的认识及相关理论的发展,因此有必要对相关矿床的成矿时代重新加以厘定。传统的铀矿定年多采用的是沥青铀矿同位素稀释法,对沥青铀矿的微区定年在国内还少见报道。Chipley等(2007)利用激光剥蚀电感耦合等离子体

质谱(LA-ICP-MS)测试技术对澳大利亚 Adelaide 等矿床晶质铀矿和铀钛磁铁矿进行了微区定年分析,结果表明 LA-ICP-MS 是一种快速、准确的测定铀矿年龄的方法。本文以下庄矿田 335 矿床为例,尝试利用 LA-ICP-MS 测试技术对 335 矿床的成矿时代加以厘定。

1 基础地质

335 大型铀矿床位于广东省北部贵东岩体的东部,区域上处于闽赣后加里东隆起西南缘与湘桂粤北海西-印支凹陷带的交汇部位(徐夕生等,2003;舒良树等,2006)。矿区出露的岩石主要为中粒似斑状黑云母花岗岩(下庄岩体),局部可见不等粒小斑状黑云母花岗岩及后期的细粒白云母花岗岩、细粒黑云母花岗岩、角闪辉绿岩、伟晶岩、石英脉等脉岩和构造作用形成的花岗碎裂岩、花岗正长岩、纤闪石化角闪辉绿岩。矿区主要有 EW 向、NS 向、NW 向和 NE 向、NNE 向几组构造(图 1)。矿体几乎都

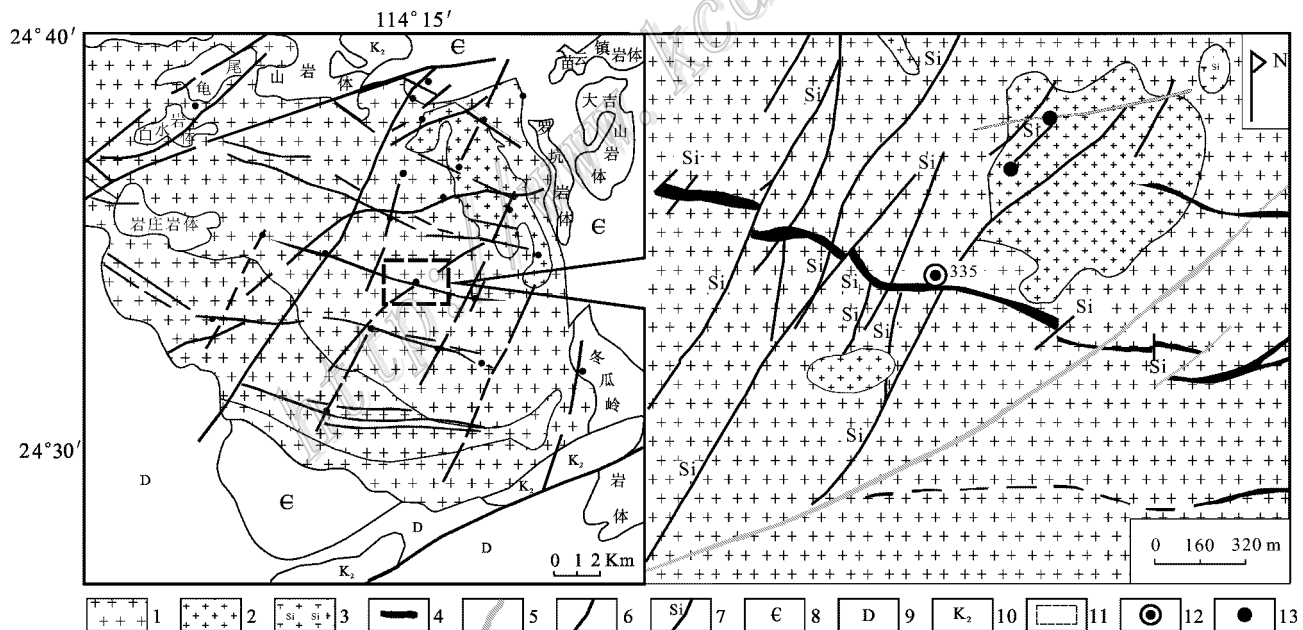


图 1 335 铀矿床地质简图(据核工业 293 大队^①)

1—中粒似斑状黑云母花岗岩;2—细粒白云母花岗岩;3—石英正长岩;4—辉绿岩;5—蚀变碎裂岩带;6—断裂带;7—硅化断裂带;8—寒武纪地层;9—泥盆纪地层;10—晚白垩世地层;11—研究区位置;12—335 矿床;13—矿床或矿化点

Fig. 1 Sketch geological map of the No. 335 uranium deposit (after No. 293 Geological Party for Nuclear Industry)
1—Medium-grained porphyritic biotite granite; 2—Fine-grained muscovite granite; 3—Quartz syenite; 4—Diabase; 5—Altered cataclastic belt; 6—Fault; 7—Silicified fault zone; 8—Cambrian strata; 9—Devonian strata; 10—Late Cretaceous strata; 11—Study area; 12—No. 335 ore deposit; 13—Ore deposit or mineralized spot

① 核工业 293 大队. 2009. 南岭贵东花岗岩体构造变形与铀矿成矿关系研究项目设计书(内部资料).

赋存在 NNE 向或 NE 向硅化带与北西向角闪辉绿岩反接部位中,少数规模小的矿体赋存在 NE 向或 NNE 向硅化带中,以及两组硅化带的交接部位中。

矿区矿石组分简单,金属矿物主要有沥青铀矿、黄铁矿、白铁矿、赤铁矿及少量黄铜矿、方铅矿、闪锌矿,脉石矿物主要有石英、玉髓、方解石和萤石。沥青铀矿在本区主要呈细脉状、团块状穿插于黄铁矿中,或呈球粒状、结核状交代黄铁矿,或与黄铁矿吻合生长或碎裂成小块被黄铁矿包裹;黄铁矿与沥青铀矿相互交代,相互穿插,形态复杂。黄铁矿生长时期长,与成矿关系密切的主要呈胶状、细脉状、网脉状或浸染状,结晶程度差,光泽不新鲜;成矿前或成矿后的黄铁矿一般晶形好、颗粒粗、反射率高,表面干净。同时,有少量白铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等金属硫化物呈浸染状、乳浊状分散于沥青铀矿之中。沥青铀矿与石英-玉髓关系密切,常见到沥青铀矿和黄铁矿呈不规则角砾或团块被红色、黑色玉髓胶结。红色玉髓一般混有赤铁矿,黑色玉髓则混有黄铁矿,如果混入物的成分复杂,则统称为硅质岩。另外,还可见到沥青铀矿呈不规则脉状与红色方解石、紫黑色萤石密切共生。一般红色方解石和紫色萤石比沥青铀矿稍晚,而白色方解石与绿色萤石多为成矿后期的产物。前人报道 335 矿床的成矿年龄为 59.5 Ma、62 Ma(吴烈勤等,2003)和 71 Ma(胡瑞忠等,1993)。

2 取样与测试分析

所测年沥青铀矿样品取自 335 矿床 17 号坑道,取样点可见沥青铀矿与红色方解石、紫黑色萤石共生。

沥青铀矿 U-Pb 同位素定年和元素含量在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用 LA-ICP-MS 分析完成。U-Pb 同位素定年和元素含量采用了同时分析和独立分析两种测试方法。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005,ICP-MS 为 Agilent 7500a。激光斑束为 32 μm ,激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度。每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号。U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正,每分析 5 个样品点,分析 2 次 91500,锆石标准 91500 的 U-Pb 同位素比值推荐值据 Wiedenbeck 等(1995)。详细的

分析及仪器参数可参考 Chipley 等(2007)。沥青铀矿元素含量测试以 USGS 参考玻璃(如 BCR-2G, BIR-1G 和 BHVO-2G)为校正标准,采用多外标、无内标法对元素含量进行定量计算(Liu et al., 2008)。沥青铀矿样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot/Ex-ver3(Ludwig, 2003)完成。

3 测试结果

3.1 U-Pb 年龄

表 1 为 335 矿床沥青铀矿 U-Pb 同位素数据,error 为计算年龄误差较大,该组数据未参与计算。本次获得的 32 个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄数据主要分布在 70.7~96 Ma 之间(表 1)。在 U-Pb 谐和图上呈现出较高的谐和度,并显示出较为明显的 3 个区间段(图 2)。第一段包含 10 个测试点, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 90.8~96 Ma 之间, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(93.5 \pm 1.2)\text{Ma}$ (MSWD=1.7),是本次获得的最大年龄,这一年龄可能代表了 335 矿床的初始成矿年龄;第二段包含 15 个测试点, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 76.9~87 Ma 之间, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(81.0 \pm 1.9)\text{Ma}$ (MSWD=17),该年龄的 MSWD 值较大,说明在该段年龄范围的置信区间内发生了不止一次地质事件,该年龄本身不具备任何地质意义;第三段包含 7 个测试点, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 70.7~75.5 Ma 之间, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(73.1 \pm 1.4)\text{Ma}$ (MSWD=5.1),这个年龄可能指示的是 335 矿床经历的一次晚期地质事件的时间,该事件致使沥青铀矿 U-Pb 体系被重置。

3.2 稀土元素配分特征

从图 3 中沥青铀矿的稀土元素配分模式及表 2 中数据来看,本次获得的沥青铀矿的 REE 特征可分为较为明显的 2 组。T-5、T-6、F-1、F-3 构成第一组,该组具有最高的 ΣREE 值,含量介于 $642.4 \times 10^{-6} \sim 1\,057.4 \times 10^{-6}$ 之间,轻重稀土元素比值(LREE/HREE)介于 0.6~0.91 之间, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值介于 0.45~0.72 之间, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 值介于 0.49~1.08 之间;T-4、F-2、F-4、F-5 为第二组,该组的 ΣREE 含量介于 $44.5 \times 10^{-6} \sim 295.7 \times 10^{-6}$ 之间,LREE/HREE 比值介于 1.04~1.73 之间, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值介于 0.91~6.55 之间, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 值介于 1.17~2.32 之间。从 T-4、T-5、T-6 与其相对应的年龄值来看,发现它

表 1 335 矿床沥青铀矿 U-Pb 同位素分析结果
Table 1 U-Pb isotopic composition of pitchblende from the No. 335 ore deposit

测试点	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		rho	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		Concord
	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ		年龄/Ma	1σ	年龄/Ma	1σ	年龄/Ma	1σ	
1	0.0487	0.0023	0.0834	0.0039	0.0124	0.0002	0.2864	200	111	81	4	80	1	97%
2	0.0489	0.0026	0.0887	0.0062	0.0125	0.0002	0.2705	143	124	86	6	80	2	92%
3	0.0466	0.0012	0.0739	0.0021	0.0114	0.0001	0.3533	31.6	63.0	72	2	73	1	98%
4	0.0468	0.0036	0.0828	0.0070	0.0123	0.0002	0.1945	35.3	177.8	81	7	79	1	97%
5	0.0490	0.0018	0.0863	0.0031	0.0128	0.0002	0.3313	150	85	84	3	82	1	97%
6	0.0490	0.0015	0.0759	0.0023	0.0112	0.0001	0.3934	146	70	74	2	72	1	96%
7	0.0471	0.0015	0.0824	0.0028	0.0128	0.0002	0.3785	57.5	74.1	80	3	82	1	98%
8	0.0473	0.0022	0.0883	0.0044	0.0136	0.0001	0.2155	64.9	103.7	86	4	87	1	98%
9	0.0482	0.0027	0.0972	0.0062	0.0147	0.0001	0.1574	109	130	94	6	94	1	99%
10	0.0465	0.0035	0.0841	0.0078	0.0131	0.0003	0.2131	33.4	161.1	82	7	84	2	97%
11	0.0403	0.0036	0.0789	0.0082	0.0143	0.0002	0.1643	error	error	77	8	92	2	82%
12	0.0426	0.0046	0.0716	0.0091	0.0123	0.0002	0.1186	error	error	70	9	79	1	88%
13	0.0513	0.0016	0.0806	0.0034	0.0110	0.0001	0.2321	254	69	78.7	3.2	70.7	0.7	89%
14	0.0563	0.0022	0.1118	0.0050	0.0142	0.0001	0.2274	465	85	108	5	90.8	0.9	83%
15	0.0533	0.0010	0.0904	0.0019	0.0122	0.0001	0.3527	343	44	87.9	1.8	78.0	0.6	88%
16	0.0542	0.0012	0.0906	0.0023	0.0120	0.0001	0.2958	389	50	88.1	2.2	76.9	0.6	86%
17	0.0189	0.0112	0.1018	0.0231	0.0147	0.0004	0.1256	error	error	98.5	21.3	94.1	2.7	95%
18	0.0565	0.0018	0.0886	0.0031	0.0113	0.0001	0.2323	472	38	86.2	2.9	72.2	0.6	82%
19	0.0555	0.0026	0.1041	0.0057	0.0130	0.0001	0.1967	435	136	101	5	83.4	0.9	81%
20	0.0551	0.0015	0.0905	0.0029	0.0118	0.0001	0.2964	417	61	87.9	2.7	75.5	0.7	84%
21	0.0550	0.0016	0.0949	0.0032	0.0124	0.0001	0.2030	409	67	92.1	2.9	79.2	0.5	84%
22	0.0527	0.0010	0.0844	0.0020	0.0115	0.0001	0.3022	317	44	82.3	1.8	73.7	0.5	89%
23	0.0533	0.0020	0.1016	0.0040	0.0136	0.0001	0.1955	343	88	98.2	3.7	87.2	0.7	88%
24	0.0541	0.0016	0.1118	0.0039	0.0147	0.0001	0.2070	372	67	108	4	94.3	0.7	86%
25	0.0500	0.0020	0.0828	0.0041	0.0116	0.0001	0.2199	198	93	80.8	3.8	74.2	0.8	91%
26	0.0124	0.0104	0.0960	0.0284	0.0145	0.0005	0.1221	error	error	93.0	26.3	92.8	3.3	99%
27	0.0532	0.0022	0.0968	0.0044	0.0129	0.0001	0.1743	339	94	93.8	4.1	82.6	0.7	87%
28	0.0496	0.0019	0.1037	0.0054	0.0148	0.0003	0.4166	176	91	100	5	94.4	2.0	94%
29	0.0479	0.0022	0.0993	0.0060	0.0145	0.0003	0.3972	94.5	116.7	96.1	5.5	93.0	2.2	96%
30	0.0452	0.0035	0.0991	0.0082	0.0150	0.0002	0.1828	error	error	95.9	7.6	96.0	1.4	99%
31	0.0379	0.0055	0.0913	0.0116	0.0145	0.0003	0.1591	error	error	88.7	10.8	93.0	1.9	95%
32	0.0471	0.0015	0.0865	0.0038	0.0130	0.0002	0.3715	53.8	74.1	84.3	3.6	83.5	1.4	99%

注：表 1 中 1~12 号测试点的年龄为与表 2 中 T-1~T-12 号点的元素含量数据同时分析获得，13-32 为单独分析结果，error 为无效数据。

表 2 335 矿床沥青铀矿常量元素、微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果

Table 2 Major and minor element composition of pitchblende from the No. 335 ore deposit

	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6	T-7	T-8	T-9	T-10	T-11	T-12	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5
Na	1615	1704	2227	2129	711	634	1026	1146	4253	916	1167	1256	781	928	795	817	819
Al	2859	2215	1839	2353	714	806	1115	1231	1395	1273	1095	1143	681	707	709	839	651
CaO*	19.0	21.3	23.7	19.5	11.4	11.5	17.1	15.8	12.1	15.4	15.9	15.5	8.68	9.11	7.97	8.74	8.58
V	458	593	531	478	269	257	449	517	530	463	429	384	173	164	166	191	169
Mn	8187	6235	7087	7772	5147	5227	5069	5546	5802	5399	5218	5295	3203	2960	3423	3020	3028
Sr	260	208	204	178	180	173	205	196	211	191	194	194	115	126	111	132	114
Y	215	57.3	41.1	551	641	1028	26.6	44.7	41.9	16.6	23.5	147	585	116	621	110	211
Sb	206	199	189	185	202	224	161	195	209	177	171	240	278	302	270	327	287
Ba	171	115	92.7	88.2	101	84.0	97.5	97.5	110	94.7	101	81.1	54.5	65.6	50.1	66.7	54.4
La	21.3	9.37	7.96	24.9	34.4	79.8	2.82	5.79	5.18	2.74	4.06	17.2	33.4	10.2	35.3	12.1	18.5
Ce	28.3	6.95	5.79	58.2	101	184	3.52	8.47	6.22	1.00	9.21	17.3	105	11.6	126	17.1	41.0
Pr	2.42	0.50	0.31	6.68	17.6	28.4	-	0.58	1.15	0.67	-	2.46	18.1	1.09	23.5	2.02	4.71
Nd	10.9	8.85	-	37.0	75.5	125	5.22	7.08	6.66	-	3.67	0.84	75.6	3.82	105	9.10	17.8
Sm	6.60	1.92	4.22	17.7	44.3	71.2	2.97	-	1.91	-	-	0.79	34.4	1.00	50.9	2.92	6.34
Eu	0.71	0.39	-	6.30	13.0	15.3	-	1.32	0.69	0.25	0.54	-	11.9	0.53	16.3	1.14	2.60
Gd	17.5	5.42	7.79	39.9	66.8	83.1	-	7.05	7.03	0.57	3.22	10.2	69.9	5.08	88.5	9.53	17.0
Tb	2.40	0.069	0.60	5.44	17.1	24.0	0.14	1.03	0.50	0.33	0.44	0.97	16.1	0.66	22.6	1.62	2.79
Dy	20.3	1.43	1.50	44.7	114	173	1.21	5.06	3.59	4.50	2.54	3.70	116	4.10	165	10.1	17.1
Ho	3.74	0.58	0.50	9.68	23.8	33.8	0.39	0.59	0.29	0.23	-	0.86	22.1	0.94	30.3	2.21	3.38
Er	14.8	2.94	0.38	25.4	63.1	111	1.25	1.35	0.90	-	0.63	2.50	76.2	2.81	109	7.66	10.2
Tm	1.49	0.16	0.22	3.24	11.2	14.9	-	0.19	0.35	-	-	0.59	10.6	0.31	16.1	0.89	1.17
Yb	4.36	-	-	14.2	51.1	101	0.27	0.11	-	0.70	0.67	3.30	95.0	2.10	148	6.73	7.88
Lu	1.22	-	0.022	2.36	9.54	13.7	0.29	0.14	-	0.035	0.17	0.71	11.9	0.34	17.7	1.06	1.25
W	2758	2459	2297	2870	2712	3053	2016	1995	1940	2574	1987	2679	1612	1397	1699	1618	1533
Bi	67.6	14.3	12.8	131	87.6	146	3.64	23.4	16.0	2.54	16.3	10.5	630	115	1075	0.76	190
Pb	9376.2	10131.1	7216.4	10890	11815.5	9054	8604.38	10503.6	12134.8	9499.29	10343.4	8265.0	5660	3417	12205	310.93	3998
Th	-	-	-	0.19	0.19	0.35	0.050	0.017	0.16	0.20	0.27	0.11	-	0.0049	0.0076	-	-
UO ₂ *	74.2	71.9	70.8	73.0	81.4	82.5	77.4	77.6	80.1	78.5	77.7	79.0	77.75	77.78	77.53	78.20	78.25
ΣREE	136.2	38.6	29.3	295.7	642.4	1057.4	18.1	38.8	34.5	11.0	25.1	61.4	696.6	44.5	953.8	84.2	151.6
LREE	70.4	28.0	18.3	150.8	285.8	503.3	14.5	23.2	21.8	4.7	17.5	38.6	278.7	28.2	357.2	44.4	90.9
HREE	65.8	10.6	11.0	144.9	356.6	554.1	3.6	15.5	12.7	6.4	7.7	22.8	417.9	16.3	596.7	39.8	60.7
L/H**	1.07	2.64	1.66	1.04	0.80	0.91	4.08	1.50	1.72	0.73	2.28	1.69	0.67	1.73	0.60	1.11	1.50
(La/Sm) ^N *	2.09	3.15	1.22	0.91	0.50	0.72	0.61	-	1.75	-	-	-	0.63	6.55	0.45	2.68	1.88
(La/Yb) ^N *	3.51	-	-	1.26	0.48	0.57	7.43	38.73	-	2.80	4.33	3.74	0.25	3.47	0.17	1.29	1.68
(Gd/Yb) ^N *	3.32	-	-	2.32	1.08	0.68	0.00	54.40	-	0.67	3.96	2.56	0.61	2.00	0.49	1.17	1.78
δEu**	0.20	0.37	0.00	0.72	0.73	0.61	-	-	0.58	-	-	0.00	0.74	0.71	0.74	0.66	0.77

注: * 单位为%, ** 单位为1。表 2 中 T-1 至 T-12 的数据与表 1 中 1 至 12 号点的年龄数据同时分析获得, F-1 至 F-5 为单独分析结果。“-”为未检测出。

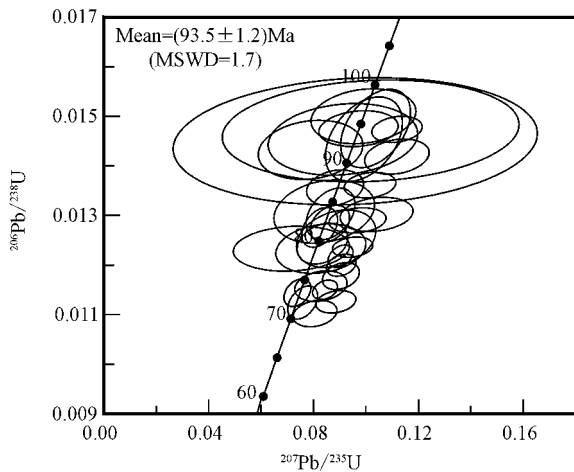


图2 335矿床沥青铀矿 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 2 Concordia diagram of pitchblende from the No. 335 ore deposit

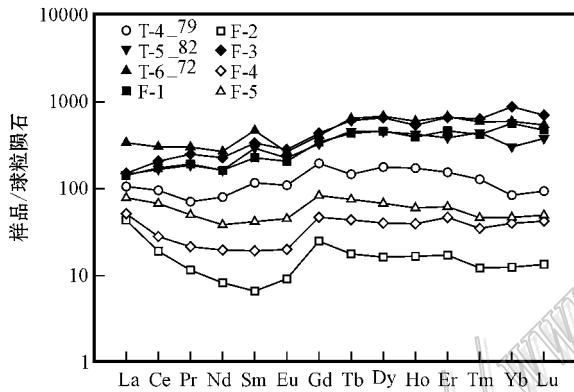


图3 335矿床沥青铀矿 REE 配分模式图

T-4、T-5、T-6 后面的数值为该点相对应的年龄

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of pitchblende from the No. 335 ore deposit

The values behind T-4, T-5 and T-6 are U-Pb ages

们的对应关系不明确,表现在具有相似年龄值的测试点在上述两组 REE 中均有分布。

4 讨论

4.1 335 矿床的成矿时代

传统观念上认为 REE 非常稳定且不易迁移。近年来大量的研究表明,在热液条件下 REE 是可以迁移的,且在一定条件下能和某些金属元素一起沉淀形成矿床,如 U-REE 矿(Perhac et al., 1964; Mclennan et al., 1979; Metz et al., 1985; Fryer et al., 1987; Kwak et al., 1987)。在热水条件下 REE 容易呈氟化物、氯化物及碳酸盐络合物的形式

发生迁移(Mclennan et al., 1979; Haas et al., 1995)。由于 LREE 和 HREE 形成络合物的能力不同,在热液运移的过程中容易发生分异作用,且 HREE 和 U 在迁移时存在明显的正相关关系(Mclennan et al., 1979),这势必会使得含铀热液中 HREE 的含量要高于 LREE 的含量,致使在铀富集沉淀后形成的铀矿物中富集 HREE。另外 U^{4+} 和三价稀土元素的离子半径相似,在沉淀的过程中 REE 容易进入沥青铀矿晶格,使沉淀的沥青铀矿中富含 REE(李占游, 1987),且明显高于其赋矿围岩的 REE 总量(Fayek et al., 1997; 黄国龙等, 2010)。铀矿的这一 REE 特征在国内外多个铀矿床中得到了证实(Fayek et al., 1997; Horie et al., 2004; Lu et al., 2007; 黄国龙等, 2010)。此外,受物质来源、成矿的物理化学条件等因素的影响,不同矿床在 REE 总量、LREE 和 HREE 分异程度上存在一定的差异(Fayek et al., 1997)。

在本次获得的沥青铀矿 REE 数据中, T-5、T-6、F-1、F-3 四个数据点具有高的 REE 总量($642.4 \times 10^{-6} \sim 1\,057.4 \times 10^{-6}$),大大高于其赋矿围岩下庄岩体的 REE 总量 $286.7 \times 10^{-6} \sim 162.6 \times 10^{-6}$ (吴烈勤等, 2005), LREE/HREE 比值均小于 1, 轻微的富集 HREE, 弱的负 Eu 异常, 在 REE 配分模式图 3 上呈 LREE 轻微亏损和 HREE 轻微富集的特征。这个特征与前述的沥青铀矿 REE 配分特征较为相似,可能反映的是 335 矿床沥青铀矿初始形成时的 REE 特征。但从 T-5、T-6 的年龄来看,它们主要分布在 72~82 Ma 之间,年龄值较小说明该 REE 特征反映的是后期的一次铀矿化事件或受到过后期地质事件的影响导致早期形成的沥青铀矿发生 Pb 丢失但并未发生物质成分上的改变。从其他方面来看,该 REE 特征为后期矿化事件的可能性较小,理由如下:

(1) 数据点 T-4、F-2、F-4、F-5 的 REE 总量值为 $44.5 \times 10^{-6} \sim 295.7 \times 10^{-6}$ 与赋矿围岩下庄岩体的 REE 总量值相当或有所减少,轻微的富集 LREE, LREE/HREE 比值小于 1, 在 REE 配分模式图上为平坦型或轻微的右倾型。在对本次获得的沥青铀矿数据所作的 LREE/HREE- Σ REE 相关图上(图 4), LREE/HREE 与 Σ REE 之间呈现出较为明显的负相关性,且主要集中在两个区域内,这说明相对 T-5、T-6、F-1、F-3 而言, T-4、F-2、F-4、F-5 具有明显的丢失 HREE 的现象。另外在这几个数据点内有 T-4 的 79 Ma 的年龄数据分布,如果是后期铀矿化事件的话,

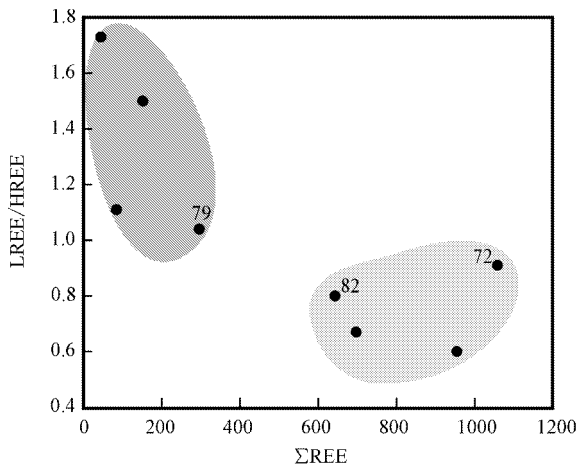


图4 LREE/HREE-ΣREE 相关图

1—深灰色(T-4, F-2, F-4, F-5); 2—灰色(T-5, T-6, F-1, F-3)

Fig. 4 Plot of LREE/HREE versus ΣREE

1—Dark grey(T-4, F-2, F-4, F-5); 2—Grey(T-5, T-6, F-1, F-3)

在相同矿化时间段内应该不会存在差异如此明显的REE特征。

(2) 在 UO_2 -CaO 和 UO_2 -Na 图解中 UO_2 与 CaO、Na 呈现出一定的负相关性(图5),说明测试样品沥青铀矿发生过物质的交换。从与之对应的年龄值来看,低的年龄值多分布在图的右下角,而高的年龄值多分布在图的左上角(除 T-5、T-6 外)。说明在低年龄段内(73~83 Ma)沥青铀矿有过明显的 UO_2 迁出,而并非铀的带入。

Lu 等(2007)指出在表生环境下,沥青铀矿容易蚀变成铀的次生矿物(硅钙铀矿、钙铀云母等),这一过程会导致原来的沥青铀矿丢失 HREE,而在新形成的次生铀矿物中富集 LREE 并伴随有铀的迁出和钙的带入。在沥青铀矿的背散射图像中看似均一的沥青铀矿,在二次电子图像中表现出了明显的差异性(图6中黑色圈标记处),也指示其受到过外界条件的影响。从前述沥青铀矿的特征来看,沥青铀矿在形成后可能发生过表生蚀变作用。T-5、T-6 可能为在后期的蚀变作用的影响下发生了 Pb 的丢失,而其本身的物质成分并未发生较大变化,因而保持了初始的沥青铀矿 REE 特征。

本次获得的 335 矿床沥青铀矿年龄的最大值是 (93.5 ± 1.2) Ma。该年龄的谐和度较高,考虑其可能受后期地质事件影响的程度较小,应该最能代表沥青铀矿初始形成的年龄。本次获得的 (73.1 ± 1.4) Ma 的年龄值与前人报道的 71 Ma 相近,可能代表了 335 矿床后期经受过的一次地质事件的时间,且为一次表生蚀变作用的年龄;而获得的 (81.0 ± 1.9) Ma 的年龄可能为早期形成的沥青铀矿在 (73.1 ± 1.4) Ma 这次地质事件的影响下发生了不同程度的铅丢失所致,因而其本身不具有任何地质意义。由于还缺少更为详实的 REE 数据,如与高年龄值相对应的 REE 数据及其他的一些证据作为支撑,对 335 矿床成矿年龄的讨论还有待进一步的取证。

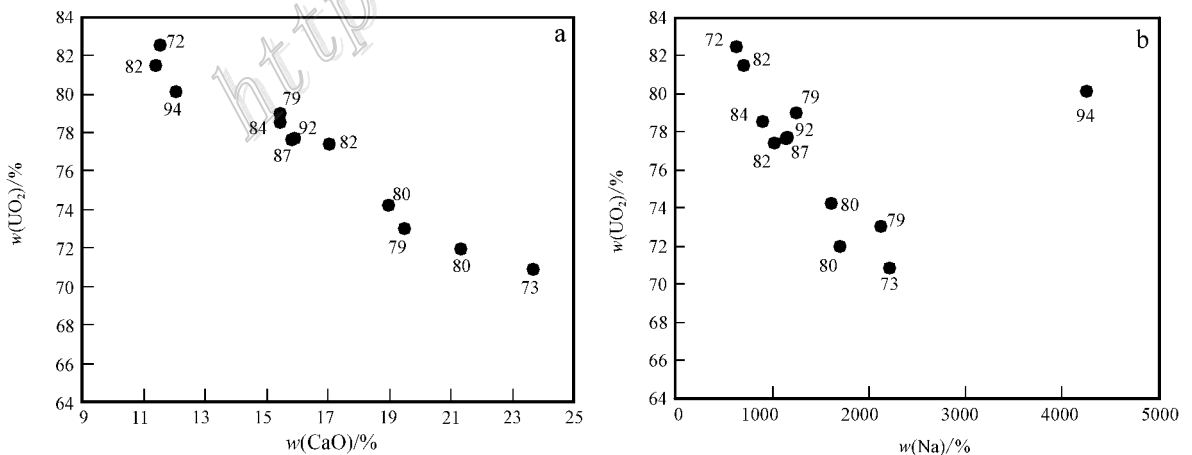


图5 335 矿床沥青铀矿 UO_2 与 CaO (a) 及 UO_2 与 Na (b) 相关性图解

Fig. 5 Relationship between UO_2 and CaO (a) as well as UO_2 and Na (b) of pitchblende from the No. 335 ore deposit

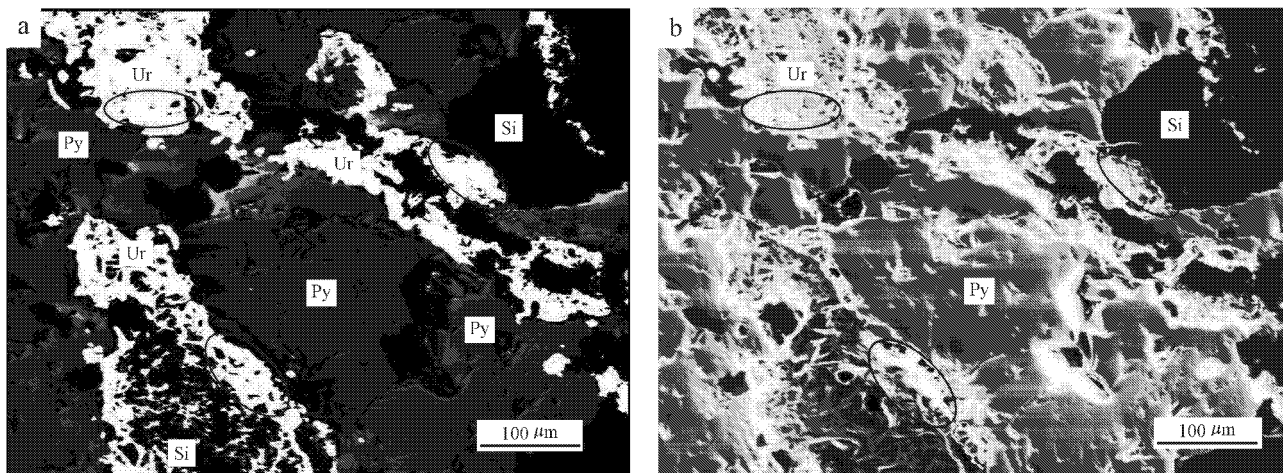


图6 335矿床沥青铀矿背散射(a)和二次电子(b)图像

黑色圈标记处为同一沥青铀矿相同部位在不同图像中的对比;Py—黄铁矿;Ur—沥青铀矿;Si—硅质物

Fig. 6 Back scatter and secondary electron images of pitchblende from the No. 335 ore deposit

the black ellipses represent the domains used for comparison of the same part of pitchblende in difference images; Py—Pyrite; Ur—Uraninite; Si—Siliceous matter

4.2 华南岩石圈伸展对成矿的限制

华南晚中生代构造应力场以拉张为主,这一时期发生过4次较为重要的岩石圈伸展事件,其时代为距今约140 Ma、124 Ma、105 Ma和90 Ma(李献华等,1997)。这一时期发育有大量的基性岩脉,如粤北的诸广山岩体、贵东岩体东段及粤赣交界的大吉山矿区等可见发育有辉绿岩脉(墙)、煌斑岩脉等基性脉体。毛景文等(2008)指出,华南在135 Ma之后进入了一个新的构造成矿旋回,以90~100 Ma为成矿的高峰期,成矿的特点以大陆边缘浅成低温热液型矿床为主且所有控矿构造明显表现为伸展构造。如相山铀矿田(范洪海等,2003)、河草坑铀矿田(张万良,2005)、大洲铀矿田(田建吉等,2010)及鹿井铀矿田(邵飞等,2010)等均有该时期的铀矿化发育。本次获得的代表335矿床成矿时代的年龄为 (93.5 ± 1.2) Ma,该年龄介于105 Ma和90 Ma这两次岩石圈伸展事件之间,同时处在90~100 Ma的成矿高峰期里,在时间上应属该时期的产物。

研究表明,基性岩脉对成矿有着重要的作用,其在成矿过程中控制着矿体的空间产出位置。目前已知的玉水矿田铜多金属矿(陈炳辉等,1994)、贵州水城青山铅锌矿(欧锦秀,1996)等矿床在矿区内均

见发育有辉绿岩脉且被证实为与成矿具有密切的关系。单就铀矿而言,下庄矿田内发育的仙石矿床(邓平等,2003a)、石土岭矿床(朱捌等,2006)也都被认为是辉绿岩脉控矿的典型代表。更值得一提的是,在下庄矿田所在的贵东岩体的西部无基性脉岩发育,因而迄今尚未发现有经济价值的铀矿床(邓平等,2003b)。另外,据核工业293大队提供的资料^①显示,在335矿床中,辉绿岩与构造带,倾向、倾角不同,两者以较大的角度相交交汇形成斜接交点,而富矿体即产出在该交点及其拖拉部位。

邓平等(2002;2003a)指出,在每期辉绿岩脉后面一般都有相应的铀矿化形成,且成矿相对辉绿岩脉侵位具有明显的滞后性。如下庄矿田内337矿床最新获得的等时线年龄为135 Ma(朱捌等,2006)与截穿该矿床的辉绿岩脉的年龄143 Ma(李献华等,1997)之间有着近十个百万年的时间差。335矿床内辉绿岩脉的侵位时间为106.6 Ma,被认为是约105 Ma的岩石圈伸展事件的产物(李献华等,1997)。该年龄值与本次获得的335矿床的最大年龄之间只存在十个百万年左右的时差,该时差在辉绿岩的影响范围之内。

在对铀矿的研究中发现矿化剂对铀的运移起着

① 核工业293大队. 2009. 南岭贵东花岗岩体构造变形与铀矿成矿关系研究项目设计书(内部资料).

至关重要的作用。尽管 F^- 、 Cl^- 、 SiO_2 等矿化剂在铀成矿中的作用不容忽视,但随着研究的深入,有学者发现 ΣCO_2 (热液中各种形式的四价碳,包括 CO_2 、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 等)才是控制热液铀矿运移和富集成矿的主导性因素,因此对热液铀矿中碳来源的研究近年来已经成为众多学者关注的焦点(胡瑞忠等,1993;邓平等,2003b)。胡瑞忠等(1993)从成矿热液碳同位素组成、富铀花岗岩浆活动特点、铀成矿与地壳拉张的时代关系以及地幔和幔源基性岩浆提供 ΣCO_2 的潜力等方面对花岗岩型铀矿的来源进行了研究,结果表明,成矿热液中的 ΣCO_2 等组分是受岩石圈伸展事件控制的,主要来自地幔。白垩纪-第三纪期间岩石圈伸展的多期性,导致了向大气成因循环地下水提供幔源 ΣCO_2 组分的多期性,因此, ΣCO_2 加入热液的时间应大致可反映原贫铀热液转变成富铀热液的时间或铀成矿时间(胡瑞忠等,2007)。在基性岩脉发育的地区,基性岩脉被认为是携带 ΣCO_2 进入成矿地带的主体(胡瑞忠等,1993)。前人对 335 矿床中与沥青铀矿呈共生关系的方解石做过碳氧同位素方面的研究,结果表明其碳同位素值基本稳定在岩浆或幔源碳范围之内,应属地幔来源(商朋强等,2006)。

综合以上特征考虑,本次获得的沥青铀矿的最大年龄能较好地反映 335 矿床的成矿年龄。

5 结论

(1) 335 矿床在形成之后还受到过其他一些地质事件的影响,这种影响在矿区沥青铀矿的成分特征及微观形貌上得到了反映。在这一影响的作用下沥青铀矿自身 U-Pb 体系发生了一定的改变。本次获得的 (73.1 ± 1.4) Ma 的年龄在一定程度上指示了这一事件的影响时间,但由于还缺乏更详实的证据,该年龄的真实意义还有待进一步的讨论。

(2) 结合华南岩石圈伸展发生的时间、辉绿岩脉对铀矿的控制作用及区内辉绿岩脉的侵位时间对本区铀矿的形成特点进行了探讨,本次获得的沥青铀矿的最大年龄 (93.4 ± 2.1) Ma,符合华南铀矿在时间上的一些客观成矿规律,一定程度上代表了 335 矿床的初始形成年龄。

(3) 研究表明 LA-ICP-MS 是一种快速、准确的可用于沥青铀矿 U-Pb 定年的方法。

志谢 在取样过程中得到了核工业 293 大队的帮助,在文章的修改过程中得到了吴元保教授、马强博士、王浩博士的帮助,评审专家对本文的修改提出了宝贵的意见和建议,在此一并表示衷心的感谢。

References

- Chen B H, Guo R and Yu S Y. 1994. Metallogenic features and genesis of Cu-polymetallic deposit of Yushui field, Guangdong [J]. *Geology and Prospecting*, 30(3): 20-25 (in Chinese with English abstract).
- Chipley D, Polito P A and Kyser T K. 2007. Measurement of U-Pb ages of uraninite and davidite by laser ablation-HR-ICP-MS [J]. *American Mineralogist*, 92(11-12): 1925-1935.
- Deng P, Shen W Z, Lin H F, Ye H M, Wang X C, Pu W and Tan Z Z. 2003a. Uranium mineralization related to the mantle fluid: A case study of the Xianshi deposit in the Xiaozhuang uranium orefield [J]. *Geochimica*, 32(6): 520-528 (in Chinese with English abstract).
- Deng P, Shu L S and Tan Z Z. 2003b. The geological setting for the formation of rich uranium ores in Zhuguang-Guidong large-scale uranium metallogenetic area [J]. *Geological Review*, 49(5): 486-494 (in Chinese with English abstract).
- Deng P, Shu L S, Tan Z Z and Wu L Q. 2002. Mesozoic tectonomagmatic activity and uranium metallogenetic sequence in mid-Nanling tectonic belt [J]. *Uranium Geology*, 18(5): 257-263 (in Chinese with English abstract).
- Du L T and Wang Y M. 1984. The integration of metallogenic mechanisms of the granite-type, volcanic rock-type, carbonaceous-siliceous-pelitic rock-type and sandstone-type uranium deposits in South China [J]. *Radioactive Geology*, (3): 1-10 (in Chinese with English abstract).
- Fayek M and Kyser T K. 1997. Characterization of multiple fluid-flow events and rare earth element mobility associated with formation of unconformity-type uranium deposits in the Athabasca Basin, Saskatchewan [J]. *Canadian Mineralogist*, 35: 627-658.
- Fan H H, Ling H F, Wang D Z, Liu C S, Shen W Z and Jiang Y H. 2003. Study on metallogenetic mechanism of Xiangshan uranium ore-field [J]. *Uranium Geology*, 19(4): 208-213 (in Chinese with English abstract).
- Fryer B J and Taylor R P. 1987. Rare-earth element distributions in uraninites implications for ore genesis [J]. *Chemical Geology*, 63: 101-108.
- Hu R Z and Bi X W. 2008. Uranium metallogenesis in South China and its relationship to crustal extension during the Cretaceous to Tertiary [J]. *Econ. Geol.*, 103(3): 583-598.
- Hu R Z, Bi X W, Peng J T, Liu S, Zhong H, Zhao J H and Jiang G H. 2007. Some problems concerning relationship between Mesozoic-Cenozoic lithospheric extension and uranium metallogenesis in South China [J]. *Mineral Deposits*, 26(2): 139-152 (in Chinese with English abstract).

- Hu R Z, Bi X W, Su W C, Peng J T and Li C Y. 2004. The relationship between uranium metallogenesis and crustal extension during the Cretaceous-Tertiary in south China[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 153-160(in Chinese with English abstract).
- Hua R M, Chen P R, Zhang W L and Lu J J. 2005a. Three major metallogenic events in Mesozoic in South China[J]. *Mineral Deposits*, 24(2): 99-107(in Chinese with English abstract).
- Hua R M, Chen P R, Zhang W L, Yao J M, Lin J F, Zhang Z S and Gu S Y. 2005b. Metallogenesis and their geodynamic settings related to Mesozoic granitoids in the Nanling range[J]. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 291-304(in Chinese with English abstract).
- Horie K and Hidaka H. 2004. Redistribution of U, Pb and REE in association with alteration of uranium minerals from the Koongarra deposit, Northern Territory, Australia[J]. *Radiochimica Acta*, 92(9-11): 805-808.
- Hu R Z, Li C Y, Ni S J, Liu L and Yu J S. 1993. The study of source of ΣCO_2 in the ore-forming hydrothermal of the granite-type uranium deposit Southeast[J]. *Science in China(Series B)*, 23(6): 189-196(in Chinese with English abstract).
- Haas J R, Shock E and Sassan D C. 1995. Rare earth elements in hydrothermal systems: Estimates of standard partial molal thermodynamic properties of aqueous complexes of the rare earth elements at high pressures and temperatures[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(21): 4329-4350.
- Huang G L, Yin Z P, Lin H F, Deng P, Zhu B and Shen W C. 2010. Formation age, geochemical characteristics and genesis of pitchblende from No. 302 uranium deposit in northern Guangdong[J]. *Mineral Deposits*, 29(2): 352-360(in Chinese with English abstract).
- Kwak T A P and Aboysinghe P B. 1987. Rare earth and uranium minerals present as daughter crystals in fluid inclusions, Mary Kathleen U-REE skarn, Queensland, Australia[J]. *Australia Mineral Magazine*, 51: 665-670.
- Ludwig K R. 2003. *ISOPLLOT 3.00: A geochronological toolkit for microsoft excel*[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, California.
- Li X H. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(3): 293-305.
- Li Z Y. 1987. Rare earth element geochemistry of granite-type hydrothermal uranium deposits with alkaline metasomatism in Northwest China[J]. *Uranium Geology*, 3(3): 175-183(in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C G and Chen H H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257: 34-43.
- Lu L, Chen F R, Ewing R C and Wang R C. 2007. Trace element immobilization by uranyl minerals in granite-hosted uranium ores: Evidences from the Xiazhuang ore field of Guangdong Province, China[J]. *Radiochimica Acta*, 95(1): 25-32.
- 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).
- Metz M C, Brookins D G, Rosenberg P E and Zartman R E. 1985. Geology and geochemistry of the Snowbird deposit, Mineral County, Montana[J]. *Econ. Geol.*, 80: 394-409.
- McLennan S M and Taylor S R. 1979. Rare earth mobility associated with uranium mineralization[J]. *Nature*, 281(15): 247-250.
- Mao J W, Xie G Q, Guo C L, Yuan S D, Cheng Y B and Chen Y C. 2008. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their metallogenic setting[J]. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 510-526(in Chinese with English abstract).
- Ou J X. 1996. Geological characteristics and ore-control geological conditions of Qingshan Lead-Zinc deposit, Guizhou[J]. *Journal of Guilin Institute of The Technology*, 16(3): 277-283(in Chinese with English abstract).
- Perhac R M and Heinrich E W. 1964. Fluorite-bastnaesite deposits of the Gallinas Mountains, New Mexico, and bastnaesite paragenesis[J]. *Econ. Geol.*, 59: 226-239.
- Shang P Q, Hu R Z and Bi X W. 2006. Study on carbon and oxygen isotopes in granite-type hydrothermal uranium deposits: A case of the Xiazhuang uranium ore field in northern Guangdong[J]. *Mineral Petrol.*, 26(3): 71-76(in Chinese with English abstract).
- Shu L S, Zhou X M, Deng P and Yu X Q. 2006. Principal geological features of Nanling tectonic belt, South China[J]. *Geological Review*, 52(2): 251-265(in Chinese with English abstract).
- Shao F, Zhu Y G, Guo H S, He X M and Shao S. 2010. Analysis on geological characteristics of uranium metallization and prospecting potential in Lujing orefield[J]. *Uranium Geology*, 26(5): 295-310(in Chinese with English abstract).
- Tian J J, Hu R Z, Su W C, Zhang G Q and Shang P Q. 2010. Ore U-Pb isochron ages and metallogenic tectonic setting of No. 661 uranium deposit[J]. *Mineral Deposits*, 29(3): 452-460(in Chinese with English abstract).
- Wu L Q, Huang G L, Shen W Z, Lin H F, Ye H M, Liu N Z and Zou Z W. 2005. Study on geochemical characteristics and genesis of Xiazhuang granite, northern Guangdong[J]. *Uranium Geology*, 21(2): 65-71(in Chinese with English abstract).
- Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, Griffin W L, Meier M, Oberli F, Quadt A V, Roddick J C and Spiegel W. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 19: 1-23.
- Wu L Q, Tan Z Z, Liu N 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).
- Xu X S, Deng P, O'Reilly S Y, Griffin W L, Zhou X M and Tan Z Z. 2003. Dating of single particle zircon by LA-ICP-MS and the Petrogenetic significances of the Guidong complex rock, SouthEast, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(12): 1328-1334(in Chi-

nese with English abstract).

- Zhang W L. 2005. Ore-forming geological features and prospecting target types of Hekoukeng ore field in southern Jiangxi Province[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 20(3): 192-195 (in Chinese with English abstract).
- Zhu B, Ling H F, Shen W Z, Gao J F, Deng P, Huang G L and Tan Z Z. 2006. Isotopic geochemistry of Shituling uranium deposit, northern Guangdong Province, China[J]. Mineral Deposits, 25(1): 257-263 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈炳辉, 郭锐, 俞受璠. 1994. 广东玉水矿田铜多金属矿床成矿特征及成因[J]. 地质与勘探, 30(3): 20-25.
- 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[J]. 地球化学, 32(6): 520-528.
- 邓平, 舒良树, 谭正中. 2003b. 诸广-贵东大型铀矿聚集区富铀矿成矿地质条件[J]. 地质论评, 49(5): 486-494.
- 邓平, 舒良树, 谭正中, 吴烈勤. 2002. 南岭中段中生代构造-岩浆活动与铀成矿序列[J]. 铀矿地质, 18(5): 257-263.
- 杜乐天, 王玉明. 1984. 华南花岗岩型、火山岩型、碳硅泥岩型、砂岩型铀矿成矿机理的统一性[J]. 放射性地质, (3): 1-10.
- 范洪海, 凌洪飞, 王德滋, 刘昌实, 沈渭洲, 姜耀辉. 2003. 相山铀矿田成矿机理研究[J]. 铀矿地质, 19(4): 208-213.
- 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 刘乘, 钟宏, 赵军红, 蒋国豪. 2007. 华南地区中生代以来岩石圈伸展及其与铀成矿关系研究的若干问题[J]. 矿床地质, 26(2): 139-152.
- 胡瑞忠, 毕献武, 苏文超, 彭建堂, 李朝阳. 2004. 华南白垩-第三纪地壳拉张与铀成矿的关系[J]. 地学前缘, 11(1): 153-160.
- 胡瑞忠, 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 ΣCO_2 来源研究[J]. 中国科学(B辑), 23(6): 189-196.
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 陆建军. 2005a. 论华南地区中生代3次大规模成矿作用[J]. 矿床地质, 24(2): 99-107.
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 姚军明, 林锦富, 张展适, 顾晟彦. 2005b. 南岭与中生代花岗岩类有关的成矿作用及其大地构造背景[J]. 高校地质学报, 11(3): 291-304.
- 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): 352-360.
- 李占游. 1987. 西北某花岗岩型碱交代热液铀矿床稀土元素地球化学[J]. 铀矿地质, 3(3): 175-183.
- 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.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 袁顺达, 程彦博, 陈毓川. 2008. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境[J]. 高校地质学报, 14(4): 510-526.
- 欧锦秀. 1996. 贵州水城青山铅锌矿床的成矿地质特征[J]. 桂林工学院学报, 16(3): 277-283.
- 商朋强, 胡瑞忠, 毕献武. 2006. 花岗岩型热液铀矿床 C、O 同位素研究——以粤北下庄铀矿田为例[J]. 矿物岩石, 26(3): 71-76.
- 舒良树, 周新民, 邓平, 余心超. 2006. 南岭构造带的基本地质特征[J]. 地质论评, 52(2): 251-265.
- 邵飞, 朱永刚, 郭湖生, 何晓梅, 邵上. 2010. 鹿井矿田铀成矿地质特征及找矿潜力分析[J]. 铀矿地质, 26(5): 295-210.
- 田建吉, 胡瑞忠, 苏文超, 张国全, 商朋强. 2010. 661铀矿床矿石 U-Pb 等时线年龄及其成矿构造背景[J]. 矿床地质, 29(3): 452-460.
- 吴烈勤, 黄国龙, 沈渭洲, 凌洪飞, 叶海敏, 刘汝洲, 邹志文. 2005. 粤北下庄花岗岩地球化学特征与成因研究[J]. 铀矿地质, 21(2): 65-71.
- 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.
- 徐夕生, 邓平, O'Reilly S Y, Griffin W L, 周新民, 谭正中. 2003. 华南贵东杂岩体单颗粒锆石激光探针 ICP-MS U-Pb 定年及其成岩意义[J]. 科学通报, 48(12): 1328-1334.
- 张万良. 2005. 赣南河草坑铀矿田成矿地质特征及找矿目标类型[J]. 地质找矿论丛, 20(3): 192-195.
- 朱捌, 凌洪飞, 沈渭洲, 高剑峰, 邓平, 黄国龙, 谭正中. 2006. 粤北石土岭铀矿床同位素地球化学研究[J]. 矿床地质, 25(1): 257-263.