doi: 10.12029/gc20220414

金中国, 刘开坤,郑明泓,罗开,杨胜发,淳果,王琼,范云飞. 2022. 贵州三穗铀矿床矿石矿物学特征及其对找矿的指示[J]. 中国地质, 49(4): 1236−1249.

Jin Zhongguo, Liu Kaikun, Zheng Minghong, Luo Kai, Yang Shengfa, Chun Guo, Wang Qiong, Fan Yunfei. 2022. Ore mineralogyical characteristics of Sansui uranium deposit in Guizhou Province, China and indication for prospecting[J]. Geology in China, 49(4): 1236−1249(in Chinese with English abstract).

贵州三穗铀矿床矿石矿物学特征及其对找矿的指示

金中国[1], 刘开坤[2],郑明泓[1],罗开[3],杨胜发[2],淳果[2],王琼[2],范云飞[2]

(1. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局,贵州 贵阳 550005;2. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局核资源地质调查院,贵州 贵阳 555005;3. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室,贵州 贵阳 550081)

提要:三穗铀矿床位于黔中—湘西北铀成矿带内,产于震旦—寒武系老堡组炭质泥岩中,是贵州省近年勘查发现的第一个大型铀矿床。**[研究目的]**鉴于黔东地区铀矿成矿规律、富集机理及矿石矿物学等研究程度低,查明典型铀矿床矿石矿物组合及化学组分,探讨成矿环境,揭示成矿过程,深化成矿理论认识,将为促进区域成矿预测、扩大找矿勘查成果及丰富该类型铀矿成矿理论提供科学依据。**[研究方法]**基于三穗铀矿床地质、地球化学特征,通过电子探针、扫描电镜等测试,分析了铀成矿机理及成岩成矿的环境演化。**[研究结果]**本区含铀岩系老堡组形成于震旦纪/寒武纪转折期的陆缘裂谷和陆缘裂陷缺氧还原环境,铀成矿初始物源与海底火山活动有关;铀矿石主要由铀矿物、铁矿物、黏土矿物、有机质及白云石、石英(或玉髓)、重晶石、方解石等组成,呈微晶—隐晶结构、微晶—粉晶晶粒状结构,层状、纹层状构造;铀矿物丰富,主要有沥青铀矿、硅钙铀矿、硒铅铀矿、钛铀矿、磷铀矿及水碳铀等,以纳米—微米级粒状、柱状(粒径多<10 μm)、细脉状、或隐晶质形式赋存于有机质、铁质、黏土矿物等聚铀矿物中。**[结论]**三穗铀矿床形成物源具有多源性,与雪峰期海底火山作用带来部分成矿物质、燕山—喜马拉雅期成矿流体在运移的途中不断浸取地层内的成矿物质密切相关,经历了铀初始富集、氧化淋滤及热液叠加再富集过程,成因属典型的碳硅泥岩型。三穗铀矿床中发现大量铀矿物显示,铀富集程度高、成矿作用强,找矿远景好、潜力大。

关 键 词:铀矿床;碳硅泥岩型;矿石矿物学;成矿环境;矿产勘查工程;三穗;贵州省

创 新 点:基于三穗铀矿床地质地球化学特征,通过电子探针、扫描电镜等矿物学研究,揭示本区铀成岩成矿的环境演化及成矿机理,探讨了找矿远景。

中图分类号:P619.4 **文献标志号**:A **文章编号**:1000−3657(2022)04−1236−14

Ore mineralogical characteristics of Sansui uranium deposit in Guizhou Province, China and indication for prospecting

JIN Zhongguo[1], LIU Kaikun[2], ZHENG Minghong[1], LUO Kai[3], YANG Shengfa[2], CHUN Guo[2], WANG Qiong[2], FAN Yunfei[2]

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

收稿日期:2019−10−08;**改回日期**:2019−12−11

基金项目:国家自然科学基金和贵州喀斯特科学研究中心联合项目(U1812402)及贵州省基础性公益性项目(黔国土资发[2012]294−2),黔国土资发[2015]4号)共同资助。

作者简介:金中国,男,1965年生,博士,研究员,主要从事矿产普查与勘探工作;E−mail:gzkyjzg@sina.com。

The Sansui deposit is located in the uranium metallogenic belt between central Guizhou and northwest Hunan Province. It is the first large uranium deposit discovered in Guizhou Province in recent years. The uranium deposit situates in the carbonaceous mudstone of Laobao Formation of Sinian − Cambrian and is stratified and like stratified. **[Objective]**The purpose of this paper is to find out the ore and mineral composition of Sansui uranium deposit, explore the uranium mineralization environment, reveal the mineralization process of uranium initial enrichment, leaching, superposition and re−enrichment, and provide new information for regional metallogenic prediction, ore exploration and enrichment of this type of uranium ore−forming theory. **[Methods]**The study on mineral mineralogy and geological characteristics of ore deposits shows that **[Results]** (1) The Laobao Formation of uranium−bearing rocks was formed in the anoxic reduction environment of the continental margin rift and continental margin rifting during the Sinian/Cambrian transitional period. (2) The uranium ore is mainly composed of uranium mineral, iron ore, clay mineral, organic matter, dolomite, quartz (or chalcedite), barite, calcite, etc., with microcrystal−cryptocrystal structure, microcrystal−powder grain structure, layered and lamellar structure. (3) The uranium ore is rich in uranium minerals, mainly pitchblende, silica− calcined uranium ore, selenium−lead uranium ore, titanium−uranium ore, phosphorus uranium ore and water−carbon uranium, etc. They occur in the form of nano− micron granule, column (particle size <10 microns), veinlet, or in the form of cryptocrystalline occurrence in the organic matter, iron, clay minerals and other uranium minerals. (4) The constant element in the ore were enriched in SiO_2, CaO and LOI (burning loss), which was consistent with the rich silica, calcium and organic minerals. **[Conclusions]** The uranium source of the Sansui deposit was related to the submarine volcanic eruption, spillage during the Xuefeng period and the weathering and leaching of uranium−bearing geological bodies. Mineralization and its associated trace elements such as U, V, Mo, Cd, Se, Ni, Zn, etc. are significantly enriched, which is related to the fact that some ore−forming materials and ore−forming fluids are continuously leaching ore−forming materials in the strata during the process of submarine volcanic eruption and spill.

Key words: uranium deposit; carbonosilicon mudstone type; mineral mineralogy; metallogenic environment; mineral exploration engineering；Sansui ; Guizhou Province

Highlights：Ore−forming materials and ore−forming fluids of the Sansui deposit are continuously leaching ore−forming materials in the strata during the process of submarine volcanic eruption and spill.

About the first author: JIN Zhongguo, male, bone in 1965, doctor, researcher, engaged in study of geology and mineral resources exploration; E−mail: gzkyjzg@sina.com.

Fund support: Supported by the project of National Natural Science Foundation and Guizhou Karst Science Research Center (No. U1812402), and Basic Public Welfare Funding Projects of Guizhou Province (No. [2012]294−2, No. [2015]4).

1 引　言

黔中—湘西北铀成矿带是中国碳硅泥岩型铀矿的主要成矿区之一,属华南大面积低温成矿域的组成部分,含铀地层形成于晚震旦世—二叠纪,成矿时代集中在燕山—喜马拉雅期(140～30 Ma)(杜乐天等,1984;张祖还,1986;Hu et al.,2008,2017;赵凤民等,2009;漆富成等,2012;蔡煜琦等,2015)。碳硅泥岩型铀矿大规模铀成矿作用受控于陆缘裂谷、陆缘裂陷环境,并常伴随海底喷流和海底火山喷发作用(漆富成等,2011)。据Rawat et al. (2010)研究印度喜马偕尔邦西摩地区克罗尔—塔尔新元古代—寒武纪含铀黑色页岩的矿化特征表明,黑色页岩型铀矿床虽然品位较低(U_3O_8<0.001%～0.05%),但由于体积巨大,蕴藏着丰富的铀资源;瑞典产于黑色岩系中的铀矿床丰富,Ranstad铀矿床(产于前寒武系—寒武系)是最著名的铀矿床之一,可采U_3O_8储量30万t,平均品位U_3O_8 0.035% (Young, 1984) ,此外,Haggan、Viken铀矿床铀资源量分别为44.73万t(U品位0.016%)和40.27万t(U品位0.02%),为全球第一、第二大未开采的低品位矿床(黄文斌等,2017),这些矿床均共伴生Mo、V、Zn等元素,与黔中—湘西北铀成矿带的碳硅泥岩型铀矿床特征相似,表明找矿潜力及资源利用前景巨大。扬子陆块东南缘是中国重要的碳硅泥岩型铀矿矿集区,在桂北、湘西北地区现已探明的大中型铀矿床10余个(漆富成等,2011),表明该区域成矿条件优越。近年实施整装勘查,在黔东三穗发现了贵州省第一个大型铀矿床,由于综合研究程度低,勘查中未发现独立的铀矿物。本次研究通过岩矿鉴定、电子探

针、扫描电镜等手段，详细查明了铀矿床的矿石矿物组成及主要的常量、微量元素含量特征，初步了解了铀矿赋存状态，探讨了形成环境及成矿机理，为黔东及相邻区铀矿成矿预测、扩大找矿勘查成果，丰富该类型铀矿理论提供了科学依据。

2 区域地质背景及矿床地质

2.1 区域地质背景

研究区位于扬子陆块南缘与江南造山带的结合部位，基底为新元古代变质岩建造，盖层为显生宙碳酸盐岩-细碎屑岩建造(Hu et al.,2012；胡瑞忠等，2016)，出露地层有青白口系浅变质岩，南华系浅变质岩、碎屑岩，震旦系—志留系及二叠系—三叠系碳酸盐岩、碎屑岩，中生代地层局部区域沉积，缺失泥盆系、石炭系、下二叠统。震旦系—寒武系老堡组(Z∈*l*)为区内铀的含矿层位。NE、NNE及EW向断裂发育，代表性断层有NNE向石阡—松桃断层(F_1)，NE向施洞断层(F_2)，EW向施秉—镇远断层(F_3)。褶皱主要以紧密(武陵期)和宽缓(雪峰—加东期)的阿尔卑斯式形态展布，典型褶皱有雷公山复式背斜、梵净山复式背斜、三穗向斜等。岩浆活动弱，在梵净山见与武陵运动有关的基性、超基性侵入岩体和花岗岩体产出，在凯里—镇远、雷山分别见与加里东运动、燕山—喜马拉雅运动有关的钾镁煌斑岩出露。区内有铀、钒、金、铅锌、锑、锰、汞、重晶石等矿产产出(图1)。

2.2 矿床地质特征

研究区出露青白口系下江群清水江组，南华系

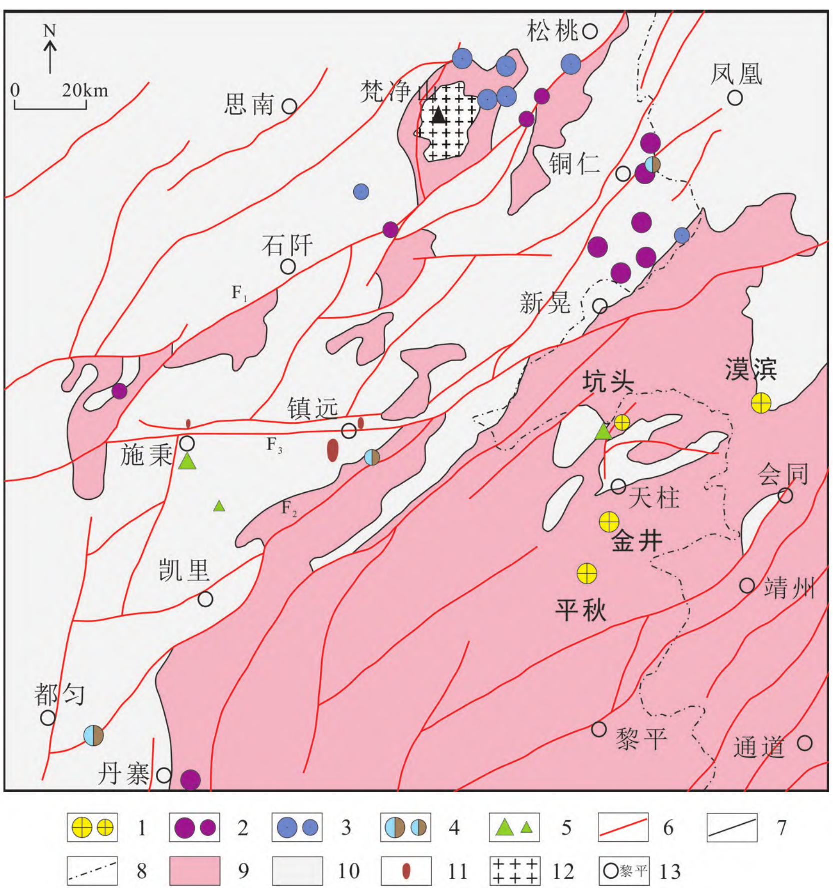

图1 贵州东部地质矿产略图(据陶平等，2009修编)

1—金矿床(点)；2—汞矿床(点)；3—锰矿床(点)；4—铅锌矿床(点)；5—重晶石床(点)；6—断层；7—地层界线；8—省界；9—新元古界；10—古生界；11—煌斑岩体；12—花岗岩体；13—地名

Fig.1 Geological sketch map of eastern Guizhou (after Tao Ping et al., 2009)

1-Gold deposit (point); 2-Mercury deposit (point); 3-Manganese deposit (point); 4-Lead-zinc deposit (point); 5-Barite bed (point); 6-Fault; 7-Stratigraphic boundary; 8-Boundary; 9-Neoproterozoic strata; 10-Paleozoic strata; 11-Lamprophyre; 12-Granite mass; 13-Place names

南沱组、大塘坡组，震旦系陡山沱组、震旦系—寒武系老堡组和寒武系九门冲组等地层（图2），其中老堡组（Z∈l）为区内铀多金属的主要含矿层位，岩性为黑色、灰黑色薄至中厚层硅质岩、条纹状硅质岩、含炭质硅化角砾岩、硅化白云岩、泥质夹薄层炭质泥岩，细粒黄铁矿发育，为海相缺氧或无氧的水体环境形成的沉积岩石组合（吴朝东等，1999），厚度约44 m。硅化角砾岩、硅化白云岩、炭质泥岩为容矿岩石，条纹状硅质岩为赋矿围岩。含矿层位与断层叠加部位或向斜次级褶皱发育区，铀矿化强烈。矿区铀矿（化）体呈层状、似层状产出（图3），控制走向约5 km，倾向延伸>3 km，厚度0.20～4.4 m，品位0.10%～22.00%，探获的铀资源量为大型矿床规模。综合评价铀矿层中共伴生V、Se为大型矿床规模，Mo、Cd为中型矿床❶。

3 样品采集及分析方法

样品均采自三穗矿床的槽探、钻探工程，其中矿石样（炭质泥岩）21件、围岩（硅质岩）9件。常量元素分析为电感耦合等离子体发射光谱法（其中容量法测定 SiO_2、CaO；重量法测定LOI）、微量元素分析为电感耦合等离子体质谱法测定（U为激光荧光法，Se为原子荧光法），测试单位为四川省核工业辐射测试防护院。岩矿鉴定由中国核工业集团二三〇研究所完成，电子探针和扫描电镜由中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家实验室完成，电子探针及扫描电镜使用JSM-7800F型显微镜（FE-SEM）和EDAX TEAM Apollo XL能谱仪。扫描电镜能谱测试条件为加速电压20 kV，电流10 nA，电子束斑直径为1 μm。

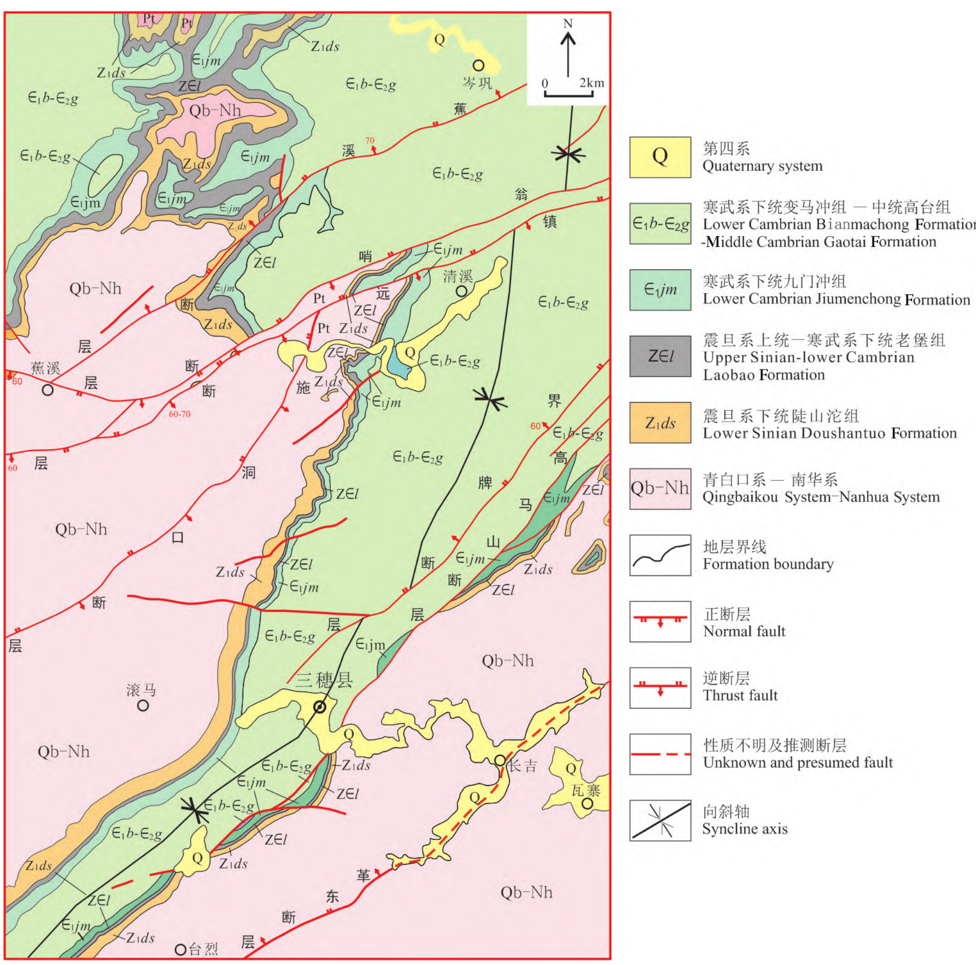

图2 三穗矿区地质图

Fig.2 Geological map of Sansui mining area

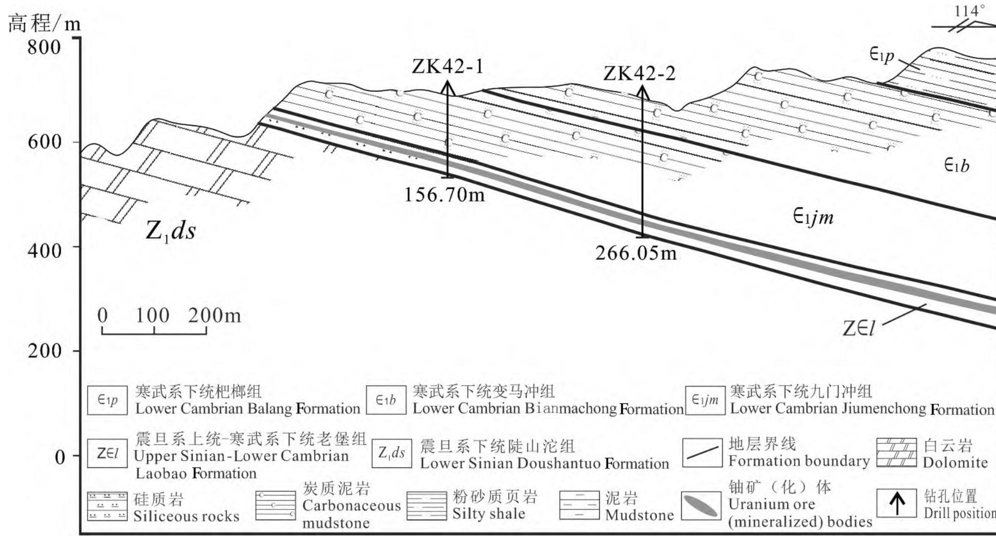

图3 铀矿床42—42’勘探线剖面图

Fig.3 Profile of 42−42 'exploration line of uranium deposit

4 矿石矿物组成

4.1 矿石矿物化学组分

4.1.1 常量元素特征

围岩中以SiO_2含量高为显著特征（为46.35%～80.96%，平均64.21%），其次LOI、CaO含量相对高，分别为3.08%～19.29%（平均10.74%）和6.00%～14.88%（平均8.63%），Al_2O_3、Fe_2O_3、MgO和P_2O_5的平均含量均小于3%，与赋矿层位为硅质岩，富含钙质、有机质吻合。矿石中以LOI含量（11.43%～63.63%，平均40.70%）高为特点，其次为SiO_2和CaO，平均值分别为29.49%、11.71%，与容矿岩石为炭质泥岩，富含炭质、有机质、黏土矿物一致。矿石与围岩相比，LOI、CaO、MgO、Al_2O_3含量相对高，而SiO_2、Fe_2O_3、P_2O_5含量相对低（表1）。

4.1.2 主要微量元素特征

围岩和矿石中U、Mo、Cd、Se、Ni、Zn均为富集元素，以U、Mo、Cd、Se最突出（表2）；而Th为贫化元素，Cu为弱富集元素。Th的贫化，与在表生氧化作用下，U^{4+}易被氧化成活泼的U^{6+}迁移至适宜环境叠加富集，而较惰性的Th仍然保存在原地稳定的含Th矿物晶格中，导致U、Th分离有关（刘英俊等，1986）。U、Mo在矿石中超常富集（富集系数分别为229.21和310.90），与含铀炭质泥岩中富含对Mo、U有强烈吸附作用的有机质和黏土矿物密切相关（刘英俊等，1986）；Se的超常富集，推测为深部存在碱性—超基性岩浆演化引起（罗泰义等，2005），同时不排除生物对海水中Se元素的吸收作用和生物有机成矿作用(Wen et al., 2011；施春华等，2011)。

赋矿层位中常量组份SiO_2、CaO、MgO、LOI和微量元素U、Mo、Cd、Se、Ni、Zn均较富集，而贫Al_2O_3、K_2O，且U与CaO、LOI正相关关系显著，稀土元素均为Ce亏损（金中国等，2019），U/Th远大于1，表明它们在沉积-成岩过程中具有共同初始聚集的特点，并与热水沉积作用有关（彭军等，2000），与湘西北、赣西北地区碳硅泥岩型铀矿床中岩矿石的元素组成特征相似（郭葆墀等，1995；吴朝东等，1999；张万良等，2019）。

表1 三穗铀矿床主要常量元素分析结果（%）

Table 1 Analysis results of constant element in Sansui uranium deposit (%)

元素	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	K_2O	P_2O_5	CaO	LOI
硅质岩9件	46.35～80.96	0.87～2.88	3.64～5.14	0.65～3.96	0.28～1.32	0.36～6.70	6.00～14.88	3.08～19.29
	64.21	1.53	4.49	2.50	0.66	2.55	8.63	10.74
矿石21件	12.46～79.40	0.70～6.81	1.54～5.14	0.40～11.81	0.25～2.74	0.16～8.75	1.83～18.16	11.43～63.63
	29.49	2.67	2.69	5.68	1.09	1.57	11.71	40.70

表2 三穗铀矿床微量元素分析结果(10^{-6})

Table 2 Analysis results of trace element in Sansui uranium deposit (10^{-6})

元素	U	Th	Mo	Cd	Ni	Cu	Zn	Se
硅质岩	26.60～192.89	1.46～5.60	16.90～163.24	0.53～20.72	23.74～101.80	35.68～218.16	19.55～461.73	0.06～3.79
9件	115.85	2.64	80.53	6.03	58.19	96.75	174.04	0.93
矿石	122.66～1100.00	1.79～6.41	103.30～1050.00	0.57～120.00	36.87～318.00	41.40～738.00	28.14～1160.00	0.01～55.16
15件	573.03	3.10	466.35	14.33	163.09	184.07	353.56	5.48
$K_{矿}/K_{围}$	229.21/46.34	0.32/0.28	310.90/53.69	71.65/30.15	8.15/2.91	3.35/1.76	5.05/2.49	109.60/18.60
	4.95	1.14	5.79	2.38	2.80	1.90	2.03	5.89
地壳丰度	2.50	9.6	1.50	0.20	20.0	55.0	70.0	0.05*

注:地壳丰度据Rudnick et al.,2003;*为刘英俊等,1986;$K_{围}$为围岩富集系数,$K_{矿}$为矿石富集系数。

4.2 岩矿鉴定

岩矿鉴定,矿石中富含白云石、石英(或玉髓)、铁矿物、黏土矿物及有机质,见少量方解石、长石、绢云母等,呈微晶—隐晶结构、微晶—粉晶晶粒状结构,层状、纹层状构造。矿物粒径差异大(图4)。

矿石中白云石、方解石含量为7%～64%,呈自形、半自形菱面体状结构,他形粒状产出(粒径7～270 μm),双晶、解理发育,方解石一般<15%(图4a、c);石英、玉髓含量5%～63%,呈微晶粒状、梳状、齿状,微晶—隐晶质结构、重结晶结构等,沿炭质泥岩层理分布明显,粒径1～25 μm(图4a、b、c)。

矿石中黏土矿物主要由绿泥石、高岭石、绢云母、水云母等组成,含量10%～30%,呈隐晶质状、胶状、团粒状产出,多与炭质等互混,水云母大部分过渡为绢云母,顺层理分布明显(图4b);铁矿物主要见黄铁矿、褐铁矿,零星见磁铁矿、菱铁矿,含量1%～5%,与徐达忠(1990)研究黄铁矿、赤铁矿共生所需的pH、Eh范围宽,而磁铁矿、菱铁矿存在对pH、

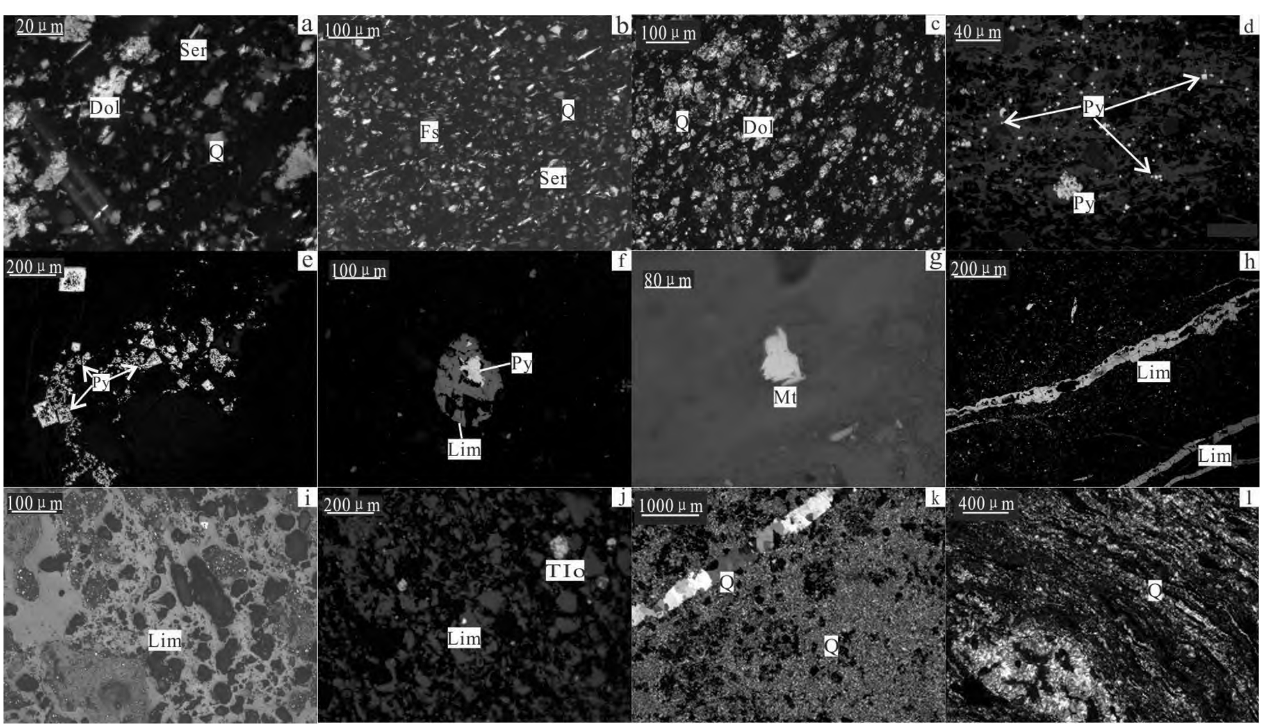

图4 岩矿鉴定矿石中主要矿物组成

Dol—白云石;Q—石英;Fs—长石;Ser—绢云母;Py—黄铁矿;Lim—褐铁矿;Mt—磁铁矿;TIO—钛铁氧化物

Fig.4 Main mineral composition in rock ore appraisal

Dol−Dolomite;Q−Quartz;Fs−Feldspar; Ser−Sericite; Py−Pyrite; Lim− Limonite; Mt−Magnetite; TIO−Ferric titanium oxide

Eh所需条件较严格有关(磁铁矿为pH<3和Eh>0.8;菱铁矿为pH>8和Eh <0)。黄铁矿呈自形、半自形、他形粒状结构,浸染状分散分布,粒径1~85 μm。褐铁矿呈非均质,胶状、脉状分布于黏土矿物及炭质、有机质中,为黄铁矿次生氧化的产物(图4d~j)。

围岩(硅质岩)由薄层、沉积流动特征明显的石英、玉髓(含量92%~98%)及少量黏土矿物(含量2%~5%)、铁质矿物(含量1%~3%)组成(图4a、b、c)。石英、玉髓呈隐晶—微晶粒状、纤维状、放射状、重结晶结构,纹层状、气孔状构造,粒径1~25 μm,与泥质、炭质层呈层状分布明显(图4k~1)。

矿石中见钛铁氧化物(图4j)、气孔构造(图4l),白云石、石英、绢云母、浸染状黄铁矿发育(图4a、b、c、d),褐铁矿多呈岛状、脉状、蜂窝状产出(图4k、h、i),后期石英脉穿插明显(图4k),进一步揭示该区域铀成矿可能受多期热液叠加作用和火山喷气作用的影响,具后生富集成矿特点(Zhang ,1983;江永宏等,2005)。

4.3 电子探针背散射分析

矿石中含铁矿物发育,主要为黄铁矿,其次见赤铁矿、褐铁矿、菱铁矿、磁铁矿等;黄铁矿主要呈细粒状(图5a)、莓球状(图5b)、半自形—他形颗粒状(图5a、c)产出。细粒状黄铁矿呈浸染状产于含铀炭质泥岩中,粒度多小于1 μm;颗粒状黄铁矿自形程度高,结晶好,多呈正方体、五角十二面体分布在白云石、炭质泥岩中,粒度一般1~ 5 μm;另有少量莓球状黄铁矿,反映沉积成岩的产物。赤铁矿、褐铁矿主要为黄铁矿氧化形成的次生产物。含矿层中细粒黄铁矿发育,可能为沉积成岩时期海平面迅速上升,造成海底极度缺氧,丰富的有机质还原出大量的HS^-与游离的Fe^{2+}结合形成,导致铀、有机质、黄铁矿共生(Wilkin et al.,1996;吴朝东,2000;Algeo et al.,2004;蔡郁文等,2017)。

石英与有机质、黏土矿物、白云石、重晶石等混杂分布,多呈不规则形状集合体、隐晶质结构产出,少量为表面较光滑、自形粒状晶体,粒径1~5 μm

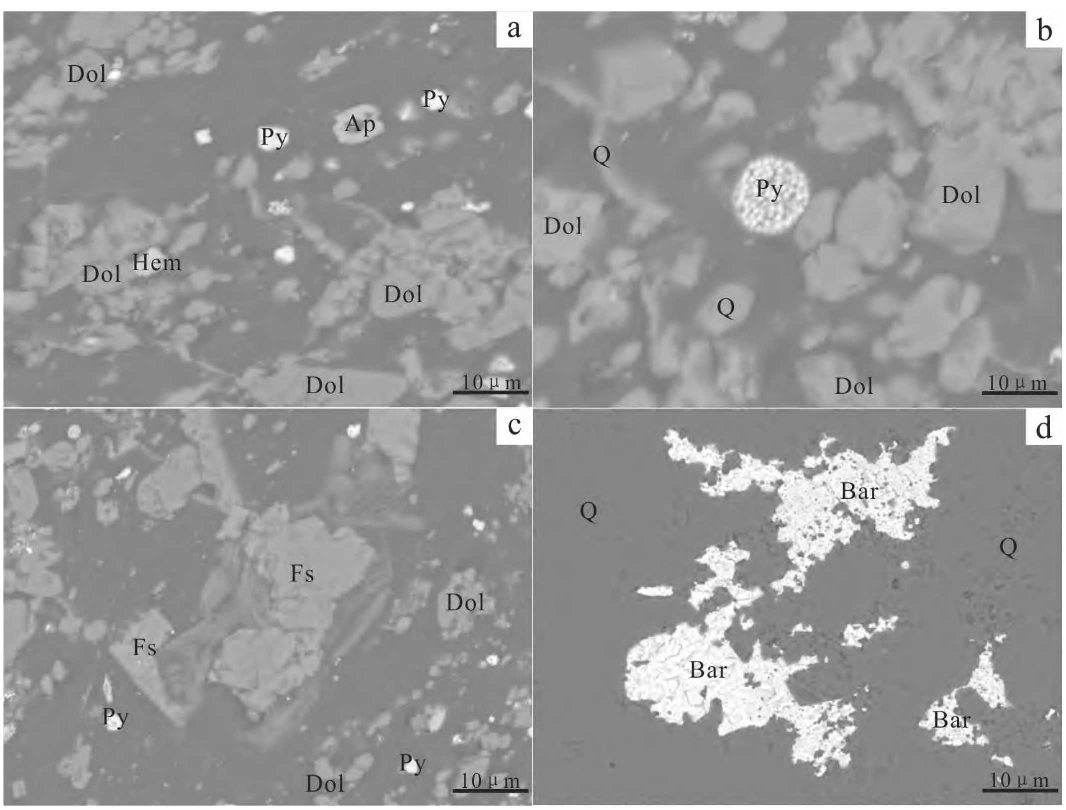

图5 三穗铀矿床矿石电子探针背散射图像
Ap—磷灰石;Bar—重晶石;Dol—白云石;Hem—菱铁矿;Fs—长石;Py—黄铁矿;Q—石英
Fig .5 Electron probe backscattering image of ore in Sansui uranium deposit
Ap-Apatite; Bar-Barite; Dol-Dolomite; Hem-Siderite; Fs-Feldspar; Py-Pyrite; Q-Quartz

(图5b、d)。白云石十分发育，以自形、半自形菱面体状为主，少量为他形粒状产出，粒径5～10 μm，与含铀炭质泥岩混杂产出(图5a、b、c)。矿石中零星见磷灰石(图5a)、长石(图5c)和结晶较好的重晶石(图5d)，推测均为海底火山或热液喷流沉积的产物(吴朝东等，2000)。

4.4 扫描电镜分析

扫描电镜分析测试发现铀矿物丰富，主要有沥青铀矿、硅钙铀矿、硒铅铀矿、钛铀矿、磷铀矿及水碳铀等，它们以纳米—微米级粒状、柱状(粒径多<10 μm)、细脉状或隐晶质形式赋存于有机质、黏土矿物等聚铀矿物中(图6)。

沥青铀矿相对较发育，主要呈胶态肾状、钟乳状、不规则团块状、细脉状产于有机质及黏土矿物中，粒径1～6 μm(图6a)；晶质铀矿呈长方形柱状(长5 μm×宽1 μm)、不规则粒状、絮状、胶结状(粒径<1 μm)产于有机质中(图6b)；硅钙铀矿沿黑色炭质泥岩裂隙呈细脉状、钟乳状产于有机质中，粒径1～7 μm(图6h、i)；硒铅铀矿、钛铀矿呈不规则粒状产出(图6a、c、e、i)，与硅钙铀矿、水碳铀矿、沥青铀矿及磷灰石、黄铁矿、有机质共生，粒径较小，多小于1 μm(图6a、c、e、g、h)；磷铀矿呈细脉状、胶态肾状、钟乳状、粒状分布在有机质及黏土矿物中，粒径0.5～4 μm(图6d、f)。铀矿物中除沥青铀矿外，其余铀矿物均为产于氧化带的次生产物，与见铜蓝(图6g)及样品采于地表吻合。矿石中硅钙铀矿与钛铀矿、晶质铀矿，沥青铀矿与磷铀矿、硒铅铀矿等矿物之间呈环带状分布，暗示该区铀成矿具多期热流体叠加改造成矿特点。晶质铀矿主要呈不规则粒状、絮状、胶结状形态产于炭质泥岩中，并与沥青铀矿、硅钙铀矿、莓球状黄铁矿、高岭石、褐铁矿共生，推测矿床为中低温热液成因(张静宜等，1995；张成江等，2007)，与漆富成等(2014，2015)在湘西北海相磷块岩中见形成于高温高压环境，以包体形式呈立方体、八面体产于辉镍矿物的晶质铀矿有较大差异。矿石中偶见锌铁尖晶石矿物(图6c、f)，可能为深层高温热液作用的反映(Hitzman，2003；杨永强等，2010)。

通过微观研究，三穗铀矿床矿石矿物组成如表3所示。

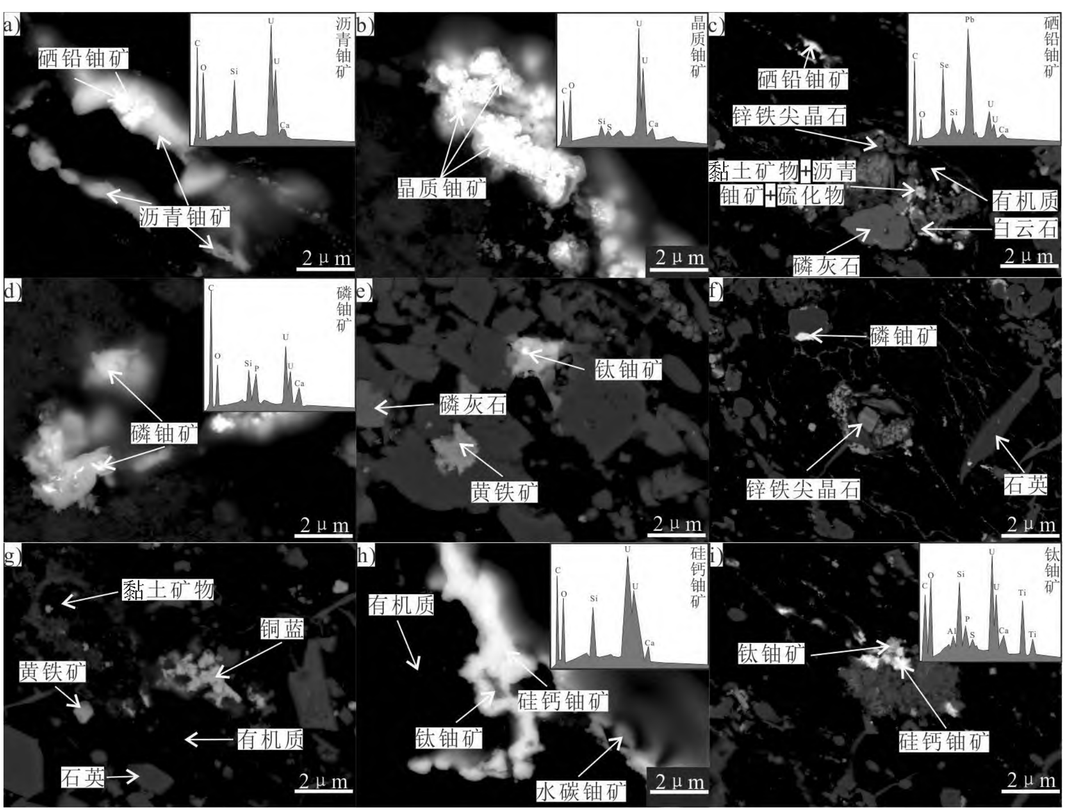

图6 三穗铀矿床铀赋存形式BSE图像
Fig.6 BSE image of uranium occurrence form of Sansui uranium deposit

表3 三穗铀矿床矿石矿物组成

Table 3 Mineral composition of ore in Sansui uranium deposit

铀矿物	共伴生金属矿物	非金属矿物	黏土矿物
沥青铀矿、晶质铀矿、硅钙铀矿、钛铀矿、磷铀矿、硒铅铀矿、钙铀云母、水碳铀矿、铜铀云母等	黄铁矿、辉铜矿、铜蓝、锌铁尖晶石、褐铁矿、赤铁矿、磁铁矿、菱铁矿、重晶石、钛铁氧化物等	石英、白云石、方解石、磷灰石、长石等	绿泥石、高岭石、绢云母、水云母等

5 讨 论

5.1 铀成矿机理

矿床中富含有机质的黏土矿物和黄铁矿发育，这些矿物具有极强的吸附能力和聚铀作用，能吸附大量纳米级铀以吸附态赋存，仅少量铀以超微或超显微的沥青铀矿、钛铀矿、晶质铀矿微粒、球粒或微脉产出。基于成矿地质背景及前述相关分析，认为该区域铀矿形成经历了含矿岩系中的初始富集、后生氧化淋滤及热液叠加富集等过程。

5.1.1 含铀岩系的形成及铀的初始富集

晚震旦世—早寒武世，受全球“雪球事件”、Rodinia超大陆裂解及新元古代雪峰运动的影响，华南陆块发生裂解作用，海平面迅速上升，研究区形成深海—半深海的滞流还原环境和裂谷盆地沉积中心（杨恩林等，2014），基底地层及侵入其中的富铀花岗岩的风化剥蚀，为区域铀成矿提供丰富的铀源（钟福军等，2017），沉积形成铀地球化学背景值高的含铀岩系（$14\times10^{-6}\sim270\times10^{-6}$，杜乐天，1984；$40.70\times10^{-6}$，蔡郁文等，2017），同时由于裂谷拉张、区域性大断裂深切地幔，海底喷发的热流体沿断层构造带来大量U、V、Mo、Cd、Co、Ni、Cu、Pb、Zn、Fe、Se等成矿物质及对铀成矿具有重要控制作用的CO_2等深源矿化剂（胡瑞忠，1991；漆富成等，2012；Pi et al.，2013；杜乐天，2014），导致裂谷盆地“铀库”增加（Sleep，1990），促进铀初始富集。

在沉积成岩及铀矿化过程中，铀主要以分散吸附形式赋存于炭质泥岩中，可能有少量的铀在碱性的成矿流体运移过程中，以碳酸铀酰络合物（$UO_2(CO_3)^{2-}$、$UO_2(CO_3)_3^{4-}$）、硅酸盐络合物（$nNa_2O\cdot mSiO_2$）迁移，当物理化学条件发生变化，络合物分解，形成少量的沥青铀矿、晶质铀矿，当含铀流体中Ti浓度较高时，则可形成钛铀矿（刘英俊等，1986），这些铀矿物主要以纳米—微米级粒度赋存。

据研究（郭葆墀等，1995；牟保磊，1999；漆富成等，2015；王文广，2015），次生铀矿物主要分布于聚铀矿物的晶格缺陷、微裂隙及微孔隙中，特别是微细粒钛铁氧化矿物对U有极强的吸附能力，部分U被其结构破坏的矿物晶格吸附，部分U被还原沉淀在含钛矿物边缘富集（陈路路等，2018）。共伴生脉石矿物主要为黄铁矿、石英及少量与海底火山喷发、气相交代、氧化和凝聚作用有关的磷灰石、绢云母、重晶石等（郑大中，2001；王文广，2015）。该阶段形成的矿物组合为沥青铀矿（少量晶质铀矿、钛铀矿）+黄铁矿+微晶石英或玉髓+重晶石+磷灰石（少量）+绢云母（少量）。

5.1.2 表生氧化淋滤及后生富集

研究区铀初始富集的老堡组沉积形成后，经历了加里东—印支碰撞造山运动，长期隆起遭受风化剥蚀，为后期铀聚集成矿提供了丰富的物源（郭葆墀等，1995）。燕山—喜马拉雅板内伸展运动形成系列断陷盆地（Hu et al.，2008，2009），盆地边缘发育的断裂构造为大气降水下渗及铀的活化迁移提供了较好的水文地质循环系统，并在运移的途中不断吸收、浸取地层内的U、V、Se、Cd、Mo、Ni等成矿物质，形成富U^{+6}的碳酸铀酰络合物（$UO_2(CO_3)^{2-}$、$UO_2(CO_3)_3^{4-}$等）成矿流体（胡瑞忠，1991；胡瑞忠等，2004），迁移进入低洼区域的老堡组碳硅泥岩中。在白垩纪—古近—新近纪干燥炎热的气候条件下（贵州省地质调查院，2017），蒸发作用、氧化作用、生物作用强烈，利于形成分布范围广、厚度大的氧化带。加之斜切三穗向斜的界牌、施洞口断层产状陡、延伸大（图2），促进氧化带向深部发展。在此背景下，部分停留在氧化带的碳酸铀酰络合物、磷酸铀酰络合物与Ca、Se、Pb等成矿元素形成次生铀矿物，如硅钙铀矿、硒铅铀矿、磷铀矿、芙蓉铀矿、水碳矿等；继续沿断层、裂隙及层间裂隙向深部运移的流体，在有机质的热演化和新生代古近纪煌斑岩的侵入作用下（贵州省地质调查院，2017），产生大量H_2、CH_4、H_2S、CO、CO_2等还原剂，快速消耗水体特别

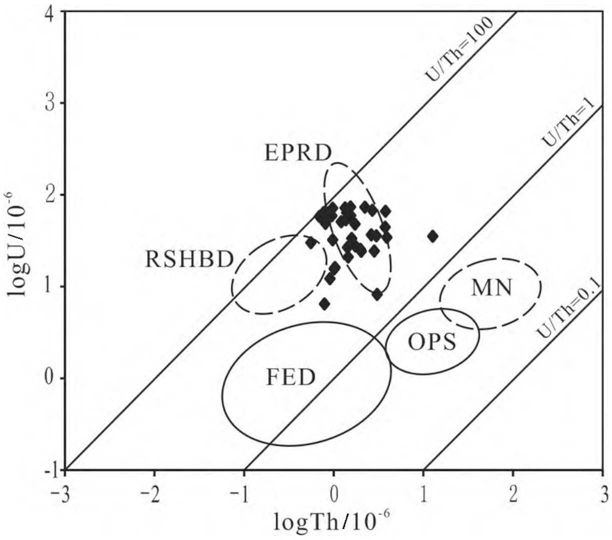

图7 三穗铀矿床围岩U−Th图解(据Bostrorn,1983)
RSHBD—红海热卤水矿床;EPRD—东太平洋隆起沉积物;MN—锰结核;FED—古热水喷流沉积;OPS—正常远洋沉积
Fig.7 U−Th diagram of surrounding rock of Sansui uranium deposit (after Bostrorn, 1983)
RSHBD−Red sea hot brine deposit; EPRD−Eastern Pacific uplift sediments; MN−Manganese nodules; FED−Paleohot water jet deposit; OPS−Normal pelagic deposit

是成矿流体中氧形成还原地球化学障(黎富成等,2015;李延河等,2016;蔡郁文等,2017),同时,含铁矿物在氧化还原过渡带对U^{6+}的吸附、吸收及还原等作用(Scottet et al., 2005;Massey et al., 2014),导致成矿流体中U^{+6}被还原为U^{+4}沉淀,并与初始富集的铀叠加形成工业铀矿体。该过程形成的矿物组合为铀次生矿物(硅钙铀矿+硒铅铀矿+磷铀矿+钛铀矿等)+沥青铀矿(残留)+褐铁矿+黄铁矿(残留)+石英(少量)+方解石(少量)+铜蓝(少量)。

5.2 铀成岩成矿的环境演化

据闵茂中等(1992)、郑大中(2001)、王文广(2015)研究,在地壳深部的还原环境中,氢易于与铀化合成为气相UH_3、UTi_2H_7(铀钛合金氢化物),与磷化合成为PH_3、$Ca_5P_3H_{16}$(磷钙合金氢化物),并与其他壳层元素氢化物(如SiH_4、BaH_2、AlH_3、CaH_2、MgH_2、KH)以及CO、CH_4、C_2H_6等碳的化合物,在伴随断裂构造活动或海底火山活动时,以气态或部分溶于水呈气液混合流体喷出,部分金属以纳米微粒由深部向地表迁移(王学求等,2011)。U、P、Si、Ba、K、Al、Fe的氢化物喷出若遇充足的氧气,或随热液、热汽迁移至地壳浅部,可形成钛铀矿、晶质铀矿、硅钙铀矿等铀矿矿物及石英、玉髓、褐铁矿、白云石、方解石、重晶石、磷灰石、高岭石、水云母等共伴生矿物,与湘西地区下寒武统黑色岩系中铀矿物的成因相一致(王文广,2015)。

黔东地区老堡组Z∈*l*硅质岩的$\delta^{30}Si$、$\delta^{18}O$值变化范围均较大,分别为−0.1‰~0.9‰(0.314‰)和12.8‰~21.2‰(17.3‰)(张位华等,2003),$\delta^{30}Si$和$\delta^{18}O$值显示,该区硅质岩具热水沉积成因,沉积环境为深海—半深海水体(Douthitt,1982;高常林等,1999)。三穗矿床36件硅质岩(含收集27件❶)的δU为1.78~1.99($\delta U=2U/[U+Th/3]$),平均1.96,均远大于1(Wignall,1994);Al/(Al+Fe+Mn)均值为0.19,Fe/Ti>20(Bostrom et al.,1969,1973),U−Th图解样品主要落于东太平洋隆起沉积物区,且发育大量重晶石(图7),表明该区硅质岩的深源特征显著,含铀岩系主要为海底火山喷发、喷溢沉积成岩的产物,其中富含莓球黄铁矿、有机质及碱金属和碱土金属,显示为还原、碱性的环境,与区域上,在震旦纪/寒武纪的转折期存在一次较大规模的缺氧事件吻合(吴朝东等,1999,2000),也与有关学者研究认为,研究区震旦—寒武系黑色岩系成岩成矿具热水喷流成因结果一致(李胜荣等,1995;江永宏等,2005)。

含铀岩系形成后,经历了多次区域性陆内挤压造山隆起和伸展拉张构造活动(宋传中等,2019),干燥炎热气候的风化剥蚀,碱金属和碱土金属的流失,有机质及黄铁矿被氧化等作用。据研究(窦小平等,2015),矿石中Fe_2O_3含量与铀的沉淀呈正相关关系,这是由于Fe^{2+}—Fe^{3+}转化的氧化电位比U^{6+}—U^{4+}要高,Fe^{2+}被氧化为Fe^{3+}的同时,可将水体可溶态中的U^{6+}还原为U^{4+}(蔡郁文等,2017)。

综上认为,该区铀矿形成经历了还原、碱性环境(铀预富集)→氧化、酸性环境(剥蚀区铀的淋滤,次生铀矿物形成)→还原、碱性环境(吸附、热液叠加富集)的成矿环境演变过程。

6 结 论

(1)黔东地区含铀岩系形成于震旦纪/寒武纪转折期的陆缘裂谷和陆缘裂陷缺氧还原环境,铀源与雪峰期海底火山喷发、喷溢作用及含铀地质体的风化淋滤有关。

(2)铀矿床形成经历了含铀岩系的沉积成岩及

铀的初始富集，燕山期—喜马拉雅期板内伸展构造背景下的淋滤、热液叠加改造再富集的成矿过程，后生成矿特征明显，成因属碳硅泥岩型。

（3）三穗铀矿床铀矿物丰富，主要有沥青铀矿、硅钙铀矿、硒铅铀矿、钛铀矿、磷铀矿及芙蓉铀矿、水碳铀矿等，它们以纳米—微米级粒状、柱状（粒径多<10 μm）、细脉状或隐晶质形式赋存于富含有机质、黄铁矿、黏土矿物、含磷矿物等聚铀矿物中，主要为热液叠加及次生改造形成。同时形成白云石、方解石、石英、玉髓、重晶石、赤铁矿、褐铁矿、绢云母等共伴生矿物。

（4）黔东三穗大型铀矿床的发现，表明黔东地区陆缘裂谷、裂陷缺氧还原环境沉积形成的老堡组含铀岩系是大规模铀矿成矿作用的产物，其找矿潜力大，远景好，加强成矿规律、矿床地质地球化学、矿石矿物学及成因研究，将为促进区域成矿预测、扩大找矿勘查成果及丰富该类型铀矿成矿理论提供科学依据。

致谢：向匿名审稿专家及编辑部郝梓国、王学明等老师提出宝贵修改意见表示衷心感谢！

注释：

❶贵州省有色和核工业地质局核资源地质调查院.2015.贵州省岑巩注溪—剑河南明铀矿整装勘查报告[R].

References

Algeo T J, Maynard J B. 2004. Trace−element behavior and redox facies in core shale of upper Pennsylvanian Kansas− type cyclothems[J]. Chemical Geology, 206(3): 289−318.

Bostrom K. 1983. Genesis of ferromanganese deposits− diagnostic criteria for recent and old deposits[C]//Rona P A(ed.). Hydrothermal Processes at Seafloors Spreading Centers. New York: Plenum Press, 473−489.

Bostrom K, Rydell H, Joensuu O. 1973. Langban− an exhalative sedimentary deposits[J]. Economic Geology, 74(5): 1002−1011.

Bostrom K, Peterson M N A. 1969. The origin of aluminum− poor ferromanganese sediments in areas of high heart flow on the West Pacific Rise[J]. Marine Geology, 7: 427−447.

Cai Yuqi, Zhang Jindai, Li Ziying, Guo Qingying, Song Jiye, Fan Honghai, Liu Wusheng, Qi Fucheng, Zhang Minglin. 2015. Outline of uranium resources characteristics and metallogenetic regularity in China[J]. Acta Geologica Sinica, 89(6): 1051−1069(in Chinese with English abstract) .

Cai Yuwen, Wang Huajian, Wang Xiaomei, He Kun, Zhang Shuichang, Wu Chaodong. 2017. Formation conditions and main controlling factors of uranium in marine source rocks[J]. Advances in Earth Science, 32(2): 199−208 (in Chinese with English abstract).

Chen Lulu, Chen Yin, Guo Hu, Feng Xiaoxi, Li Jianguo, Tang Chao, Zhao Hualei. 2018. Alteration characteristics of titanium− bearing minerals and new knowledge about their relationship to uranium occurrence in uraniferous sandstone of Nalinggou area, Ordos Basin[J]. Geology in China, 45(2): 408− 409 (in Chinese with English abstract).

Douthitt C B. 1982. The geochemistry of the stable isotopes of silicon[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 46(8): 1449−1458.

Dou Xiaoping, Xiong Chao, Zeng Wenle, Wu Zhanhua.2015. Mineralization features and controlling factors of Dongkeng uranium deposit in the northwest of Jiangxi province[J]. World Nuclear Geoscience, 32(4): 192− 199 (in Chinese with English abstract).

Du Letian. 2014. Hydrogen geochemistry: Hydride migration law of hacons[J]. Uranium Geology, 30（2）: 65− 77 (in Chinese with English abstract).

Du Letian, Wang Yuming. 1984. Uniform metallogenic mechanism among the granite, volcanic, carbonaceous− siliceous− pelitic rock and sandstone− hosted uranium deposits in south China[J]. Radioactive Geology, (3):1−10(in (Chinese with English abstract).

Gao Changlin, He Jiangqi. 1999. The geochemical features and genesis of the silicalite in Beidabashan[J]. Earth Science——Journal of China University of Geosciences, 24(3):246−249 (in Chinese with English abstract).

Guizhou Geological Survey. 2017. The Regional Geology of China, Guizhou Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1−1098 (in Chinese) .

Guo Baochi, Zhang Daishi, Li Shengxiang, Zhu Jiechen. 1995. Genesis of the carbonate− siliceous− pelitic type uranium deposits in Baoyuan area[J]. Uranium Geology, 11(5): 266−272 (in Chinese with English abstract).

Hitzman M W. 2003. Classification, genesis, and exploration guides for nonsulfide zinc deposits[J]. Economic Geology, 98(4): 685−714.

Hu Ruizhong, Fu Shanling, Huang Yong, Zhou Meifu, Fu Shaohong, Zhao Chenghai, Wang Yuejun, Bi Xianwu, Xiao Jiafei. 2017. The giant South China Mesozoic low− temperature metallogenic domain: Review and a new geodynamic model[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 37: 9−34.

Hu Ruizhong, Fu Shanling, Xiao Jiafei. 2016. Major scientific problems on low− temperature metallogenesis in south China[J]. Acta Petrologica Sinica, 32(11): 3239− 3251(in Chinese with English abstract).

Hu Ruizhong, Zhou Mingfu. 2012. Multiple Mesozoic mineralization events in South China——An introduction to the thematic issue[J]. Mineralium Deposita, 47(6): 579−588.

Hu Ruizhong, Burnard P G, Bi Xianwu, Zhou Mingfu, Peng Jiantang, Su Wenchao, Zhao Junhong. 2009. Mantle- derived gaseous components in ore- forming fluids of the Xiangshan uranium deposit, Jiangxi Province, China: Evidence from He, Ar and C isotopes[J]. Chemical Geology, 266(1/2): 86−95.

Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Zhou Mingfu, Peng Jiantang, Su Wenchao, Liu Shen, Qi Huawen. 2008. Uranium metallogenesis in South China and its relationship to crustal extension during the Cretaceous to Tertiary[J]. Economic Geology, 103(3): 583−598.

Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Su Wenchao, Peng Jiantang, Li Chaoyang. 2004.The relationship between uranium metallogenesis and crustal extension during the cretaceous−tertiary in South China[J]. Earth Science Frontiers, 11(1):153− 160(in Chinese with English abstract).

Hu Ruizhong. 1991. Research on the Function and Origin of $\sum CO_2$ in Forming Hydrothermal Uranium Deposits in South China[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1− 96(in Chinese with English abstract).

Huang Wenbin, Li Wanlun, Wu Xishun. 2017. Situation of uranium resources [J]. Technology and Industry Across the Straits, (6):136−138（in Chinese with English abstract）.

Jiang Yonghong, Li Shengrong. 2005. A study of the fluid environment of silicalite of transitional Precambrian− Cambrian age in Hunan and Guizhou Provinces[J]. Earth Science Frontiers, 12（4）：622−629

Jin Zhongguo, Liu Kaikun, Luo Kai, Zheng Minghong, Yang Shengfa, Li Yantao, Fan Yunfei, Wang Qiong. 2019. Geological geochemical characteristics and genesis of Longwan uranium deposit, Sansui, Guizhou Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(9): 2830− 2844 (in Chinese with English abstract) .

Li Shengrong, Gao Zhenmin. 1995. REE characteristics of black rock series of the lower Cambrian niutitang formation in Hunan−Guizhou Provinces, Chian with a discussion on the REE patterns in marine hydrothermal sediments[J]. Acta Mineralogica Sinica, 15 (2):225−229(in Chinese with English abstract) .

Li Yanhe, Duan Chao, Zhao Yue, Pei Haoxiang, Ren Shunli. 2016. The role of oxidizing reducing barrier in mineralization of hydrothermal uranium ore[J]. Acta Geologica Sinica, 90(2): 201−218 (in Chinese with English abstract).

Liu Yingjun, Cao Liming, Li Zhaolin, Wang Henian, Chu Tongqing , Zhang Jingrong. 1986. Geochemistry of Elements[M]. Beijing: Science Press, 1−517 (in Chinese).

Luo Taiyi, Ning Xingxian, Luo Yuanliang, Li Xiaobiao, Lin Rongxiang, Yao linbo. 2005. Super− enrichment of Se in the bottom black shales Lower Cambrian at Zunyi, Guizhou Province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 25(3):275− 282(in Chinese with Enrlish abstract).

Massey M S , Lezama−Pacheco J S , Jones M E , Ilton E S , Cerrato José M and Bargar J R. 2014. Competing retention pathways of uranium upon reaction with Fe (II)[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 142(1): 166−185.

Min Maozhong, Zhang Fusheng. 1992. Introduction Causes of Uranium Mineralogy [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1−264(in Chinese).

Mou Baolei. 1992. Geochemistry of Elements[M]. Beijing: Peking University Press, 1−125 (in Chinese) .

Peng Jun, Tian Jingchun, Yi Haisheng, Xia Wenjie. 2000. The Late Precambrian hot water sedimentation of the Southeast Yangtze Plate continental margin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 18(1): 107−113(in Chinese with English abstract)

Pi Daohui, Liu Congqiang, Shields− Zhou Graham Anthony, Jiang Shaoyong. 2013. Trace and rare earth element geochemistry of black shale and kerogen in the Early Cambrian Niutitang Formation in Guizhou Province, South China: Constraints for redox environments and origin of metals[J]. Precambrian Research, 225(1) : 218−229.

Qi Fucheng, Li Zhixing, Zhang Zilong, Wang Wenquan, Yang Zhiqiang, Zhang Yan. 2015. Hydrothermal decarburization and uranium− polymetallic ore− mineralization in marine phosphorite, northwestern Hunan[J]. Earth Science Frontiers, 22(4): 188− 199 (in Chinese with English abstract).

Qi Fucheng, Li Zhixing, Zhang Zilong, Wang Wenquan, Wang Wenguang, Yang Zhiqiang, Zhang Yan. 2014. The discovery of onofrite and uraninite in marine phosphorite and its geological significance, northwestern Hunan[J]. Uranium Geology, 30(3): 129−134, 167 (in Chinese with English abstract).

Qi Fucheng, Zhang Zilong, Li Zhixing, Wang Wenquan, Yang Zhiqiang, Zhang Yan, Ma Yu. 2012. Unconventional uranium resources in black rock series in China and its development prospect[J]. World Nuclear Geoscience, 29(4): 187− 191, 198(in Chinese with English abstract).

Qi Fucheng, Zhang Zilong, He Zhongbo, Li Zhixing, Wang Wenquan, Su Xiangli, Zhang Chao. 2011. Uranium− polymetallic ore− forming system and mechanism of the black rock series in the southeast continental margin of Yangtze plate[J]. Uranium Geology, 27(3): 129−135, 145(in Chinese with English abstract).

Rawat T P S, Josh G B, Bhaskar Basu, Nurul Absar. 2010. Occurrence of proterozoic black shale− hosted uranium mineralisation in Tal Group, Sirmour district, Himachal Pradesh[J]. Journal of the Geological Society of India, 75: 709−714.

Rudnick R L, Gao Shao. 2003. Composition of the continental crust[J]. Elsevier−Pergamon, Oxford. 3:1−64.

Scott T B, Allen G C, Heard P J, Randell M G. 2005. Reduction of u (vi) to u(iv) on the surface of magnetite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 69(24), 5639−5646.

Shi Chunhua, Cao Jian, Hu Kai, Han Shanchu, Bian Lizeng, Yao Suping. 2011. A review on origin of Ni−Mo polymetallic deposits in Lower Cambrian black rock series in South China [J]. Geological Review, 57(5): 6718− 6730(in Chinese with English abstract).

Sleep N H. 1990. Hotspots and mantle plumes: Some phenomenology[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 95(B5): 6715−6736.

Song Chuanzhong, Li Jianhao, Yan Jiayong, Wang Yangyang, Liu Zhendong, Yuan Fang, Li Zhenwei. 2019. A ten− tative discussion on some tectonic problems in the east of South China continent [J]. Geology in China, 46(4): 704− 722(in Chinese with English abstract).

Tao Ping, Xiao Xuedong, Zhang Hui. 2009. The Au− bearing sedimentary sequences and their impact on the gold deposits in light metamorphic rock in the boundary of Hunan, Guizhou and Guangxi Regions[J]. Geological Science and Technology Information, 28(2): 110−114(in Chinese with English abstract).

Wang Xueqiu, Ye Rong. 2011. Findings of nanoscale metal particles: Evidence for deep− penetrating Geochemistry[J]. Acta Geoscientica Sinica, 32(1): 7−12(in Chinese with English abstract).

Wang Wenguang. 2015. The Discover of brannerite and uraninite in Lower Cambrian U− bearing Phosphorite in West Hunan[J]. Uranium Geology, 31(1): 19−28(in Chinese with English abstract).

Wen Hanjie, Carignan J. 2011. Selenium isotopes trace the source and redox processes in the black shale− hosted Se− rich deposits in China[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 75: 1411−1427.

Wilkin R T, Barnes H L, Barantley S L. 1996. The size distribution of framboidal pyrite in modern sediments: An indicator of redox conditions[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 60: 3897−3912.

Wignall P B. 1994. Black Shales[M] . Oxford: Clarendon Press, 1− 46.

Wu Chaodong. 2000. Recovery of the paleoocean environment in the alternating epoch of Late Sinian and Early Cambrian in the west Hunan[J]. Earth Science Frontiers, 7(supp.): 45− 57(in Chinese with English abstract).

Wu Chaodong, Chen Qiying, Lei Jiajin. 1999. The genesis factors and organic petrology of black shale series from the upper sinian to the Lower Cambrian, Southwest of China[J]. Acta Petrologica Sinica, 15(3): 453−462 (in Chinese with English abstract).

Xu Dazhong. 1990. A study of major metallogenic factors and conditions of the Dongkeng uranium deposit[J]. Mineral Deposits, 9 (1): 70−76 (in Chinese with English abstract).

Yang Enlin, Lü Xibiao, Shi Ping, Wu Po, Liu Wen, Di Yongning. 2014. Detrital zircon age of stratigaphic Sinian−Canbrian in east Guizhou and its geological significance[J]. Earth Science——Journal of Chian University of Geosciences, 39(4): 387−398(in Chinese with English abstract).

Yang Yongqiang, Li Li. 2010. Geological characteristics sand formation mechanism of nonsulfide zinc deposit[J]. Global Geology, 29(1): 56−59(in Chinese with English abstract).

Young R G. 1984. Uranium deposits of the world, excluding Europe[C]// B. De Vivo and others (eds.). 1Uranium Geochemistry, Mineralogy, Geology, Exploration and Resources, 201. The Institution of Mining and Metallurgy, London,. 117−139.

Zhang Chengjiang, Wang Deyin, Fu Yongquan. 2007. Uranium Mineralogy[M]. Atomic Energy Press, Beijing: 12−13(in Chinese).

Zhang Daishi. 1983. Uranium distribution and concentration in some sedimentary carbonates, silicalites and pelitic rocks[J]. Chinese Science Bulletin, 28(11): 1519−1524.

Zhang Jingyi, Wang Aizhen, Li Xiuying, Zheng Zixian, Li Jianzhong. 1995. Uranium Minerals of China [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 23−38(in Chinese).

Zhang Wanliang, Que Zushuang, Gao Mengqi, Lü Chuan, Huang Chao, Huang Di, Xie Zhicong. 2019. Geochemical characteristics and sedimentary environment of the carbonaceous− siliceous mudstone of the Guanyingtang Formation of the Lower Cambrian, northwestern Jiangxi Province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 37 (2): 278−291(in Chinese with English abstract).

Zhang Wehua, Jiang Lijun, Gao Hui, Yang Ruidong. 2003. Study on sedimentary environment and origin of black siliceous rocks of the Lower Cambrian in Giuzhou Province[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 22(2): 174− 178 (in Chinese with English abstract) .

Zhang Zhuhai. 1986. On the geological background of the mineralization of carbonate−siliceous−pelitic stratabound uranium deposits in South China and variety of their metallogenesis[J]. Uranium Geology, 2(6): 321−329.

Zhao Fengmin. 2009. An review on geology study of carbonaceous− siliceous− pelitic rock typeuranium deposit in China and the strategy for its development[J]. Uranium Geology, 25(2): 91− 97 (in Chinese with English abstract).

Zheng Dazhong. 2001. Phosphorus hydrides as main migration form of phosphorus[J]. Geology of Chemical Minerals, 3(1): 1− 7(in Chinese with English abstract).

Zhong Fujun, Pan Jiayong, Xia Fei, Zhang Yong, Liu Guoqi, Liu Ying. 2017. A study of an integrated anomaly model and an exploration model for uranium exploration in Yuhuashan area, Jiangxi Province [J]. Geology in China, 44(6): 1234−1250(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.

蔡郁文, 王华建, 王晓梅, 何坤, 张水昌, 吴朝东 . 2017. 铀在海相烃源岩中富集的条件及主控因素[J]. 地球科学进展, 32(2): 199−208.

陈路路, 陈印, 郭虎, 冯晓曦, 李建国, 汤超, 赵华雷 . 2018. 鄂尔多斯盆地纳岭沟地区含铀砂岩中含钛类矿物蚀变特征及与铀赋存关系新认识[J]. 中国地质, 45(2): 408−409.

窦小平, 熊超, 曾文乐, 吴赞华 . 2015. 赣西北董坑铀矿床矿化特征及控制因素[J]. 世界核地质科学, 32(4): 192−199.

杜乐天 . 2014. 氢的地球化学——幔汁氢化迁移律[J]. 铀矿地质, 30 (2): 65−77.

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.
高常林, 何将启. 1999. 北大巴山硅质岩的地球化学特征及其成因[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 24(3): 246−249.
贵州省地质调查院. 2017. 中国区域地质志·贵州志[M]. 北京: 地质出版社, 1−1098.
郭葆墀, 张待时, 李胜祥, 朱杰辰. 1995. 保源地区碳硅泥岩铀矿床成因[J]. 铀矿地质, 11(5): 266−272.
胡瑞忠, 付山岭, 肖加飞. 2016. 华南大规模低温成矿的主要科学问题[J]. 岩石学报, 32(11): 3239−3251.
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. 1991. ∑CO_2在华南热液铀矿床形成中的作用及其来源研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 1−96.
黄文斌, 李万伦, 吴西顺. 2017. 铀矿资源形势[J]. 海峡科技与产业, (6): 136−138.
江永宏, 李胜荣. 2005. 湘、黔地区前寒武—寒武纪过渡时期硅质岩生成环境研究[J]. 地学前缘, 12(4): 622−629.
金中国, 刘开坤, 罗开, 郑明泓, 杨胜发, 李艳桃, 范云飞, 王琼. 2019. 贵州三穗龙湾铀矿床地质地球化学特征及成因[J]. 岩石学报, 35(9): 2830−2844.
李胜荣, 高振敏. 1995. 湘黔地区牛蹄塘组黑色岩系稀土特征——兼论海相热水沉积岩稀土模式[J]. 矿物学报, 15(2): 225−229.
李延河, 段超, 赵悦, 裴浩翔, 任顺利. 2016. 氧化还原障在热液铀矿成矿中的作用[J]. 地质学报, 90(2): 201−218.
刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 王鹤年, 储同庆, 张景荣. 1986. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1−517
罗泰义, 宁兴贤, 罗远良, 李晓彪, 凌荣祥, 姚林波. 2005. 贵州遵义早寒武世黑色岩系底部Se的超常富集[J]. 矿物学报, 25(3): 275−282.
闵茂中, 张富生. 1992. 成因铀矿物学概论[M]. 北京: 原子能出版社, 262−264.
牟保磊. 1999. 元素地球化学[M]. 北京: 北京大学出版社, 124−125.
彭军, 田景春, 伊海生, 夏文杰. 2000. 扬子板块东南大陆边缘晚前寒武纪热水沉积作用[J]. 沉积学报, 18(1): 107−113.
漆富成, 李治兴, 张字龙, 王文全, 杨志强, 张岩. 2015. 湘西北海相磷块岩的热液脱碳与铀多金属成矿作用[J]. 铀矿地质, 31(4): 188−199.
漆富成, 李治兴, 张字龙, 王文全, 王文广, 杨志强, 张岩. 2014. 湘西北海相含铀磷块岩中硒汞矿和晶质铀矿的发现及其地质意义[J]. 铀矿地质, 30(3): 129−134, 167.
漆富成, 张字龙, 李治兴, 王文全, 杨志强, 张岩, 马钰. 2012. 中国黑色岩系非常规铀资源及其开发利用前景[J]. 世界核地质科学, 29(4): 187−191, 198.
漆富成, 张字龙, 何中波, 李治兴, 王文全, 苏香丽, 张超. 2011. 扬子陆块东南缘黑色岩系铀多金属成矿体系和成矿机制[J]. 铀矿地质, 27(3): 129−135, 145.
施春华, 曹剑, 胡凯, 韩善楚, 边立曾, 姚素平. 2011. 华南早寒武世黑色岩系Ni、Mo多金属矿床成因研究进展[J]. 地质论评, 57(5): 718−730.
宋传中, 李加好, 严加永, 王阳阳, 刘振东, 袁芳, 李振伟. 2019. 华南大陆东部若干构造问题的思考[J]. 中国地质, 46(4): 704−722.
陶平, 肖旭东, 张慧. 2009. 湘黔桂浅变质岩区含金建造及其与金矿的关系[J]. 地质科技情报, 28(2): 110−114.
王学求, 叶荣. 2011. 纳米金属微粒发现——深穿透地球化学的微观证据[J]. 地球学报, 32(1): 7−12.
王文广. 2015. 湘西下寒武统含铀磷块岩中钛铀矿和晶质铀矿的发现及其成因分析[J]. 铀矿地质, 31(1): 19−28.
吴朝东. 2000. 湘西震旦—寒武纪交替时期古海洋环境的恢复[J]. 地学前缘, 7(增): 45−57.
吴朝东, 陈其英, 雷家锦. 1999. 湘西震旦—寒武纪黑色岩系的有机岩石学特征及其形成条件[J]. 岩石学报, 15(3): 453−462.
徐达忠. 1990. 董坑铀矿床成矿要素及条件的研究[J]. 矿床地质, 9(1): 70−76.
杨恩林, 吕新彪, 石平, 吴波, 刘文, 狄永宁. 2014. 黔东震旦—寒武系转换期碎屑锆石年龄及其地质意义[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 39(4): 387−398.
杨永强, 李丽. 2010. 非硫化物型锌矿床的地质特征和成因机制[J]. 世界地质, 29(1): 56−59.
张成江, 王德荫, 傅永全. 2007. 铀矿物学[M]. 北京: 原子能出版社, 12−13.
张待时. 1982. 铀在一些碳、硅、泥沉积岩中的分布和富集[J]. 科学通报, 1320−1323.
张静宜, 王爱珍, 李秀英, 郑自先, 李建中. 1995. 中国铀矿物志[M]. 北京: 原子能出版社, 23−38.
张万良, 阙足双, 高梦奇, 吕川, 黄超, 黄迪, 谢智聪. 2019. 赣西北下寒武统观音堂组碳硅泥岩地球化学特征及其沉积环境演化[J]. 沉积学报, 37(2): 278−291.
张位华, 姜立君, 高慧, 杨瑞东. 2003. 贵州寒武系底部黑色硅质岩成因及沉积环境探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 22(2): 174−178.
张祖还. 1986. 论华南碳硅泥岩型层控铀矿床的形成地质背景和成因的多样性[J]. 铀矿地质, 2(6): 321−329.
赵凤民. 2009. 中国碳硅泥岩型铀矿地质工作回顾与发展对策[J]. 铀矿地质, 25(2): 91−97.
郑大中. 2001. 磷氢化物是磷的主要迁移形式[J]. 化工矿产地质, 3(1): 1−7.
钟福军, 潘家永, 夏菲, 张勇, 刘国奇, 刘颖. 2017. 江西玉华山地区铀矿综合信息找矿模型研究[J]. 中国地质, 44(6): 1234−1250.