

doi: 10.12029/gc20200813001

安国堡, 刘海博, 冯永来, 辛存林, 蔡煜琦, 胡菊英. 2024. 四川盆地北部砂岩型铀矿岩石学特征及矿床成因研究[J]. 中国地质, 51(3): 881–897.  
An Guobao, Liu Haibo, Feng Yonglai, Xin Cunlin, Cai Yuqi, Hu Juying. 2024. Petrological characteristics and origin of the sandstone-type uranium deposits in the northern Sichuan Basin[J]. Geology in China, 51(3): 881–897(in Chinese with English abstract).

# 四川盆地北部砂岩型铀矿岩石学特征及矿床成因研究

安国堡<sup>1</sup>, 刘海博<sup>2</sup>, 冯永来<sup>1</sup>, 辛存林<sup>2</sup>, 蔡煜琦<sup>3</sup>, 胡菊英<sup>4</sup>

(1. 四川省核工业地质局二八二大队, 四川 德阳 618000; 2. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州, 730070; 3. 核工业北京地质研究院, 北京 100029; 4. 兰州交通大学测绘与地理信息学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:**【研究目的】铀资源是中国重要的战略资源和能源矿产, 为更好地勘探和开发四川盆地北部砂岩型铀矿, 有必要深入了解其地质特征和成矿模式。【研究方法】本文通过野外调查、岩矿鉴定和地球化学分析研究了砂岩型铀矿的岩石学特征, 分析了其成矿过程。【研究结果】含矿主岩主要为下白垩统苍溪组钙质胶结中—细粒砂岩和砾岩。铀以自生铀矿物的形式存在, 铀矿物主要为铀石, 呈他形、半自形和自形柱状。【结论】米仓山铁船山组变质酸性火山岩和花岗岩为盆地砂岩型铀矿的形成提供了初始铀源。铀在水溶液中以碳酸铀酰离子的形式迁移, 富含有机质和黄铁矿的沼泽和停滞水还原环境破坏了碳酸铀酰离子, 使铀元素以沉积成岩为主局部叠加后生富集作用成矿。

**关键词:** 砂岩型铀矿; 岩石学特征; 成矿过程; 矿产勘查工程

**创新点:** 依据砂岩型铀矿岩石学特征辨识了成矿物源, 厘定了成矿过程。

中图分类号: P619.14 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)03-0881-17

## Petrological characteristics and origin of the sandstone-type uranium deposits in the northern Sichuan Basin

AN Guobao<sup>1</sup>, LIU Haibo<sup>2</sup>, FENG Yonglai<sup>1</sup>, XIN Cunlin<sup>2</sup>, CAI Yuqi<sup>3</sup>, HU Juying<sup>4</sup>

(1. The 282 Team of Sichuan Nucleus Industrial Geology Bureau, Deyang 618000, Sichuan, China; 2. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 3. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 4. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730071, Gansu, China)

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

**[Objective]** Uranium resources are China's important strategic resources and energy minerals. The thorough understanding of geological characteristics and metallogenic models of sandstone-type uranium deposits in the northern Sichuan Basin is to the benefit of exploration and development. **[Methods]** The petrological characteristics of sandstone-type uranium deposits are studied through field investigation, rock and mineral identification and geochemical analysis, and the mineralization process is analyzed. **[Results]** The ore-bearing rocks are mainly the calcareous cementation medium-fine-grained sandstone and conglomerate of the

收稿日期: 2020-08-13; 改回日期: 2020-12-10

基金项目: 四川省财政厅 2017 年省级事业单位政府购买服务试点项目“川东北铀矿、石墨矿远景调查”(川财综〔2017〕12 号)资助。

作者简介: 安国堡, 男, 1966 年生, 正高级工程师, 主要从事矿产勘查研究; E-mail: 925260954@qq.com。

通讯作者: 刘海博, 男, 1994 年生, 硕士生, 主要从事矿产勘查与地质环境研究; E-mail: hbliu.nwnu@foxmail.com。

Lower Cretaceous Cangxi Formation. Uranium exists in the form of authigenic uranium minerals. Uranium minerals are mainly coffinite, which are in xenomorphic, euhedral and hypautomorphic granular. **[Conclusions]** The metamorphic acidic volcanic rocks and granites of the Tiechuanshan Formation in Micangshan provided the initial uranium source for the formation of sandstone-type uranium deposits in the basin. Uranium migrates in the form of carbonic acid containing uranyl ions in the aqueous solution. The reductive environment of swamps and stagnant water rich in organic matter and pyrite destroys the carbonic acid containing uranyl ions, causing uranium to precipitate and accumulate in the primary diagenesis stage and secondary epigenesis stage.

**Key words:** sandstone-type uranium deposit; petrological characteristics; metallogenic process; mineral exploration engineering

**Highlights:** Based on the petrological characteristics of sandstone-type uranium deposits, the metallogenic source was identified and the metallogenic process was determined.

**About the first author:** AN Guobao, male, born in 1966, professor-level senior engineer, mainly engaged in mineral exploration; E-mail: [925260954@qq.com](mailto:925260954@qq.com).

**About the corresponding author:** LIU Haibo, male, born in 1994, master candidate, mainly engaged in mineral exploration and geological environment; E-mail: [hbliu.nwnu@foxmail.com](mailto:hbliu.nwnu@foxmail.com).

**Fund support:** Supported by the Sichuan Provincial Department of Finance Provincial Public Institution Government Purchase Service Pilot Project in 2017 "Prospect Investigation of Uranium and Graphite Deposits in Northeast Sichuan" (No. (2017)12).

## 1 引 言

铀矿作为 26 个重要矿种之一,是中国重要的战略资源和能源矿产。中国铀资源较为丰富,铀矿床类型多,但主要为砂岩型、花岗岩型、火山岩型和碳硅泥岩型等 4 类(蔡煜琦等, 2015)。其中砂岩型为最主要类型,其铀矿床数量占各类铀矿的 43.0%。进入 21 世纪,新疆伊犁、吐哈盆地,内蒙古鄂尔多斯和二连盆地砂岩型铀矿找矿取得重大突破,表明中国砂岩型铀矿找矿潜力巨大(蔡煜琦等, 2015)。研究区位于四川盆地北部,地理范围主要包括广元市的旺苍县和苍溪县、巴中市的南江县和南充市的阆中市。20 世纪 70 年代中后期到 80 年代末,中国人民解放军基建工程兵二七三团和核工业部所属铀矿地质队伍在该区开展了大规模的砂岩型铀矿地质勘查工作,落实铀矿床 2 个(301 范家山铀矿床和 303 花台寺铀矿床),铀矿点数十个,其中 303 铀矿床达到了中型。20 世纪 90 年代开始至今,该地区铀矿地质工作进入了停滞阶段。

2017 年以来,笔者有幸参与了“川东北铀、石墨矿远景调查”项目<sup>①</sup>,实地考察了 301 铀矿床和 50、6051 等铀矿点,开展了露头、钻孔和老硐地质调查、样品采集和放射性伽玛测量等工作,结合岩矿鉴定、地球化学分析、扫描电镜和电子探针等分析测试手段,对研究区内铀矿床和主要铀矿点的容

矿层物质组成、岩石结构构造和铀存在形式进行了研究。基于野外调查和室内分析,借鉴国内外砂岩型铀矿勘查和研究成果,分析了四川盆地北部砂岩型铀矿的岩石学特征和成矿环境,从沉积学角度探讨了铀矿的成矿作用过程,以期为该区砂岩型铀矿勘查工作部署提供参考。

## 2 地质背景

研究区大地构造位于滨太平洋铀成矿域(I-3)—扬子陆块铀成矿省(II-9)—四川盆地铀成矿区(III-38),扬子准地台西北缘四川台坳,川北台陷,梓潼台凹东部—通江台凹西部,北邻大两会台褶束和米仓山凸起(图 1)。盆地基底由中元古界火地亚群、上震旦统一中志留统、下二叠统一中三叠统 3 个基底构造层组成。盆地盖层为上三叠统一白垩统陆相红色碎屑岩。上三叠统为须家河组含煤沼泽、滨湖及湖相沉积,侏罗系为一套以河湖相碎屑沉积为主的陆相沉积,白垩系为以河流相为主的红色碎屑岩沉积。研究区内产出有 301 范家山和 303 花台寺铀矿床,128 桅杆树和 50 黑滩铀矿点,研究区外东北部和东南部产出有 4210 松溪和 7201 毛坝铀矿床。除毛坝铀矿床产出在上侏罗统蓬莱镇组外,其余均产在下白垩统苍溪组中。下白垩统苍溪组与下伏上侏罗统蓬莱镇组呈假整合接触。

蓬莱镇组主要出露上段,为一套湖相的红色砂

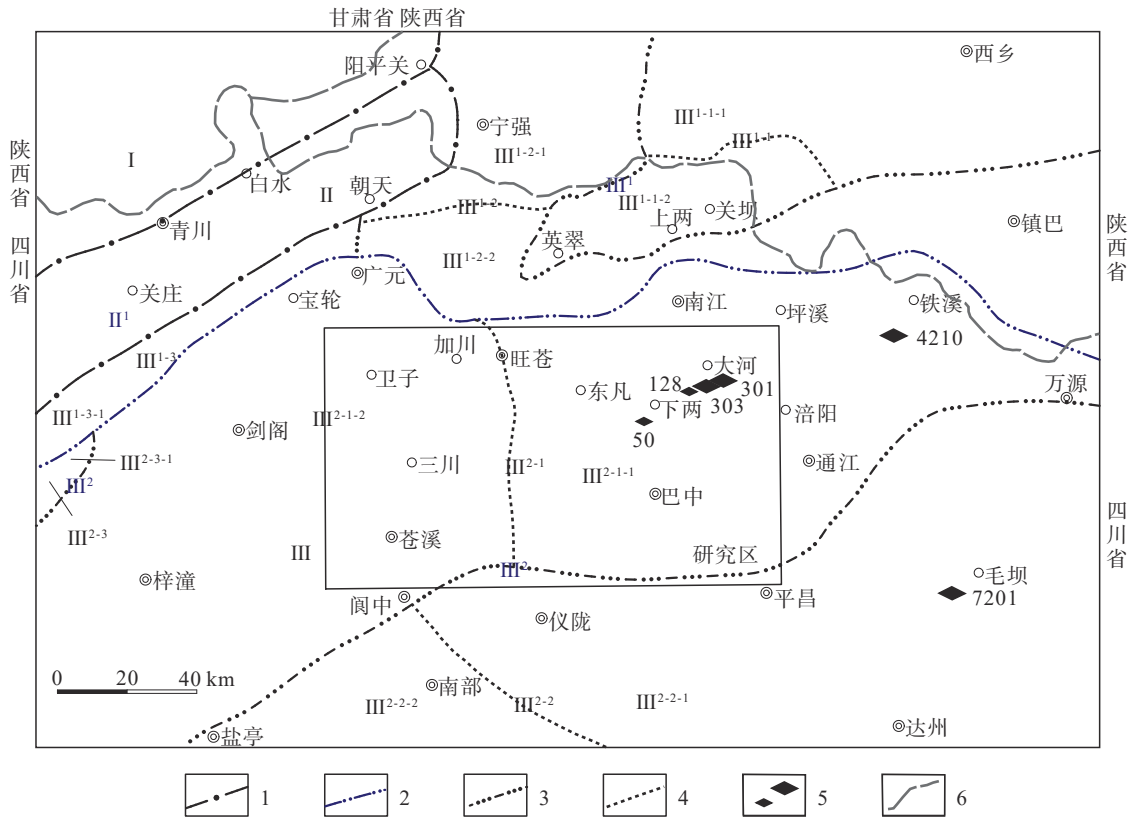


图 1 研究区大地构造位置图

1—一级构造单元界线; 2—二级构造单元界线; 3—三级构造单元界线; 4—四级构造单元界线; 5—铀矿床和铀矿点; 6—省界; I—秦岭地槽褶皱系; II—松潘甘孜地槽褶皱系; II<sup>1</sup>—龙门山褶皱带; III—扬子准地台; III<sup>1</sup>—大巴山龙门山台缘凹陷; III<sup>1-1</sup>—汉中凸起; III<sup>1-1-1</sup>—米仓山凸起; III<sup>1-1-2</sup>—宁镇古台陷; III<sup>1-2</sup>—宁强古台陷; III<sup>1-2-1</sup>—宁强台拱; III<sup>1-2-2</sup>—大两会台褶束; III<sup>1-3</sup>—广元名山边缘凹陷; III<sup>1-3-1</sup>—白石凹褶束; III<sup>2</sup>—四川台坳; III<sup>2-1</sup>—川北台陷; III<sup>2-1-1</sup>—通江台陷; III<sup>2-1-2</sup>—梓潼台陷; III<sup>2-2</sup>—川中台拱; III<sup>2-2-1</sup>—达县台穹; III<sup>2-2-2</sup>—盐亭台穹; III<sup>2-3</sup>—川西台陷; III<sup>2-3-1</sup>—江油穹褶束

Fig.1 Geotectonic map of study area

1—First order tectonic unit boundary; 2—Second order tectonic unit boundary; 3—Third order tectonic unit boundary; 4—Fourth order tectonic unit boundary; 5—Uranium deposit and uranium ore occurrence; 6—Provincial boundary; I—Qinling geosyncline fold system; II—Songpan-Ganzi geosyncline fold system; II<sup>1</sup>—Longmenshan fold belt; III—Yangzi paraplatform; III<sup>1</sup>—Dabashan-Longmenshan platform margin depression; III<sup>1-1</sup>—Arch of Proterozoic in Hannan; III<sup>1-1-1</sup>—Hanzhong bulge; III<sup>1-1-2</sup>—Micangshan bulge; III<sup>1-2</sup>—Ningzhen ancient platform subsidence; III<sup>1-2-1</sup>—Ningqiang platform depression; III<sup>1-2-2</sup>—Dalianghui platform fold bundle; III<sup>1-3</sup>—Guangyuan-Mingshan edge depression; III<sup>1-3-1</sup>—Baishi depression fold bundle; III<sup>2</sup>—Sichuan platform depression; III<sup>2-1</sup>—North Sichuan platform subsidence; III<sup>2-1-1</sup>—Tongjiang platform depression; III<sup>2-1-2</sup>—Zitong platform depression; III<sup>2-2</sup>—Central Sichuan platform arch; III<sup>2-2-1</sup>—Daxian platform dome; III<sup>2-2-2</sup>—Yanting platform dome; III<sup>2-3</sup>—Western Sichuan platform subsidence; III<sup>2-3-1</sup>—Jiangyou dome fold bundle

岩建造。岩性为岩屑砂岩,可划分 5~8 个韵律层,每个韵律层的下部为中—细粒灰紫—紫红色岩屑砂岩,局部有砾岩透镜体,砂体厚十余米;韵律层的上部为紫红色泥岩、泥质粉砂岩,顶部有 0~0.5 m 厚的灰绿色褪色泥岩。砂岩层中局部见有植物化石和恐龙化石碎片,粉砂岩和泥岩中见有钙质结核和垂直岩层的虫迹,总厚度 951~1289 m。

苍溪组由一套河流相红色砂、泥岩建造组成,地层厚度为 390~594 m,最厚处达 800 m。岩性为河流相紫红色泥岩、粉砂质泥岩与浅灰色、紫红色

夹灰黑色、灰绿色岩屑砂岩和砾岩互层,划分为 11~13 个韵律层。每一韵律层分为两个岩性段:上部为紫红色泥岩和粉砂质泥岩,厚几米到几十米,具钙质结核、雨痕、中迹、泥裂、波痕等构造;下部为以浅灰色为主,紫红色次之,富含有机质的中细粒岩屑砂岩,厚 10~35 m,局部夹砾岩透镜体。

### 3 区域铀矿化特征

#### 3.1 铀矿化分布特征

研究区东部铀矿化层主要为下白垩统苍溪组

第一韵律层，产状为  $310^{\circ}\sim 330^{\circ}\angle 6^{\circ}\sim 15^{\circ}$ ，301、303 和 50 等区内重要的铀矿床和铀矿点均产于该层中(图 2)。研究区西部主要容矿层为苍溪组第八和第九韵律层，前者主要有苍溪县东溪镇境内的 47 铀矿点和阆中县思依镇境内的 6052、6053 等铀矿点，后者有阆中县思依镇境内的 6051 等铀矿点；其次是白龙组第一和第五韵律层，前者有阆中县思依镇月台山 6054 铀矿点，后者有广元清水铺 7055 等铀矿点(图 2)。在每一含铀韵律层中，铀矿化均赋存于下部浅色层中的砾岩、含砾砂岩以及中、细

粒砂岩中，与下伏红色泥岩层呈冲刷接触。铀矿化与黏土矿物、铁质和有机质关系密切。

研究区东北部邻区的通江县泥溪镇 4210 铀矿床容矿层也为苍溪组第一韵律层；东南部邻区宣汉县境内铀矿点容矿层为上侏罗统蓬莱镇组上段和下段，该区最重要的 7201 铀矿床产于蓬莱镇组上段第一到第五韵律层中(图 2)。自东向西，铀矿化层有逐渐抬高的趋势。

通过沥青铀矿铀-铅法测得 301 铀矿床 1 件产于有机质中的沥青铀矿形成年龄为  $(116.5\pm 2.3)\text{Ma}$ <sup>②</sup>，

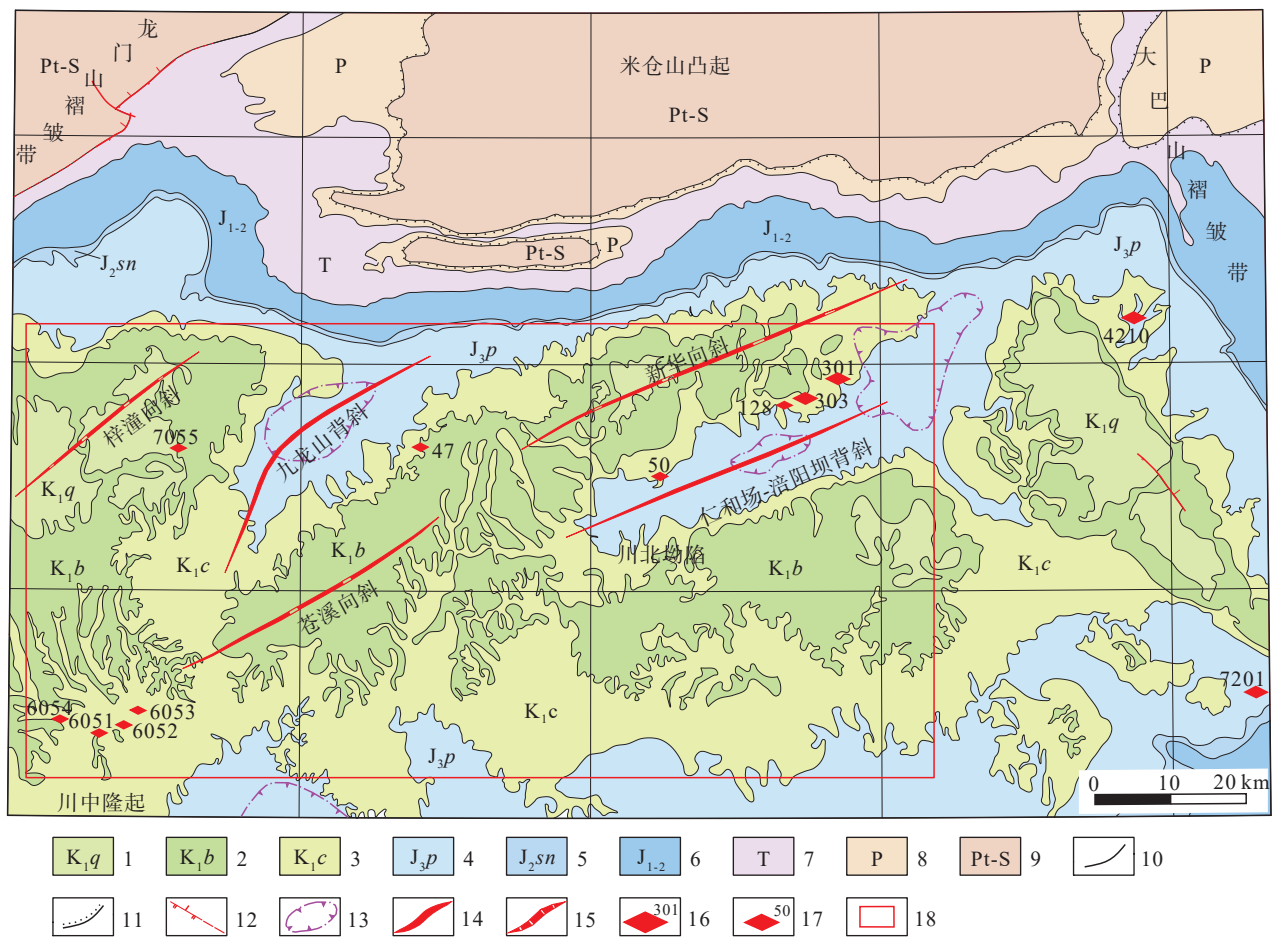


图 2 研究区地质图

1—下白垩统七曲寺组；2—下白垩统白龙组；3—下白垩统苍溪组；4—上侏罗统蓬莱镇组；5—中侏罗统遂宁组；6—中侏罗统沙溪庙组和千佛岩组、下侏罗统白田坝组；7—三叠系；8—二叠系；9—元古界—志留系；10—整合接触界线；11—不整合接触界线；12—逆断层；13—圈闭构造；14—背斜轴线；15—向斜轴线；16—铀矿床及编号；17—铀矿点及编号；18—研究区范围

Fig.2 Geological map of study area

1—Qiqisi Formation of Lower Cretaceous; 2—Bailong Formation of Lower Cretaceous; 3—Cangxi Formation of Lower Cretaceous; 4—Penglaizhen Formation of Upper Jurassic; 5—Suining Formation of Middle Jurassic; 6—Shaximiao Formation and Qianfuyan Formation of Middle Jurassic, Baitianba Formation of Lower Jurassic; 7—Triassic; 8—Permian; 9—Proterozoic-Silurian; 10—Conformity boundary; 11—Unconformity boundary; 12—Reverse fault; 13—Trap structure; 14—Anticline axis; 15—Syncline axis; 16—Uranium deposit and number; 17—Uranium ore occurrence and number; 18—The study area

303 铀矿床 3 件产于胶结物中的沥青铀矿年龄为  $(107.4 \pm 9.4)\text{Ma}$ 、 $(111.4 \pm 2.2)\text{Ma}$  和  $(124.5 \pm 3.3)\text{Ma}$ <sup>2</sup>, 可见本区铀矿化年龄在  $(107.4 \pm 9.4) \sim (124.5 \pm 3.3)\text{Ma}$ , 属早白垩世中晚期, 成矿年龄与地层时代相同或稍晚, 矿岩时差较小。

### 3.2 铀矿化体特征

含矿主岩具层理构造、层面构造和结核构造等, 层理类型有前积交错层理、槽状交错层理和平行层理等。铀矿体形态复杂, 主要有似层状和透镜状。矿体产状与地层产状基本一致。铀矿体规模一般较小, 厚度 0.2~1.0 m, 长度一般几米至数十米, 宽度多在数十米之内。规模较大的铀矿体产于 303 花台寺铀矿床中, 其中花台寺矿段 II-3 主矿体最大长度 480 m, 最大宽度 200 m, 最大厚度 3.74 m, 平均厚度 1.21 m, 平均品位 0.236%; 青岗矿段 II-4 主矿体最大长度和最大宽度均达到 180 m, 最大厚度 3.79 m, 平均厚度 1.08 m, 平均品位 0.359%。这两个矿体的铀储量占整个川北砂岩铀矿总和的 45.2%。

## 4 样品采集与分析方法

为了研究含矿主岩的岩石学特征和其中铀的赋存状态, 在研究区东部的 301 范家山铀矿床和与其西邻的 128 桅杆树和 50 黑滩铀矿点取样, 样品采自坑道口露头或坑道内部  $\gamma$  强度最强的铀矿体部位(图 3, 表 1)。选择经化学分析铀含量较高的样品进行铀矿石硅酸盐岩化学分析和光谱分析, 在此基础上进行扫描电镜和电子探针分析(表 1)。铀矿石硅酸盐岩化学分析由西南冶金地质测试中心完成, 测试仪器为 DY938 X 射线光谱仪。标本及镜下鉴定、扫描电镜和电子探针分析均由核工业北京地质研究院地质矿产研究所完成, 测试仪器为 COXEM-EM 系列台式扫描电镜和 JXA-8100 电子探针分析仪。

## 5 含矿主岩岩石学特征

### 5.1 矿物成分

岩石薄片鉴定表明含矿岩石为钙质胶结中—细粒砂岩, 以细粒砂岩为主, 其中碎屑成分占 75%~90%, 胶结物占 10%~25%(图 4a)。矿物碎屑占碎屑总量的 60%~70%, 以石英为主, 其次为长石和云母, 少量锆石、褐帘石、电气石等重矿物碎屑(图 4b~g); 岩屑含量占碎屑总量的 30%~40%, 成分以变质岩为主, 包括石英片岩、绢云母石英片岩及绢云母片岩等, 其次为酸性火山岩(图 4h、i)。胶结

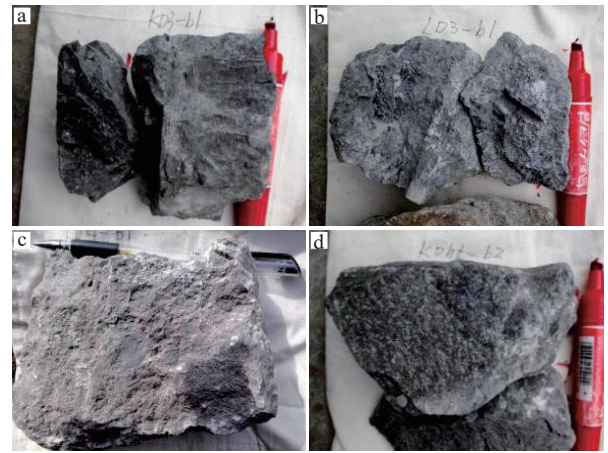


图 3 典型样品照片

a—含黄铁矿和碳化植物碎屑钙质胶结细砂岩(301 范家山铀矿床, KD3-b1); b—含钙质结核的钙质胶结细砂岩(128 桅杆树铀矿点, LD3-b1); c—含钙质团块的钙质胶结细砂岩, 岩石弱氧化, 有较多氧化物斑点(128 桅杆树铀矿点, LD4-b1); d—钙质胶结中粒砂岩(50 黑滩铀矿点, KDht-b2)

Fig.3 Photos of typical samples

a—Calcareous cementation fine sandstone containing pyrite and clastic carbonized plant (301 Fanjiashan uranium deposit, KD3-b1); b—Calcareous cementation fine sandstone with calcareous concretion (128 Weiganshu uranium ore occurrence, LD3-b1); c—Calcareous cementation fine sandstone with calcareous lump, rocks is weakly oxidized with more oxide spots (128 Weiganshu uranium ore occurrence, LD4-b1); d—Calcareous cementation medium grained sandstone (50 Heitan uranium ore occurrence, KDht-b2)

表 1 样品采取位置及分析鉴定

Table 1 Sampling position and analysis identification

样品编号	采样位置	铀含量/%	铀矿石品级	分析类型
KD3-b1	301 铀矿床坑道KD-3坑口铀矿体露头	1.400	富矿石	电子探针、扫描电镜
LD3-b1	128 铀矿点坑道KD-2坑口铀矿体露头	0.091	贫矿石	—
LD4-b1	128 铀矿点坑道KD-3坑口铀矿体露头	0.286	普通矿石	电子探针
KDht-b2	50 铀矿点坑道KD-1铀矿体	0.522	富矿石	电子探针、扫描电镜

注: 铀矿石品级, 富矿石 $\geq 0.3\%$ ; 普通矿石 $0.1\% \sim 0.3\%$ ; 贫矿石 $< 0.1\%$ 。

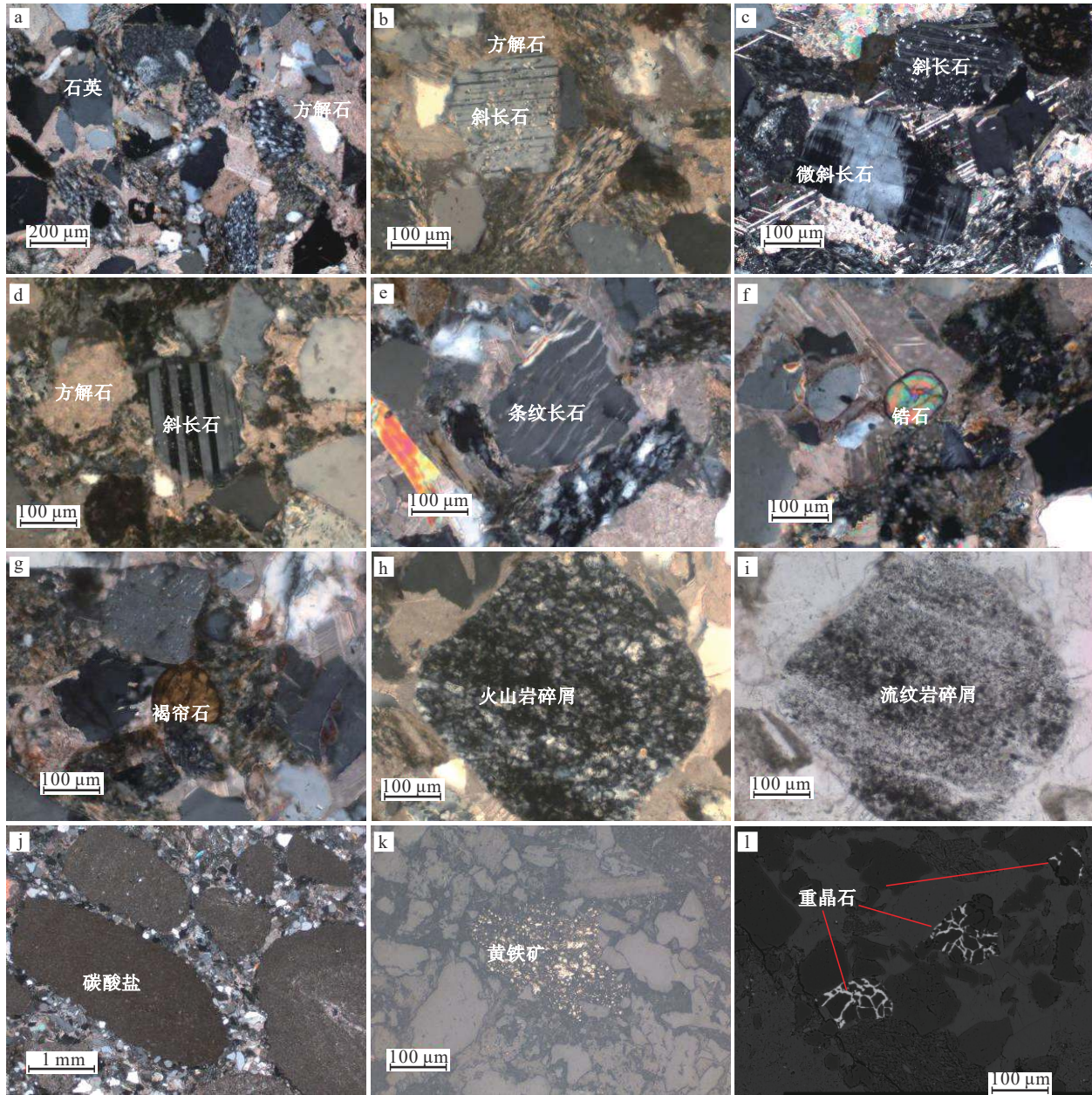


图 4 铀矿石偏光显微镜和电子探针图

a—钙质胶结中粒砂岩,碎屑以石英及岩屑为主,被方解石呈孔隙式-基底式胶结(KDht-b2);b—钙质胶结中细粒砂岩,斜长石碎屑具聚片双晶及弱水云母化,其右下角为石英绢云母片岩(KD3-b2-2);c—具格子双晶的微斜长石碎屑,其上为具聚片双晶的斜长石碎屑(KDht-b2);d—斜长石碎屑,具聚片双晶(KD3-b2);e—显微条纹长石碎屑,其中较亮的为钠长石条带(LD3-b1);f—锆石碎屑,磨圆较好(LD4-b1);g—电气石碎屑(LD4-b1);h—具霏细结构的火山岩碎屑(KD3-b2);i—具流动构造的流纹岩碎屑(KD3-b2);j—岩石中含许多碳酸盐矿物细粒集合体团块,多呈球形或椭球形,为钙质结核,钙质结核之间为钙质胶结的细砂岩(LD3-b1);k—黄铁矿细粒集合体团块(KD3-b1);l—网脉状的重晶石交代石英(LD3-b1)

Fig.4 Polarizing microscope and electron probe image of uranium ore

a—Calcareous cementation medium grained sandstone, the clastics are mainly quartz and lithic fragments, and cemented by calcite in porous-basal type (KDht-b2); b—Calcareous cementation medium-fine-grained sandstone, clastic plagioclase with polysynthetic twin and weak hydromicization, and the lower right corner is quartz sericite schist (KD3-b2-2); c—Clastic microcline with tartan twinning, on which is clastic plagioclase with polysynthetic twin (KDht-b2); d—Clastic plagioclase with polysynthetic twin (KD3-b2); e—Microscopic clastic perthite, in which the brighter is albite strip (LD3-b1); f—Clastic zircon, better roundness (LD4-b1); g—Clastic tourmaline (LD4-b1); h—Volcanic rock clastics with felsitic texture (KD3-b2); i—Rhyolite clastics with flow structure (KD3-b2); j—Rocks contain many fine-grained aggregates of carbonate minerals, mostly spherical or ellipsoidal, with calcareous cementation, and fine sandstone with calcareous cementation between calcareous concretion (LD3-b1); k—Fine-grained aggregates of pyrite (KD3-b1); l—Reticulate barite metasomatic quartz (LD3-b1)

物主要为方解石, 少量黄铁矿(图 4a、b、d、k)。

扫描电镜和电子探针分析显示(表 2, 图 4I, 图 5, 图 6, 图 7)含铀岩石中矿物碎屑主要为石英, 胶结物主要为方解石, 其次为绿泥石, 少量黄铁矿、褐铁矿、锐钛矿、钛铁矿和重晶石, 含微量方铅矿、铀石和沥青铀矿。黄铁矿是铀矿床中最重要的金属矿物, 主要分布在方解石胶结物中, 按其形态分为结晶状、胶状和莓状 3 种。结晶状黄铁矿以细粒集合体团块产出(图 4k)。莓状黄铁矿系生物成因, 每个球粒均由中心体和囊体组成, 中心体的每一个细胞充填着一个“小鱼籽”, 形成莓状结构, 囊体是生物外壳, 包裹着中心体, 形成同心圆状结构(图 5d)。

50 铀矿点铀矿石元素能谱面扫描图像中, Fe、Mg 两种元素分布于视域中下部(图 6f、g), 该区域有较强的 O 和较弱的 Si 元素分布(图 6d、e), 推断该矿物为绿泥石。U 元素的分布范围(图 6c)与 Fe、Mg 两种元素的分布范围高度吻合, 均分布于石英和方解石粒间, 可见铀矿物与绿泥石均为岩石蚀变产物, 与方解石同时或稍晚生成。这一结论与前

人研究结果一致(潘春蓉等, 2020), 即绿泥石呈极为细小的鳞片状、玫瑰花状, 与黄铁矿、铀石、沥青铀矿共生, 特富矿石中的绿泥石含少量 U。

301 铀矿床铀矿石能谱面扫描图像中, 锐钛矿呈锥状、柱状嵌布于石英中, 应为含钛矿物, 如钛铁矿的蚀变产物, 而非陆源沉积的碎屑矿物(Bonnetti et al., 2015; 钟军等, 2016)。粒状铀石在石英碎屑和方解石、有机碳、黄铁矿胶结物粒间呈星点状和团块状分布, 可见铀矿物的形成与方解石、有机碳和黄铁矿关系密切(图 7)。

### 5.2 结构和胶结类型

含铀砂岩具碎屑结构, 碎屑颗粒多呈次棱角状, 少数呈次圆状, 分选中等, 粒度以细粒为主, 其次是中粒。胶结物有以下 6 种结构:

(1) 晶粒结构。方解石胶结物呈颗粒大小不等的结晶粒状(图 4b、c、d), 晶粒粒度有 7 种, 微晶(0.01~0.05 mm)到巨晶(>2.0 mm)都有晶出; 黄铁矿细粒集合体呈团块状(图 4k); 沥青铀矿呈不规则粒状(图 5a); 铀石呈他形粒状、半自形到自形柱状

表 2 铀矿石扫描电镜能谱分析结果 (%)

Table 2 Scanning electron microscopy energy spectrum analysis results of uranium ore (%)

编号	测点	U	O	Si	Al	Ti	C	Fe	Ca	Na	K	Mg	N	P	S	Pb	Tc	总计	矿物名称
b2-1	1		5.39	1.16			5.79								8.7	76.9	2.06	100.00	方铅矿
	2	72.52	16.42	6.55	1.3		1.88		1.33									100.00	沥青铀矿
b2-2	1		5.78	1.58			3.05								9.98	77.78	1.83	100.00	方铅矿
	2	61.24	24.22	8.46	1.86		1.77		1.72				0.72					99.99	铀石
KDht-b2	1		46.61	4.34	2.61	39.47	1.9	2.43	0.65			2.01						100.02	钛铁矿
	2	74.76	17.46	4.38	0.7		1.05		1.31				0.34					100.00	沥青铀矿
	3		54.99	43.22			1.79											100.00	石英
	4		36.14				1.85		62.01									100.00	方解石
b2-4	线扫描	21.21	42.09	20.61	2.35	4.63	1.31	2.77	2.95			2.07						99.99	铀石
b2-	26	25.62	43.03	9.29	2.27		13.02	1.68	2.27	1.82		1.01						100.01	铀石
COXEM-11	27微区	19.63	38.10	12.36	4.85		14.85	5.09	1.80	0.70		2.61						99.99	铀石
b1-1	1	52.18	29.13	9.84	2.53		1.85	1.04	0.99		0.93	0.61	0.51	0.39				100.00	铀石
	2		48.27	0.69			2.33		47.29						1.41			99.99	方解石
	3		54.92	40.61			4.46											99.99	石英
	4	47.57	31.13	7.67	4.19		2.03	3.47	0.88			2.77	0.29					100.00	铀石 黄铁矿
b1-2	1		14.87	2.24	1		4.77	35.37	0.89						40.86			100.00	(部分褐铁矿化)
	1		43.12			53.74	2.72											99.58	锐钛矿
b1-3	2		53.53	43.41			3.06											100.00	石英
	3		9.39				4.93	36.83							48.85			100.00	黄铁矿
b2-5	4		41.89				2.71		55.4									100.00	方解石
	5	69.97	21.61	5.79	0.93		1.24						0.46					100.00	铀石
b2-5	b1-3的面扫描	3.91	49.07	21.56	3.09	6.37	3.03	2.99	7.56					2.41				99.99	

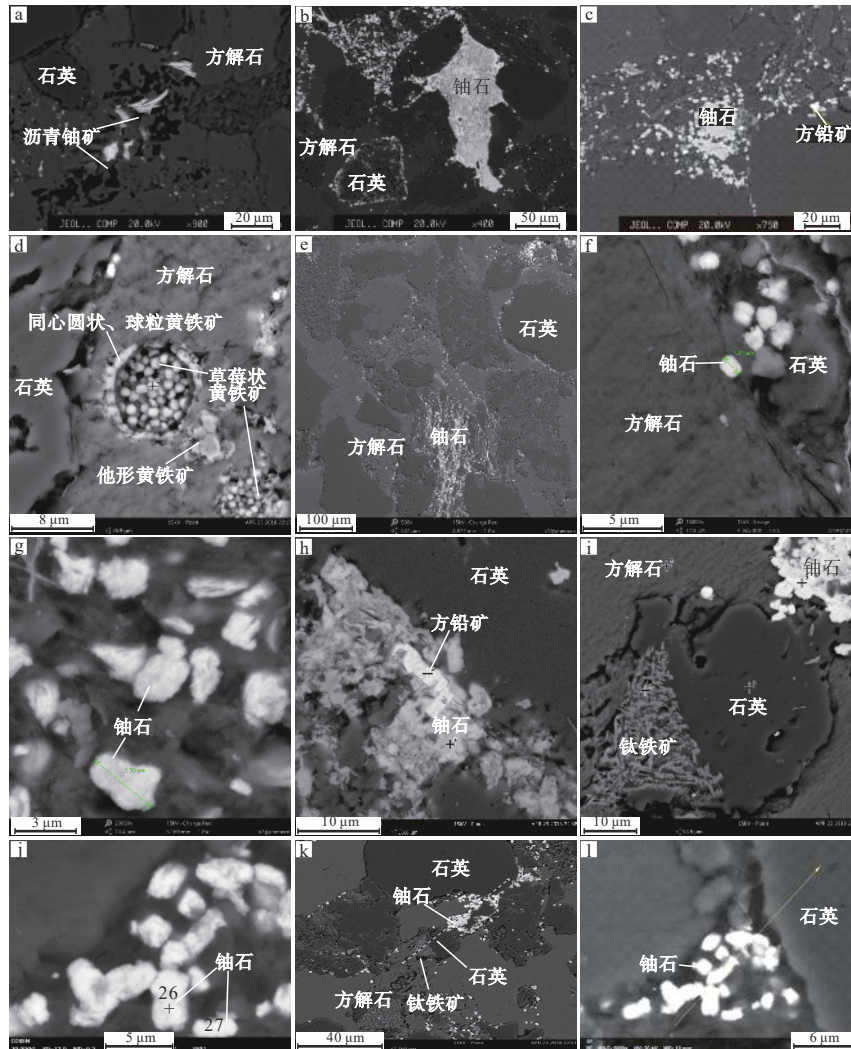


图5 铀矿石电子探针和扫描电镜图

a—亮的部分均为沥青铀矿(LD4-b1-1, 电子探针背散射图像); b—铀石位于石英和方解石粒间(KD3-b1-3, 电子探针背散射图像); c—铀石位于粒间(KDht-b2-1, 电子探针背散射图像); d—草莓状黄铁矿被方解石散布和包裹(KD3-b1-2, 二次电子图像); e—粒状铀石位于石英和方解石粒间, 且分布不均匀(KD3-b1, 二次电子图像); f—短柱状铀石位于石英和方解石粒间, 测得铀石粒径 1.31  $\mu\text{m}$ (KD3-b1, 二次电子图像); g—铀石呈他形到半自形柱状, 测得最大粒径 3.39  $\mu\text{m}$ (KDht-b2, 二次电子图像); h—他形半自形的铀石和立方体状的方铅矿位于石英粒间(KDht-b2-2, 二次电子图像); i—自形柱状铀石和网状钛铁矿位于石英边缘方解石胶结物中(KDht-b2-3, 二次电子图像); j—铀石呈自形柱状(KDht-b2-COXEM-6, 电子探针背散射图像); k—胶结物为方解石, 能谱线扫描从左到右的矿物为钛铁矿、石英、铀石和石英(KDht-b2-4, 二次电子图像); l—能谱线扫描从左到右的矿物为铀石和石英, 铀石为自形柱状(KDht-b2-COXEM-11, 二次电子图像); “+”和数字表示测点位置及编号, 数据见表2和表4

Fig.5 Electronic probe and scanning electron microscope image of uranium ore

a-The bright parts are pitchblende (LD4-b1-1, back-scattered image of electron probe); b-Coffinite is located between the quartz and calcite grains (KD3-b1-3, back-scattered image of electron probe); c-Coffinite is located between grains (KDht-b2-1, back-scattered image of electron probe); d-Strawberry pyrite embedded and wrapped by calcite (KD3-b1-2, secondary electron image); e-Ranular coffinite is distributed unevenly between quartz and calcite grains (KD3-b1, secondary electron image); f-Short columnar coffinite is located between quartz and calcite grains with a particle size of 1.31  $\mu\text{m}$  (KD3-b1, secondary electron image); g-Coffinite is in the shape of xenomorphic-hypidiomorphic columnar with a maximum particle size of 3.39  $\mu\text{m}$  (KDht-b2, secondary electron image); h-Xenomorphic-hypidiomorphic coffinite and cubic galena are located between the quartz grains (KDht-b2-2, secondary electron image); i-Euhedral columnar coffinite and reticular ilmenite are located in the calcite cement at the edge of quartz (KDht-b2-3, secondary electron image); j-Coffinite is euhedral columnar (KDht-b2-COXEM-6, back-scattered image of electron probe); k-The cement is calcite, and the minerals from left to right are ilmenite, quartz, coffinite and quartz by energy spectral line scanning (KDht-b2-4, secondary electron image); l-The minerals from left to right in the energy spectrum line scan are coffinite and quartz, and coffinite is euhedral columnar (KDht-b2-COXEM-11, secondary electron image); “+” and the number indicate the location of the measuring point and number, the data are shown in Table 2 and Table 4



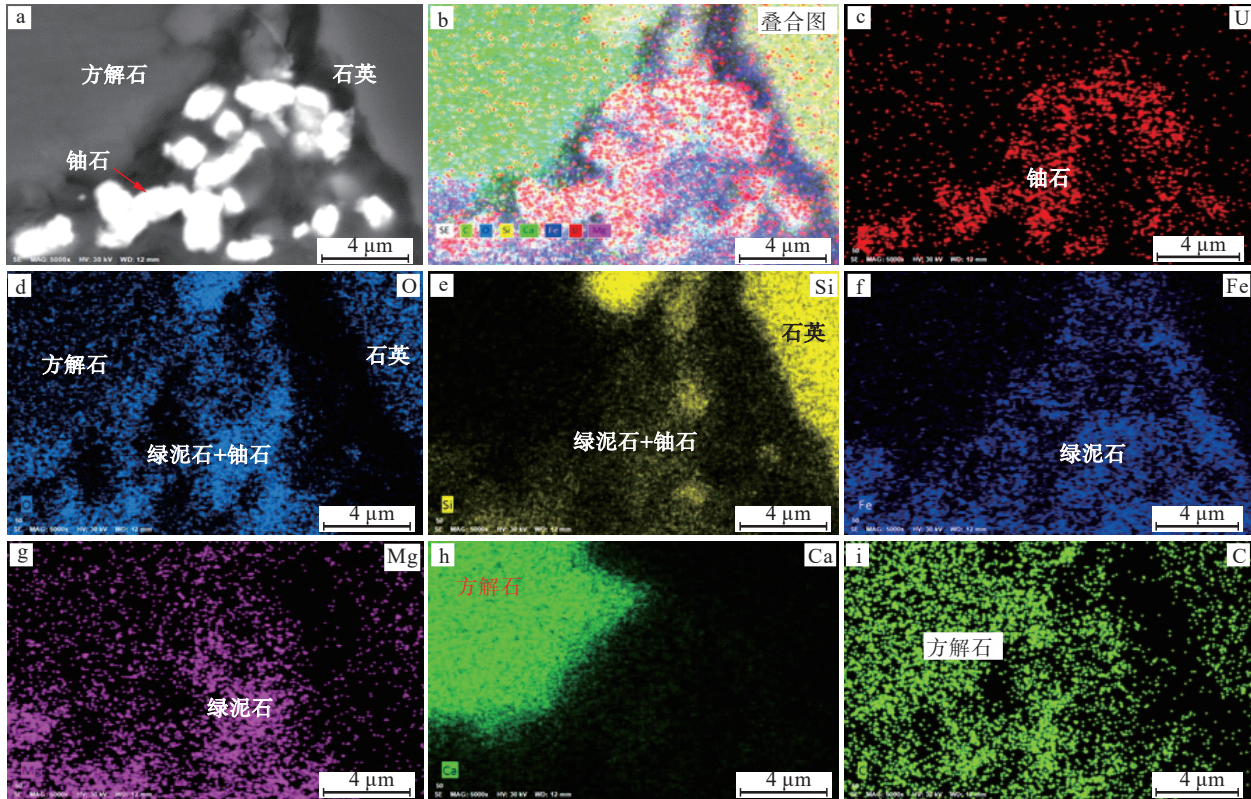


图 6 50 铀矿点铀矿石能谱面扫描图

a-i—自形柱状铀石位于方解石和石英粒间, 铀石粒间为铁镁硅酸盐矿物绿泥石和少量方解石充填; a—KDht—b2—COXEM-11, 二次电子图像; b—U—O—Si—Fe—Mg—Ca—C 元素叠合图; c—i—分别为 U、O、Si、Fe、Mg、Ca、C 元素能谱面扫描图

Fig.6 Scanning image of uranium ore energy spectrum surface of 50 uranium ore occurrence

a-i—Euhedral columnar coffinite is located between calcite and quartz grains, coffinite grains are filled with iron-magnesium silicate mineral chlorite and a small amount of calcite; a—KDht—b2—COXEM-11, secondary electron image; b—U—O—Si—Fe—Mg—Ca—C elements superposition diagram, c—i—Scanning images of the energy spectrum surface of U, O, Si, Fe, Mg, Ca, and C elements, respectively

(图 5b、c、e-1); 他形半自形的铀石和立方体状的方铅矿位于石英粒间(图 5h, 图 6)。

(2) 嵌晶胶结结构。胶结物重结晶成粗大颗粒, 中间镶嵌着许多碎屑, 在中晶(0.25~0.5 mm)以上的方解石中常见, 为典型的后生阶段产物; 莓状黄铁矿集合体被方解石嵌布和包裹(图 5d), 莓状黄铁矿是成岩阶段的特征形成物(刘宝珺, 1980)。

(3) 薄膜或带状、丛生胶结结构。胶结物围绕碎屑呈薄膜状或呈纤维状垂直碎屑颗粒表面生长, 如绿泥石、水云母常呈这种结构, 多形成于成岩期。

(4) 交代结构。斜长石、条纹长石被方解石交代(图 4b、d、e); 斜长石被水云母交代(图 4b); 重晶石交代石英(图 4I)。交代结构形成于后生阶段早期。

(5) 次生加大结构。石英、长石碎屑边缘具次生加大石英和长石, 大多是后生期成因。

(6) 胶状结构。黄铁矿呈胶状产出(图 7a), 为微晶颗粒的黄铁矿, 为成岩早期阶段产物。

碎屑被方解石呈孔隙—基底式胶结, 以基底式胶结为主。铀矿石胶结物主要为方解石, 根据铀矿规范, 铀矿石工业类型为富含碳酸盐的含铀碎屑岩型矿石。

### 5.3 化学成分

硅酸盐分析结果显示, 含铀岩石化学成分主要是  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 其余成分含量相对较低(表 3)。结合前人资料, 含铀岩石中  $\text{CaO}$  与  $\text{SiO}_2$  具此消彼长的关系, 含铀岩石中  $\text{CaO}$  较围岩高,  $\text{SiO}_2$  较围岩低, 这与含铀岩石的成岩后生变化相一致。含铀岩石中方解石胶结物强烈交代了石英、长石等碎屑, 结果使含铀岩石中  $\text{SiO}_2$  减少,  $\text{CaO}$  增加。含铀岩石的烧失量较围岩高。本区影响烧失量的主要因素是无机碳、有机碳、微量 S、Se 等易

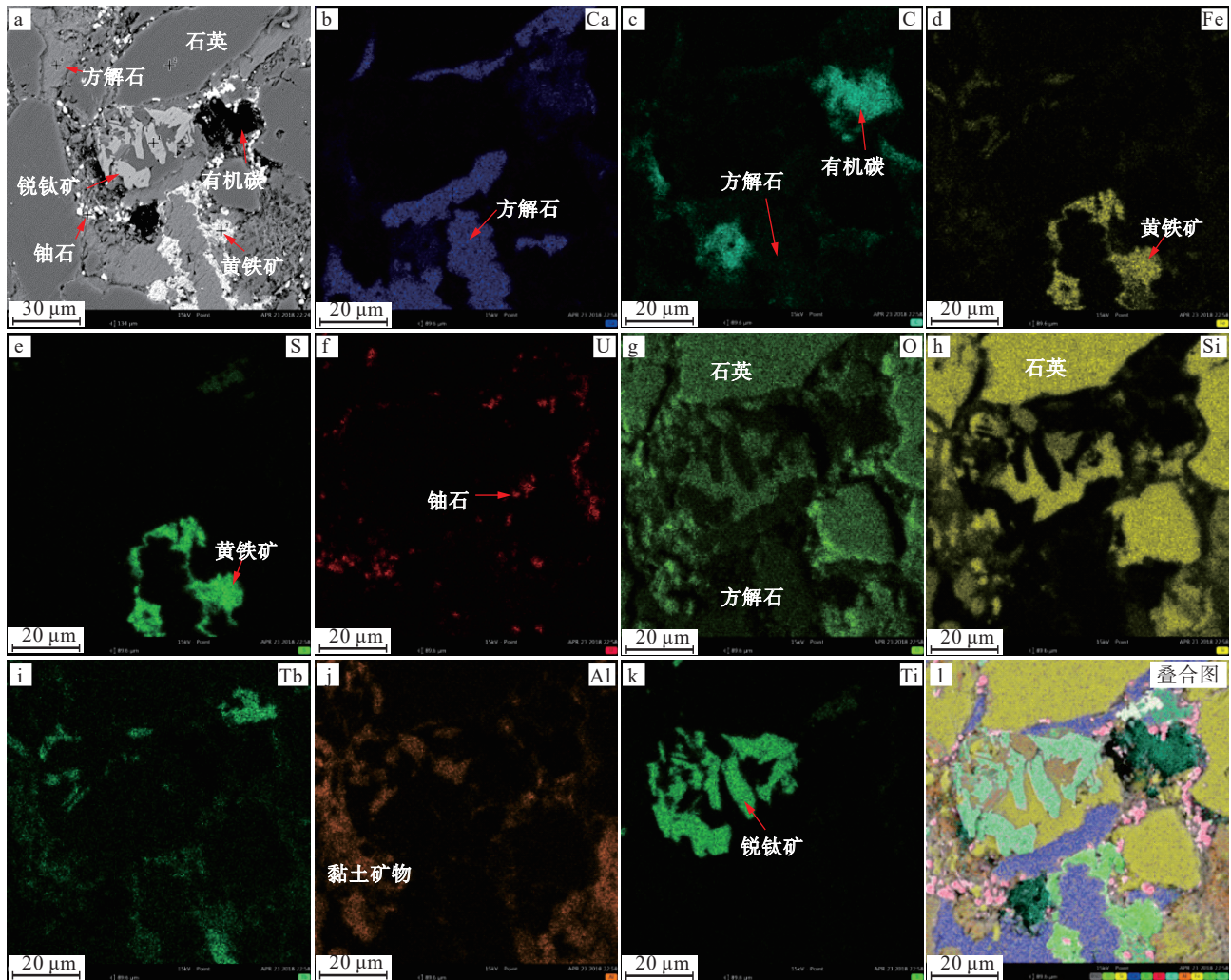


图 7 301 铀矿床铀矿石能谱面扫描图

a—KD3-b1-3, 二次电子图像; b—k—分别为 Ca、C、Fe、S、U、O、Si、Tb、Al、Ti 元素能谱面扫描图; l—Ca—C—Fe—S—U—O—Si—Tb—Al—Ti 元素叠合图

Fig.7 Scanning image of uranium ore energy spectrum surface of 301 uranium deposit

a—KD3-b1-3, secondary electron image; b—k—Scanning images of the energy spectrum surface of Ca, C, Fe, S, U, O, Si, Tb, Al and Ti elements respectively; l—Ca—C—Fe—S—U—O—Si—Tb—Al—Ti elements superposition diagram

挥发组分, 矿化段方解石和有机碳等比围岩多, 因此其烧失量比围岩大。铀矿石光谱分析结果表明, 矿石中 V、Nb、Mo、Se 均达到了铀矿床共(伴)生组分综合评价参考指标要求。

#### 5.4 铀的存在形式

电子探针分析结果表明(表 4), 在 8 个铀矿物中  $UO_2$  的含量为 57.52%~72.57%, 平均 65.06%, 其他主要组分为  $SiO_2$ , 平均含量 14.54%, 其余组分含量较少或甚微。扫描电镜分析结果与其相同(表 2), U 含量为 19.63%~74.76%, 平均 53.66%, 其他主要组分是 O 和 Si, 分别占 27.57% 和 7.99%, 含

少量的 C、Fe、Al、Ti、Ca、Mg、Na 和微量的 P、N。总体上, 铀矿物中铀的平均含量接近铀石值, 结合矿物产出特征, 可以确定铀矿物主要为铀石, 个别铀测量值较高的可能为沥青铀矿。

电子探针和扫描电镜图像(图 5, 图 6, 图 7)显示铀矿石中铀以自生铀矿物的形式存在, 未发现其他存在形式的铀。铀矿物以铀石为主, 少量沥青铀矿。铀石呈他形、半自形和自形柱状, 测得粒径最大者 3.39  $\mu m$ 。U 元素的分布范围与 Fe、Mg 元素的分布范围高度吻合, 主要分布于石英和方解石粒间。相应的铀石在石英碎屑和方解石、有机碳、黄

表 3 含铀砂岩硅酸盐分析结果 (%)

Table 3 Silicate analysis results of uranium-bearing sandstone (%)

样号	LD2-b1	KD1-b2	铀异常岩石平均	LD3-b1	LD4-b1	KDht-b1	KDht-b2	KD3-b1	铀矿石平均
SiO <sub>2</sub>	46.85	62.36	54.605	42.82	47.18	62.67	55.71	53.78	52.43
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.52	9.61	9.065	5.95	6.81	10.15	7.65	8.11	7.73
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.37	1.81	1.59	0.935	0.879	1.56	0.871	1.5	1.15
TFe	2.01	2.83	2.42	1.45	1.53	3.2	2	2.94	2.22
FeO	1.36	2.02	1.69	1.03	1.18	2.71	1.79	2.44	1.83
CaO	18.25	7.98	13.115	23.58	20.18	6.85	14.37	11.08	15.21
MgO	1.91	2.11	2.01	1.43	1.47	2.82	1.46	1.64	1.76
K <sub>2</sub> O	1.89	1.66	1.775	1.06	1.23	1.76	1.27	1.35	1.33
Na <sub>2</sub> O	1.06	1.7	1.38	1.2	1.23	1.66	1.57	1.41	1.41
TiO <sub>2</sub>	0.507	0.639	0.573	0.344	0.463	0.597	0.498	0.44	0.47
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.102	0.12	0.111	0.077	0.113	0.116	0.176	0.108	0.12
MnO	0.16	0.088	0.124	0.129	0.127	0.067	0.121	0.141	0.12
灼失	17.24	8.9	13.07	20.74	17.93	7.84	12.74	13.64	14.58
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	2.72	2.66	2.69	1.98	2.06	3.14	2.42	3.1	2.54
总和	103.95	104.49	104.218	102.73	102.38	105.14	102.65	101.68	102.91
铀含量	0.018	0.021	0.01945	0.091	0.286	0.303	0.522	1.400	
矿石品级				贫矿石	普通矿石	富矿石	富矿石	富矿石	

表 4 铀矿物电子探针分析结果 (%)

Table 4 Electron probe analysis results of uranium minerals (%)

样品编号	LD4-b1			KD3-b1			KDht-b2		
测点	1	2	1	2	3	1	2	3	
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	/	/	0.15	/	/	/	/	/	
SiO <sub>2</sub>	/	11.78	15.68	13.12	13.43	16.64	13.86	17.27	
FeO	/	/	0.68	0.65	0.46	0.39	0.34	0.57	
UO <sub>2</sub>	57.52	58.32	66.71	69.26	60.52	67.94	72.57	67.6	
MgO	0.03	0.08	0.39	0.08	0.08	0.05	0.03	0.08	
Na <sub>2</sub> O	0.1	/	/	0.07	/	0.07	/	/	
TiO <sub>2</sub>	/	/	/	0.49	0.31	0.62	/	0.28	
K <sub>2</sub> O	0.57	0.19	0.33	0.14	0.19	0.24	0.25	0.23	
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	/	0.34	0.06	0.06	/	/	0.07	0.04	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	/	0.06	1.39	0.55	0.95	0.78	0.3	0.93	
MnO	/	/	/	/	0.08	0.18	/	0.26	
ThO <sub>2</sub>	/	/	/	/	/	/	/	/	
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.15	0.18	/	/	0.11	0.1	/	/	
CaO	10.4	14.49	0.59	1.03	1.18	1.21	0.84	1.72	
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5	/	0.37	/	/	/	/	/	
SO <sub>3</sub>	/	/	0.05	/	0.06	/	0.08	/	
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	/	/	0.44	0.47	0.18	0.18	0.48	0.18	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	/	0.45	0.94	1.24	0.91	1.63	0.97	1.34	
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	/	/	/	/	0.29	/	/	0.22	
PbO	/	/	0.31	0.1	10	/	0.41	/	
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	/	/	0.07	/	/	/	0.21	0.11	
SnO <sub>2</sub>	/	/	/	/	/	/	/	/	
ZrO <sub>2</sub>	/	/	0.17	0.1	0.06	/	0.16	0.03	
总量	84.27	85.89	88.33	87.36	88.81	90.03	90.57	90.86	
矿物	铀石	铀石	铀石	铀石	铀石	铀石	沥青铀矿	铀石	

注：“/”表示元素含量低于检测限，未检出。

铁矿胶结物粒间呈星点状和团块状分布,有时与绿泥石、方铅矿和钛铁矿伴生,表明铀矿物为岩石蚀变产物,与方解石同时或稍晚生成。可见铀矿物的形成与方解石、绿泥石、有机碳和黄铁矿关系密切。

## 6 铀成矿环境分析

### 6.1 铀源环境

前人研究成果表明<sup>③</sup>,苍溪组沉积时期研究区

西部主要受龙门山北段物源控制,东部主要受米仓山物源控制。碎屑岩中岩屑类型与源区母岩性质密切相关,通过分析碎屑岩中岩屑组合可以得到与母岩和物源方向相关的信息(叶素娟等,2014)。根据薄片分析资料,研究区东部含铀中、细粒砂岩岩屑成分以变质岩为主,其次为酸性火山岩(如具霏细结构的火山岩碎屑和具流动构造的流纹岩碎屑),指示含铀砂岩岩屑母岩为分布于盆地北缘米仓山地区的元古界变质岩和酸性火山岩,尤其是下震旦统铁船山组变质流纹岩,不仅含铀底数较区内其他地层高,而且该地区已发现的火山岩型铀矿点主要产于该地层中。因此可以推断,铁船山组变质酸性火山岩以及分布于该地层内的铀矿点为研究区砂岩型铀矿的形成提供了铀源。含铀岩石中长石碎屑占碎屑总量的2%~5%,长石类型有斜长石、微斜长石和条纹长石等。长石碎屑主要来自花岗岩和花岗片麻岩(曾允孚和夏文杰,1986)。盆地北部米仓山地区铁船山等地分布有与火山岩型铀矿化关系密切的碱性花岗岩,盆地砂岩中的长石碎屑,特别是微斜长石、条纹长石等钾长石碎屑应来自这些

碱性花岗岩体。碱性花岗岩含铀底数较高,其内部已发现有花岗岩型铀矿点,也可以为砂岩铀矿提供铀源。

铀矿石显微研究表明,米仓山酸性火山岩和花岗岩富含锆石、独居石和褐帘石等富铀矿物(图4g,图8)。岩石中含有锆石、钛铁矿、电气石等重矿物碎屑,而锆石作为示踪矿物指示碎屑物质主要来自米仓山物源区的花岗岩和流纹岩。在流纹岩和花岗岩中铀主要存在于锆石、独居石和褐帘石等富铀矿物和黑云母、角闪石、石英、斜长石等造岩矿物中。这些富铀矿物和含铀较高的造岩矿物不仅为米仓山东段地区火山岩和花岗岩型热液铀矿化提供了铀源,而且为盆地砂岩型铀矿化提供了部分铀源。

以上追溯母岩分析表明,组成砂岩物质成分的酸性火山岩岩屑、长石碎屑和锆石碎屑均来自盆地北缘的米仓山铁船山组变质酸性火山岩和碱性花岗岩。因此,米仓山铁船山组变质酸性火山岩、碱性花岗岩和产于其中的众多铀矿点是研究区砂岩铀矿的铀源。

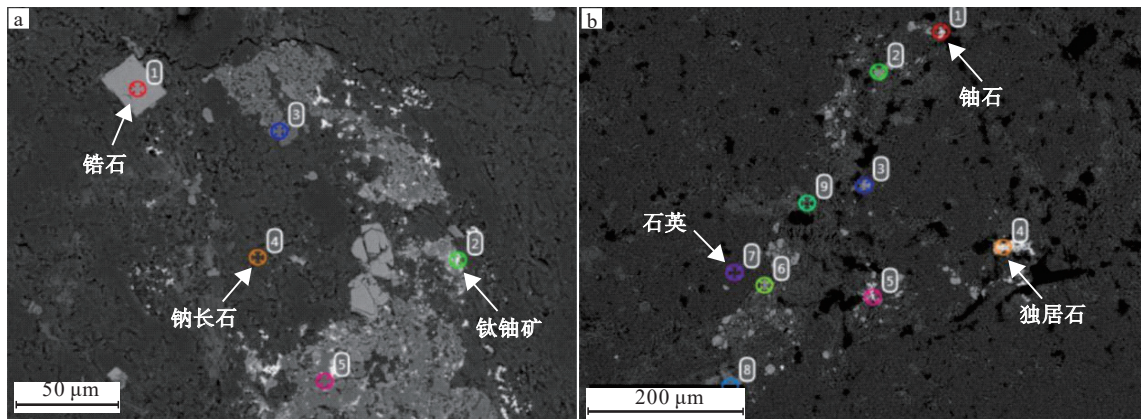


图8 米仓山含铀火山岩扫描电镜图像

a—硅化碎裂蚀变流纹岩,造岩矿物是钠长石,金属矿物主要是锐钛矿,少量锆石和钛铀矿,钛铀矿呈星散状分布于锐钛矿内部和周围,锆石呈自形长方形分布于钠长石粒间;图a:①—锆石;②—钛铀矿;③、⑤—锐钛矿;④—钠长石;b—硅化碎裂蚀变流纹岩;造岩矿物主要是石英,少量绢云母,金属矿物主要是锐钛矿和铁氧化物,少量独居石和铀石,铀石呈星点状分布于石英粒间,与铁氧化物伴生;图b:①—铀石;②、③—铁氧化物;④、⑤—独居石;⑥—铁氧化物(含有钴可能为磁铁矿);⑦—石英;⑧—锐钛矿;⑨—绢云母;“+”和数字表示测点位置及编号

Fig.8 Scanning electron microscopic image of uranium-bearing volcanic rock in Micangshan

a—Silicified cataclastic altered rhyolite, rock-forming mineral is albite, metallic minerals are mainly anatase with a small amount of zircon and brannerite, brannerite is scattered in and around anatase, zircons are distributed among the albite grains in a euhedral rectangular shape; Fig.a: ①—Zircon; ②—Brannerite; ③, ⑤—Anatase; ④—Albite; b—Silicified cataclastic altered rhyolite, rock-forming minerals are mainly quartz with a small amount of sericite, metallic minerals are mainly anatase and iron oxides with a small amount of monazite and coffinite, coffinite is distributed among the quartz grains in the form of star or dot, coexisting with iron oxide; Fig.b: ①—Coffinite; ②, ③—Iron oxide; ④, ⑤—Monazite; ⑥—Iron oxide (containing cobalt may be magnetite); ⑦—Quartz; ⑧—Anatase; ⑨—Sericite; “+” and the position number indicate the location of measuring point and number

## 6.2 沉积古地理环境

据姚根顺等(2006)研究,晚侏罗世盆地总体转换为相对单一的 NE 向“西坳东抬”型前陆格局,研究区所在区域为滨浅湖相沉积。白垩纪—古近纪盆地基本继承晚侏罗世 NE 向前陆“西坳东抬”的地形地势特点,但沉降与沉积中心进一步“西移”与“南移”。早白垩世沉降中心位于万源—广元一带,由 4~5 套砾岩、砂岩、泥岩组成正韵律层序,以发育山麓冲积扇及辫状河相沉积体系为主,研究区为河流—三角洲平原相沉积(朱西养等,2004)。一般砂岩铀矿含矿主岩为成熟度低、粒度较粗、磨圆度较高、分选差、铁质钙质泥质胶结、含炭质较多的灰绿—黄绿色长石砂岩、长石石英砂岩夹粉砂岩和泥岩,砂岩与泥岩厚度比为 1:1~4:1,砂岩单层厚度一般 15~25 m,产状平缓( $<5^{\circ}$ )(杨若利和孙群力,1985)。本区早白垩世苍溪组容矿地层岩性为紫红色泥岩、粉砂质泥岩与浅灰色、紫红色夹灰黑色、灰绿色岩屑砂岩和砾岩互层,含炭质较多,砂岩与泥岩厚度比为 3:1~5:1,地层倾角  $6^{\circ}$ ~ $15^{\circ}$ ,砂岩粒度以细粒为主,中粒次之,磨圆度和分选性均较高,钙质胶结,厚度在 15~25 m 时铀矿体大而厚,苍溪组地层时代和岩性均有利于砂岩型铀矿床的形成。晚白垩世沉降中心已迁移至龙门山中、南段前缘,沉积范围也随之迁移至川西南地区。对比四川省区域地质志晚侏罗世蓬莱镇期、早白垩世早期至晚白垩世岩相古地理图可以看出,四川盆地这一时期的沉积中心自盆地北东部开始,逐渐向南西部的川西坳陷南段退缩,早白垩世早期研究区主河流的流动方向由 NE 向 SW 方向流动(图 9)。研究区内铀矿床点的平面分布表明,产于早白垩世早期苍溪组和白龙组中的铀矿床和主要铀矿点,自 4210、301(范家山)、303(花台寺)铀矿床,到 128、50、6051 等铀矿点,均呈 NE-SW 向带状分布于从通江松溪(4210 铀矿床),经南江北极(301、303 铀矿床),到阆中思依(6051 等铀矿点)的古河道中(图 2,图 9)。北东向褶皱和断裂使白垩纪主河道呈北东向展布,北西向断褶带使山前古支流呈北西向相间展布,在两个方向主、支流交汇部位形成了古河道型铀矿体,如花台寺(303)和范家山(301)铀矿床。其中 303 铀矿床是区内最大的砂岩型铀矿床,规模达到了中型。该铀矿床矿体呈 NE-SW 向带状展布

与地层走向基本一致,也与矿区铀矿化展布方向和古河道的展布范围相吻合(图 9)。

研究早白垩世沉积相类型和古河流流向对于选择找矿靶区和布置勘查工程具有重要的指导意义。统计表明,一般辫状河体系及辫状河三角洲沉积体系其砂体规模适中,铀的聚集成矿概率较高(吴柏林等,2017)。如鄂尔多斯盆地北部铀矿化受辫状河道控制,矿体主要聚集于直罗组下段下亚段辫状河体系和辫状河三角洲体系中(吴仁贵等,2002);吐哈盆地十红滩铀矿床几乎所有的矿体和储量均赋存于水西沟群西山窑组辫状河体系和辫状河三角洲体系及灰色沉积建造中(吴柏林和徐高中,2004);二连盆地马尼特坳陷西部具有工业价值的铀矿体大部分产于赛汉组上段,主要含矿层赛汉组上段以辫状河及浅水型辫状河三角洲发育为主(鲁超等,2013)。可见研究区苍溪组辫状河—三角洲沉积体系对铀成矿有利。

## 6.3 铀的迁移环境

沉积岩石学表明长石碎屑的含量受到气候、地壳运动的强度和母岩性质的影响。如果地壳运动比较强烈造成地形起伏很大,而且气候干燥不利于化学分解,这时剥蚀、搬运和堆积作用都很迅速,长石得以大量保存且较为新鲜。本区含铀砂岩矿物

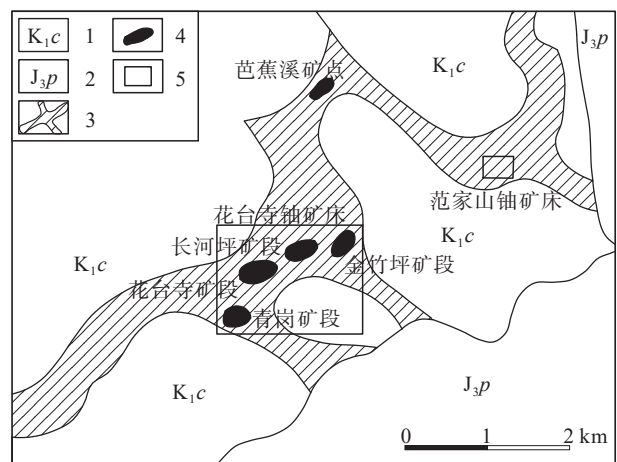


图 9 白垩纪古河道控矿示意图

1—苍溪组; 2—蓬莱镇组; 3—苍溪组古河道; 4—铀矿点(段); 5—铀矿床

Fig.9 Schematic diagram of ancient channel ore control in Cretaceous

1—Cangxi Formation; 2—Penglaizhen Formation; 3—Ancient channel of Cangxi period; 4—Uranium ore occurrence (block); 5—Uranium deposit

碎屑中含有较多的长石碎屑,表明苍溪组沉积时期地壳运动强烈,地形起伏大,利于更多的含铀碎屑向沉积盆地搬运,而且干燥气候利于铀的迁移和后生富集(张祖还等, 1984)。中国中生代干旱、半干旱气候主要出现在3个时期:早中三叠世,中晚侏罗世至古近纪晚期,更新世潮湿期之后直到现代(吴柏林等, 2017),因此,早白垩世的干旱、半干旱气候环境有利于铀的迁移和后期砂岩型铀矿的形成。

## 6.4 铀的沉淀聚集环境

### 6.4.1 氧化还原环境

砂岩型铀矿主要存在于红色地层中的灰色岩石中,灰—红色的交互层为找矿标志。本区苍溪组砂岩颜色可分为两类,一类是红色,包括紫红、紫灰、灰紫、棕灰等色,另一类是灰色,包括灰、灰绿、深灰、灰黑等颜色。苍溪组中绝大多数铀矿化赋存于灰色层中,个别铀矿化赋存于灰—红色的交互层中。含铀岩石的灰色及黑色是由于含有机质(碳质、沥青质)或分散状矿化铁(黄铁矿、白铁矿)(Berner and Westrich, 1985; Wilkin et al., 1996),这些物质含量越高颜色越深(图 3b, 图 4k)。碳质代表沼泽环境,硫化铁与停滞水的还原环境有关;岩石的红色、紫红色、褐红色是岩石中含有铁的氧化物(赤铁矿、褐铁矿)染色的结果,表示沉积时为氧化环境(Goswami et al., 2019; Jin et al., 2020)。矿床中胶状黄铁矿、莓状黄铁矿、方铅矿、白硒铁矿等与铀石和沥青铀矿紧密共生,标志着成矿时较强的还原环境(Qidwa and Jensen, 1979)。铀石为含  $U^{4+}$  的硅酸盐,在砂岩型矿床中常与沥青铀矿共同产出于强还原环境中,与黄铁矿、有机质共生,是强还原环境的产物(赵凤民等, 1988)。此外,与铀矿物伴生的金属矿物还有铁钒矿、黑铁钒矿和硒铅矿,它们均代表还原环境(Wilkin et al., 1996)。这些表明成矿流体在运移过程中遇到碳质或黄铁矿发育的沼泽和停滞水的还原环境,铀元素发生沉淀并富集成矿。

### 6.4.2 区域构造背景

长期较稳定的地台区对铀的后生富集有利,有利于成矿的局部构造是位于古老褶皱基底之上被一系列断层复杂化且具缓倾斜产状的沉积盖层(Watson et al., 1987; Li et al., 2012)。本区处于扬子准地台西北缘,盆地北部基底由元古界火地亚群

(Pt)、上震旦统—中志留统( $Z_2-S_2$ )和下二叠统—中三叠统( $P_1-T_2$ )3个构造层组成,沉积盖层为上三叠统—下白垩统( $T_3-K_1$ )陆相红色碎屑岩。中国砂岩型铀矿中,矿体厚度较大的地段其岩层倾角多在  $7^\circ\sim 14^\circ$ ,本区苍溪组地层倾角在  $6^\circ\sim 15^\circ$ ,因而区域构造背景对砂岩型铀矿的形成有利。

含铀主岩的断裂破碎带、层间破碎带以及岩层产状或古河道流向急剧改变的地段也经常形成铀矿化(Xiao et al., 2020)。晚白垩世开始的燕山晚期—喜马拉雅期构造运动使四川盆地进入了沉积盖层的断裂活动和剥蚀改造阶段,受北西部 NE 向龙门山构造和北东部 NW 向米仓山—大巴山构造

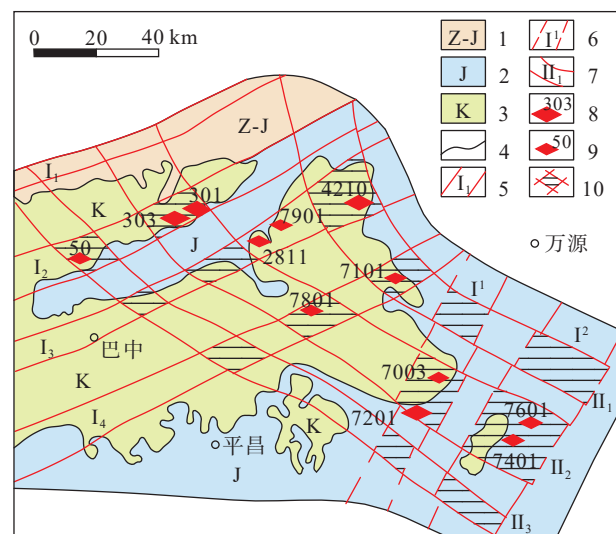


图 10 四川盆地东北部断裂构造分布及构造控矿示意图(据陶卫中, 1989 修改)

1—震旦系—侏罗系; 2—侏罗系; 3—白垩系; 4—地质界线; 5—NE 向断裂带及编号; 6—NNE 向断裂带及编号; 7—NW 向断裂带及编号; 8—铀矿床位置及编号; 9—铀矿点位置及编号; 10—远景区;  $I_1$ —龙门山断裂带;  $I_2$ —苍溪—下两断裂带;  $I_3$ —三台—巴中断裂带;  $I_4$ —南部—通江断裂带;  $I_1^1$ 、 $I_2^2$ —华蓥山断裂带;  $II_1$ —长坪—大沙断褶带;  $II_2$ —涪阳—河口断褶带;  $II_3$ —下两—石板店断褶带

Fig. 10 Schematic diagram of faults tectonic distribution and tectonic ore control in northeastern Sichuan basin (modified from Tao Weizhong, 1989)

1—Sinian-Jurassic; 2—Jurassic; 3—Cretaceous; 4—Geological boundary; 5—NE trending fault zone and number; 6—NNE trending fault zone and number; 7—NW trending fault zone and number; 8—Location and number of uranium deposits; 9—Location and number of uranium ore occurrence; 10—Prospective area;  $I_1$ —Longmenshan fault zone;  $I_2$ —Cangxi—Xialiang fault zone;  $I_3$ —Santai—Bazhong fault zone;  $I_4$ —Nanbu—Tongjiang fault zone;  $I_1^1$ 、 $I_2^2$ —Huayingshan fault zone;  $II_1$ —Changping—Dasha fault fold belt;  $II_2$ —Fuyang—Hekou fault fold belt;  $II_3$ —Xialiang—Shibandian fault fold belt

的影响, 盆内东北地区形成了一系列 NE、NW 和 NEE 向的平行断裂带(图 10)(陶卫中, 1989; 沈传波等, 2007)。NE—NNE 向基底断裂带主要由 4 条走向 NE、倾向 NW 或 SE 的蒲江—巴中逆断裂带(图 10 中 I<sub>1</sub>~I<sub>4</sub>)和两条 NNE 向的华蓥山断裂带(图 10 中 I<sub>1</sub>~I<sub>2</sub>)组成, NW 向断裂带主要为自北东向南西分布的大巴山弧形构造体系外弧褶皱带的 3 个断褶带(图 10 中 II<sub>1</sub>~II<sub>3</sub>), 各带内发育数条 NW 向的逆断层。区域内的铀矿床均位于两组不同方向断裂带的交汇处, 如 NE 向与 NW 向断裂交汇处的 303 铀矿床。由于构造活动沉积盖层发育了丰富的断裂带, 导通了外部水体和砂、砾岩层的水力联系, 为含矿流体在高渗透性的砂、砾岩层及其层间裂隙中的运移提供了通道, 为铀元素的沉淀聚集创造了有利的水动力和构造条件。

## 7 铀成矿作用探讨

### 7.1 风化作用中铀的释放迁移

米仓山物源区的铁船山组变质酸性火山岩和碱性花岗岩等含铀较高的岩石, 由于物理风化作用而发生裂隙和机械破碎。碎屑颗粒由于长距离的流水搬运粒度逐渐变小。随着岩石的破坏和碎屑颗粒的变小, 存在于锆石、独居石、褐帘石等富铀矿物和黑云母、石英、斜长石等造岩矿物中的铀被分离和释放出来, 部分被水带走形成含矿流体。

区域水文地质资料显示蓬莱镇组和苍溪组基岩裂隙水水质类型均为 HCO<sub>3</sub>-Ca 型。303 铀矿床地下水化学成分分析结果显示, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>浓度(10<sup>-3.92</sup> mol/L)>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>浓度(10<sup>-4.31</sup> mol/L), 地下水实测 pH 值范围为 7.8~8.8。铀在弱碱性介质中易与碳酸根生成十分稳定的络离子(张祖还等, 1984), 且本区含矿主岩的胶结物主要为方解石, 表明铀以碳酸合铀酰离子 UO(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub><sup>4-</sup>的形式存在和迁移。

### 7.2 沉积作用中铀的沉淀富集

沉积演化的同生作用阶段是沉积物转变最早的阶段。该阶段是在开放的体系中进行的, 沉积物可与底层水发生作用, 介质条件一般为酸性氧化性质, 故该阶段无铀矿物的生成。

成岩作用阶段是沉积物在被埋藏以后到固结为坚硬岩石以前所发生的变化。成岩期主要作用是本层物质的迁移、重新分配组合, 很少或无外来

物质参加, 在低温低压碱性还原条件下进行。厌氧细菌分解硫酸盐释放出 H<sub>2</sub>S, 形成黄铁矿(Lovley and Phillips, 1992; Lovley, 1993)。莓状黄铁矿是成岩阶段的特征矿物。U 元素与 Fe、Mg 元素在石英和方解石粒间分布吻合意味着铀矿物与绿泥石为同期产物, 与方解石同时或稍晚生成。绿泥石呈极为细小的鳞片状、玫瑰花状, 与黄铁矿、铀石、沥青铀矿共生。莓状黄铁矿主要分布于方解石胶结物中, 而粒状铀石以星点状和团块状分布于胶结物粒间。这些表明砂、砾岩层及其层间裂隙中运移的含矿流体在还原环境中破坏了碳酸合铀酰离子, 使铀元素发生大量沉淀富集, 并且与黄铁矿和绿泥石共生, 形成胶状结构和薄膜或带状、丛生胶结结构。

后生作用阶段是沉积物在固结为坚硬的岩石以后至变质作用以前在埋藏较深处所发生的变化, 其发生与较高的温度、压力以及外来物质的加入有关。构造活动使沉积盖层发育了丰富的 NE、NW 和 NEE 向断裂带导通了外部水体和砂、砾岩层的水力联系, 为盆地内含矿流体在高渗透性的砂、砾岩层及其层间裂隙中的运移提供了良好的通道。运移至此的含矿流体在碱性还原条件下碳酸合铀酰离子得以破坏发生沉淀富集, 形成的自生矿物分布不受原生构造层理的控制, 既可穿过层理也可穿过层面, 这与前人研究结果一致(郭宁和孙泽轩, 2017)。矿体野外观察和伽玛测量也表明在沿地层厚度方向上(垂向上), 铀矿化主要分布于垂向裂隙发育的两种不同岩性(泥岩和砂岩、泥岩和砾岩、砂岩和砾岩)接触处的层间破碎带及其两侧围岩中, 在层间破碎带中铀矿化最强, 向两侧围岩铀矿化强度迅速降低; 在沿地层走向或倾斜方向上(平面上), 随着裂隙发育程度向两侧减弱, 铀矿化强度也随之减弱。因此无论垂向上还是平面上, 矿体均呈透镜状或不规则状产出, 表现出后生穿层的性质。方解石胶结物结晶颗粒可达巨晶, 主要是由于后生作用阶段较高的温压和较长的作用时间形成了较粗大的矿物晶体。自生矿物多具重结晶结构、嵌晶胶结结构、交代结构和次生加大结构, 为典型的后生作用特征。如胶结物中间镶嵌着许多碎屑; 莓状黄铁矿集合体被方解石嵌布和包裹; 斜长石、条纹长石被方解石交代; 重晶石交代石英; 石英、长石碎屑边缘具次生加大石英和长石。含铀岩石化

学成分分析显示  $\text{SiO}_2$  较围岩低,  $\text{CaO}$  较围岩高, 主要是由于后生作用阶段含铀岩石中方解石胶结物强烈交代了石英、长石等碎屑, 结果使含铀岩石中  $\text{SiO}_2$  减少,  $\text{CaO}$  增加, 表明含矿主岩的后生富集作用成因。综上所述, 该区砂岩型铀矿是以沉积成岩作用为主, 后生叠加为辅沉淀富集成矿。

## 8 结 论

(1) 研究区含矿主岩主要为下白垩统苍溪组第一、第八韵律层下部浅色层钙质胶结中、细粒砂岩和砾岩。苍溪组为有利于铀矿体生成的辫状河-三角洲平原相沉积。

(2) 含铀岩石中含有酸性火山岩岩屑和锆石等矿物碎屑, 指示米仓山铁船山组变质酸性火山岩和花岗岩为盆地砂岩型铀矿的形成提供了初始铀源; 岩石中含有大量长石矿物碎屑, 指示早白垩世的干旱、半干旱气候环境有利于铀的迁移; 岩石中含有大量碳质和黄铁矿, 指示沼泽和停滞水的还原环境。

(3) 铀矿石中铀以自生铀矿物的形式存在, 铀矿物主要为铀石, 少量沥青铀矿。铀石呈他形、半自形和自形柱状。

(4) 铀矿物与方解石、绿泥石、有机质和黄铁矿密切共生。铀矿石胶结物主要为方解石, 指示铀在水溶液中以碳酸合铀酰离子的形式迁移; 在富含有机质和黄铁矿的沼泽和停滞水还原环境中, 还原作用破坏了碳酸合铀酰离子使铀以沉积成岩为主局部叠加后生富集作用成矿。

### 注释

①四川省核工业地质局二八二大队. 2018. 川东北铀、石墨远景调查报告 [R].

②核工业部西南地勘局二八〇研究所. 1985. 新华向斜南翼东段铀矿化特征及形成条件 [R].

③四川省核工业地质局二八二大队. 1981. 三〇二地区铀矿普查区域评价报告 [R].

### References

Berner R A, Westrich J T. 1985. Bioturbation and the early diagenesis of carbon and sulfur[J]. *American Journal of Science*, 285: 3(3): 193-206.

Bonnetti C, Cuney M, Michels R, Truche L, Malartre F, Liu X D, Yang J X. 2015. The multiple roles of sulfate-reducing bacteria and

Fe-Ti oxides in the genesis of the Bayinwula roll front-type uranium deposit, Erlian Basin, NE China[J]. *Economic Geology*, 110(4): 1059-1081.

Cai Yuqi, Zhang Jindai, Guo Qingyin, 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).

Goswami S, Upadhyay P K, Saravanan B, Natarajan V, Verma M B. 2019. Two types of uranium mineralization in Gulcheru quartzite: Fracture-controlled in Ambakapalle area and litho-controlled in Tummalapalle area, Cuddapah Basin, Andhra Pradesh, India[J]. *China Geology*, 2(2): 142-156.

Guo Ning, Sun Zexuan. 2017. Types and prospecting direction of sandstone-type uranium deposits in the northern margin of the Sichuan Basin[J]. *Geology and Exploration*, 53(1): 54-62 (in Chinese with English abstract).

Jin R S, Feng X X, Teng X M, Nie F J, Cao H Y, Hou H Q, Liu H X, Miao P S, Zhao H L, Chen L L, Zhu Q, Zhou X X. 2020. Genesis of green sandstone/mudstone from Middle Jurassic Zhiluo Formation in the Dongsheng Uranium Orefield, Ordos Basin and its enlightenment for uranium mineralization[J]. *China Geology*, 3(1): 52-66.

Li D P, Chen Y L, Wang Z, Lin Y, Zhou J. 2012. Paleozoic sedimentary record of the Xing Meng Orogenic Belt, Inner Mongolia: Implications for the provenances and tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Chinese Science Bulletin*, 57: 776-785.

Liu Baojun. 1980. *Sedimentary Petrology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 60-65 (in Chinese).

Lovley D R. 1993. Dissimilatory metal reduction[J]. *Annual Review of Microbiology*, 47(3): 263-290.

Lovley D R, Phillips E J. 1992. Reduction of uranium by *Desulfovibrio desulfuricans*[J]. *Applied & Environment Microbiology*, 58(3): 850-856.

Lu Chao, Peng Yunbiao, Liu Xinyang, Jiao Yangquan, Yang Jianxin, Chen Fazheng, Shen Kefeng, Li Ronglin. 2013. Sedimentary backgrounds of sandstone-type uranium deposits in western Manite Depression of Erlian Basin[J]. *Uranium Geology*, 29(6): 336-343 (in Chinese with English abstract).

Pan Chunrong, Mou Ping, Zhong Fujun, Huang Guangwen, Li haidong, Pan Jiayong. 2020. Genesis of chlorite in the Huangsha uranium deposit, middle part of Nanling Mountains and its relationship with uranium mineralization[J]. *Geology in China*, 47(2): 348-361 (in Chinese with English abstract).

Qidwa H A, Jensen M L. 1979. Methodology and exploration for sandstone-type uranium deposits[J]. *Mineralium Deposita*, 14(2): 137-152.

Shen Chuanbo, Mei Lianfu, Xu Zhenping, Tang Jiguang. 2007. Architecture and tectonic evolution of composite basin-mountain system in Sichuan Basin and its adjacent areas[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 31(3): 288-299 (in Chinese with English abstract).



- Tao Weizhong. 1989. Control of faulted structure over the sandstone-type uranium deposit in the northeastern part of Sichuan Province[J]. *Uranium Geology*, 5(2): 86–94 (in Chinese with English abstract).
- Watson M P, Hayward A B, Parkinson D N, Zhang Z M. 1987. Plate tectonic history, basin development and petroleum source rock deposition onshore China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 4(3): 205–225.
- Wilkin R T, Barnes H L, Brantley S L. 1996. The size distribution of framboidal pyrite in modern modern sediments: An indicator of redox conditions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(20): 3897–3912.
- Wu Bailin, Sun Bin, Cheng Xianghu, Zhang Wanying, Liu Mingyi, Hao Xin, Liu Chiyang. 2017. Study and prospect for sedimentology of uranium deposit[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(5): 1044–1053 (in Chinese with English abstract).
- Wu Bolin, Xu Gaozhong. 2004. Evolution feature of palaeoclimate and significance of sequence stratigraphy in Suixigou Group in the southwest edge of Turpan–Ham Basin[J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 27(2): 135–140 (in Chinese with English abstract).
- Wu Rengui, Zhu Minqiang, Yu Dagan, Chen Anping. 2002. Analyses of depositional system and studies on metallogenic condition of basal-channel sandstone uranium deposit[J]. *Mineral Deposits*, 21(Z1): 878–880 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Z H, Xiong S B, Li C H, Liu Y, Yang Z D, Feng X X, Liu X W. 2020. Types of uranium deposits in central Zhuguang Mountains in Hunan Province, South China and their metallogenic regularity and prospecting directions[J]. *China Geology*, 3(3): 411–424.
- Yang Ruoli, Sun Qunli. 1985. *Uranium Deposit*[M]. Nanchang: East China Institute of Geology Press (in Chinese).
- Yao Genshun, Li Dacheng, Lu Wenzhong, Xu Zhengyu. 2006. Characters of coupling between Mesozoic sedimentary basin and orogenic belt in Sichuan overlain basin and its adjacent area[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 30(4): 435–444 (in Chinese with English abstract).
- Ye Sujuan, Li Rong, Zhang Zhuang. 2014. Provenance analysis and depositional system of the Upper Jurassic Penglaizhen Formation in the middle part of western Sichuan, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(5): 930–940 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Yunfu, Xia Wenjie. 1986. *Sedimentary Petrology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 94–95 (in Chinese).
- Zhang Zuhuan, Zhao Yiyang, Zhang Bangtong, Shen Weizhou. 1984. *Uranium Geochemistry*[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 280–283 (in Chinese).
- Zhao Fengmin, Chen Zhangru, Zhang Jingyi, Wang Wenguang. 1988. *Uranium Mineral Identification Manual*[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 118–121 (in Chinese).
- Zhong Jun, Fan Honghai, Gu Dazhao, Wang Shengyun, Chen Jingui, Shi Changhao, Li Hengqiang. 2016. Major and trace element migration and metallogenic processes of the Xinshuijing U–Th deposit in the Longshoushan metallogenic belt, Gansu Province[J]. *Geology in China*, 43(4): 1393–1408 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiyang, Sun Zexuan, Chen Hongde, Hou Mingcai, Li Guoxin. 2004. Characteristics of sedimentary system and sandstone-type uranium mineralization in Longchuanjiang basin, western Yunnan [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology of Edition)*, 31(3): 267–272 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 蔡煜琦, 张金带, 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.
- 郭宁, 孙泽轩. 2017. 川北砂岩铀矿类型及找矿方向[J]. *地质与勘探*, 53(1): 54–62.
- 刘宝珺. 1980. *沉积岩石学*[M]. 北京: 地质出版社, 60–65.
- 鲁超, 彭云彪, 刘鑫扬, 焦养泉, 杨建新, 陈法正, 申科峰, 李荣林. 2013. 二连盆地马尼特拗陷西部砂岩型铀矿成矿的沉积学背景[J]. *铀矿地质*, 29(6): 336–343.
- 潘春蓉, 牟平, 钟福军, 黄广文, 李海东, 潘家永. 2020. 南岭中段黄砂铀矿区绿泥石成因及其与铀成矿关系[J]. *中国地质*, 47(2): 348–361.
- 沈传波, 梅廉夫, 徐振平, 汤济广. 2007. 四川盆地复合盆山体系的构造构造和演化[J]. *大地构造与成矿学*, 31(3): 288–299.
- 陶卫中. 1989. 川东北地区断裂构造对砂岩型铀矿床的控制作用[J]. *铀矿地质*, 5(2): 86–94.
- 吴柏林, 孙斌, 程相虎, 张婉莹, 刘明义, 郝欣, 刘池洋. 2017. 铀矿沉积学研究与发展[J]. *沉积学报*, 35(5): 1044–1053.
- 吴伯林, 徐高中. 2004. 吐哈盆地西南缘水西沟群古气候演变特征及其层序地层学意义[J]. *东华理工学院学报(自然科学版)*, 27(2): 135–140.
- 吴仁贵, 祝民强, 余达淦, 陈安平. 2002. 沉积体系分析与底河道型砂岩铀矿成矿条件讨论: 以鄂尔多斯中生代盆地北部东胜地区为例[J]. *矿床地质*, 21(Z1): 878–880.
- 杨若利, 孙群力. 1985. *铀矿床学*[M]. 南昌: 华东地质学院出版社.
- 姚根顺, 李大成, 卢文忠, 徐政语. 2006. 四川叠合盆地盆山耦合特征分析[J]. *大地构造与成矿学*, 30(4): 435–444.
- 叶素娟, 李嵘, 张庄. 2014. 川西拗陷中段上侏罗统蓬莱镇组物源及沉积体系研究[J]. *沉积学报*, 32(5): 930–940.
- 曾允孚, 夏文杰. 1986. *沉积岩石学*[M]. 北京: 地质出版社, 94–95.
- 张祖还, 赵懿英, 章邦桐, 沈渭洲. 1984. *铀地球化学*[M]. 北京: 原子能出版社, 280–283.
- 赵凤民, 陈章如, 张静宜, 王文广. 1988. *铀矿物鉴定手册*[M]. 北京: 原子能出版社, 118–121.
- 钟军, 范洪海, 顾大钊, 王生云, 陈金勇, 史长昊, 李恒强. 2016. 甘肃龙首山成矿带新水井铀(钍)矿床元素迁移规律及成矿作用过程研究[J]. *中国地质*, 43(4): 1393–1408.
- 朱西养, 孙泽轩, 陈洪德, 侯明才, 李国新. 2004. 滇西龙川江盆地沉积体系特征及与砂岩铀矿成矿[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 31(3): 267–272.