

开鲁盆地砂岩型铀矿中黄铁矿与铀矿化成因关系探讨

陈梦雅¹⁾, 聂逢君^{1)*}, Mostafa FAYEK²⁾

1) 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西南昌 330013;

2) 曼尼托巴大学地质科学系, 加拿大温尼伯 MB R3T 2N2

摘 要: 开鲁盆地位于松辽盆地西南部, 是中国北方砂岩型铀矿勘查的重点地区, 自钱家店铀矿床发现以来, 盆地内上白垩统姚家组目的层中相继发现了一些具有工业价值的铀矿床。为查明该层位中黄铁矿成因及其形成机制, 探讨其与铀矿化之间的关系, 本研究对含矿层砂岩中黄铁矿与铀矿物矿物学特征、黄铁矿 S 同位素开展细致研究。研究表明: (1) 开鲁盆地姚家组砂岩中铀主要以独立铀矿物及吸附铀形式存在, 独立铀矿物以沥青铀矿为主, 含少量的钛铀矿及部分铀石, 多数沿黄铁矿周边生长。吸附态的铀与黏土矿物密切相关。(2) 姚家组砂岩中黄铁矿主要以草莓状、胶状及粒状产出, 多与沥青铀矿共生, 其中黄铁矿 S 同位素 ($d^{34}\text{S} = -55.6\text{‰} \sim 23.2\text{‰}$), 平均值 -20.87‰ , 变化范围很大, 说明硫的分馏程度较高, 硫的来源范围较广。(3) 分析表明黄铁矿具有细菌硫酸盐还原作用及热化学硫酸盐还原作用两种成因, 并探讨了这 2 种成因黄铁矿的形成机制。综合前人研究, 结合研究区成矿地质背景, 认为黄铁矿为铀成矿作用提供了发生还原反应所需要的还原剂, 且黄铁矿及铀矿物的形成与区内热流体存在紧密联系。

关键词: 姚家组; 黄铁矿; 硫同位素; 砂岩型铀矿; 开鲁盆地

中图分类号: P597.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2021.091702

Discussion of the Genetic Relationship between Pyrite and Uranium Mineralization in Sandstone-type Uranium Deposits in Kailu Basin

CHEN Meng-ya¹⁾, NIE Feng-jun^{1)*}, Mostafa FAYEK²⁾

1) State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013;

2) Department of Geological Sciences, University of Manitoba, Winnipeg, Canada MB R3T 2N2

Abstract: Kailu Basin is located in the southwest of Songliao Basin, which is the key area of sandstone type uranium exploration in northern China. Since the discovery of Qianjiadian uranium deposit, some uranium deposits with industrial value have been found in the target strata of Upper Cretaceous Yaojia formation in the basin. In order to find out the genesis and formation mechanism of pyrite in this layer, and to explore the relationship between pyrite and uranium mineralization, the mineralogical characteristics of pyrite, uranium minerals in sandstone of ore bearing layer, and S isotope of pyrite are studied in detail. The results show that: (1) Uranium in the sandstones of Yaojia formation in Kailu Basin mainly exists in the form of independent uranium minerals and adsorbed uranium. The independent uranium minerals are mainly pitchblende, containing a small amount of brannerite and some coffinite, most of which grow along the periphery of pyrite. The adsorbed uranium is closely related to clay minerals. (2) Pyrite in sandstones of Yaojia formation mainly occurs in framboid, colloidal and granular forms, and most of them are associated with pitchblende. The S isotope of pyrite ($d^{34}\text{S} = -55.6\text{‰} \sim 23.2\text{‰}$), with an average value of -20.87‰ , varies widely, indicating a high degree of sulfur

本文由国家自然科学基金项目(编号: U2067202; 41772068; 41562006)和国家重点基础研究发展规划 973 计划“中国北方砂岩型铀矿流体成矿过程研究”(编号: 2015CB453002)联合资助。

收稿日期: 2021-07-23; 改回日期: 2021-08-29; 网络首发日期: 2021-09-18。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 陈梦雅, 女, 1995 年生。博士研究生。主要从事砂岩型铀矿研究。通讯地址: 330013, 江西省南昌市青山湖区广兰大道 418 号东华理工大学。E-mail: 269797285@qq.com。

*通讯作者: 聂逢君, 男, 1962 年生。博士, 教授。主要从事沉积学、砂岩型铀矿研究。通讯地址: 330013, 江西省南昌市青山湖区广兰大道 418 号东华理工大学。E-mail: niefj@263.net。

fractionation and a wide range of sulfur sources. (3) The analysis shows that pyrite has two genesis: bacterial sulfate reduction and thermochemical sulfate reduction, and the formation mechanism of pyrite in these two genesis is discussed. Based on previous studies and combined with the metallogenic geological background of the study area, it is considered that pyrite provides the reducing agent for uranium mineralization, and the formation of pyrite and uranium minerals is closely related to the thermal fluid in the area.

Key words: Yaojia Formation; pyrite; sulfur isotope; sandstone type uranium deposit; Kailu Basin

黄铁矿是地壳中常见的硫化物之一,在砂岩型铀矿中黄铁矿常作为铀成矿作用过程中主要的还原剂,其形成过程贯穿了整个铀矿化过程(黄广文等, 2021)。研究黄铁矿的矿物学和地球化学特征, 对了解矿床的成矿流体运移具有重要意义(赵凤民和沈才卿, 1986; 邹明亮等, 2017; 张成勇等, 2021)。因此, 对黄铁矿的特征和成因进行研究, 有助于我们揭示成矿物质的来源和矿床成因, 为下一步找矿勘查提供指导作用。

开鲁盆地位于松辽盆地西南部, 是砂岩型铀矿勘查的重点地区。自 20 世纪 90 年代在盆地内发现了钱家店铀矿床以来, 正式拉开了开鲁盆地的铀矿勘查工作的帷幕。随着铀矿勘查工作的不断深入, 在盆地内上白垩统姚家组中发现了理想的铀赋矿目的层位和铀矿化, 显示出盆地良好的找矿前景。前人针对开鲁盆地的基底构造、沉积相、砂体构造、成矿规律、铀矿化特征、成矿机制及成矿年龄等做了大量的工作(朱筱敏等, 2000; 殷敬红等, 2000; 夏毓亮等, 2003; 张振强等, 2006; 蔡煜琦和李胜祥, 2008; 马汉峰等, 2009; 林锦荣等, 2009; 陈祖伊等, 2010; 罗毅等, 2012; 焦养泉等, 2018; 聂逢君等, 2021), 并取得了较为明显的成果和认识。但研究多侧重于矿石或区域构造的研究, 而对于成矿过程中与铀矿物伴生的矿物(如黄铁矿)研究较少。因此本文在总结前人研究的基础上, 对开鲁盆地钱家店—白兴吐铀矿床含矿层中铀矿物赋存形式以及黄铁矿中硫同位素进行研究, 初步探讨了黄铁矿的成因及其与铀矿化的关系, 为研究区下一步找矿工作提供理论依据。

1 研究区概况

1.1 区域地质背景

开鲁盆地位于松辽盆地的西南部, 是松辽盆地 7 个二级单元之一, 形状呈条带状(陈方鸿等, 2005), 是在海西地槽褶皱基底上发育起来的中生代断陷型沉积盆地(陈娟等, 2008; 唐克东等, 2011)。其内部可划分为 5 个二级构造单元: 西缘斜坡带、陆家堡拗陷、舍伯吐隆起、哲中拗陷、哲东南隆起(许坤和李瑜, 1995)(图 1a)。盆地基底主要为前寒武纪中深变质岩系和晚古生代浅变质岩系以及各时期的花岗岩组成。蚀源区为中生代火山岩、古生代变质岩及

海西期、燕山期花岗岩等(陈晓林等, 2008; 陈程等, 2018)。白垩系是该盆地的主要沉积盖层, 覆盖全区。下白垩统由义县组、九佛堂组、沙海组、阜新组组成; 上白垩统由泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组、四方台组及明水组组成。研究区位于钱家店凹陷北部(图 1b), 姚家组是该区主要的铀矿赋矿层位。

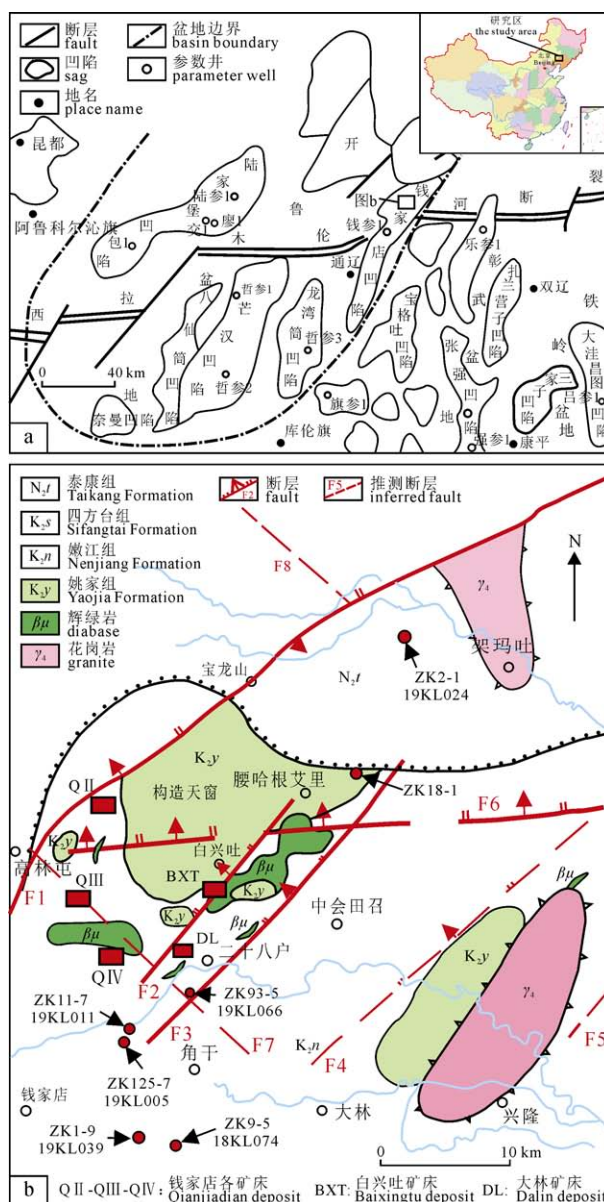


图 1 开鲁盆地构造图(a)及钱家店—白兴吐矿床平面地质图(b)(据聂逢君等, 2017)

Fig. 1 Regional structure map of Kailu Basin (a) and geological map of Qianjiadian–Baixingtu deposit in Kailu Basin (b) (modified after NIE, 2017)

1.2 矿床地质特征

姚家组在盆地内分布广泛,是研究区最主要的找矿层位。姚家组上覆地层为上白垩统嫩江组,岩性为灰色、灰黑色泥岩,局部夹薄层粉砂质泥岩;下伏地层为上白垩统青山口组,岩性为紫红色泥岩夹灰色细砂岩(郭福能, 2017)。这两层泥岩给姚家组提供了稳定的顶部和底部的隔水层,使姚家组具备了良好的泥-砂-泥结构,有利于含铀流体的运移和富集。

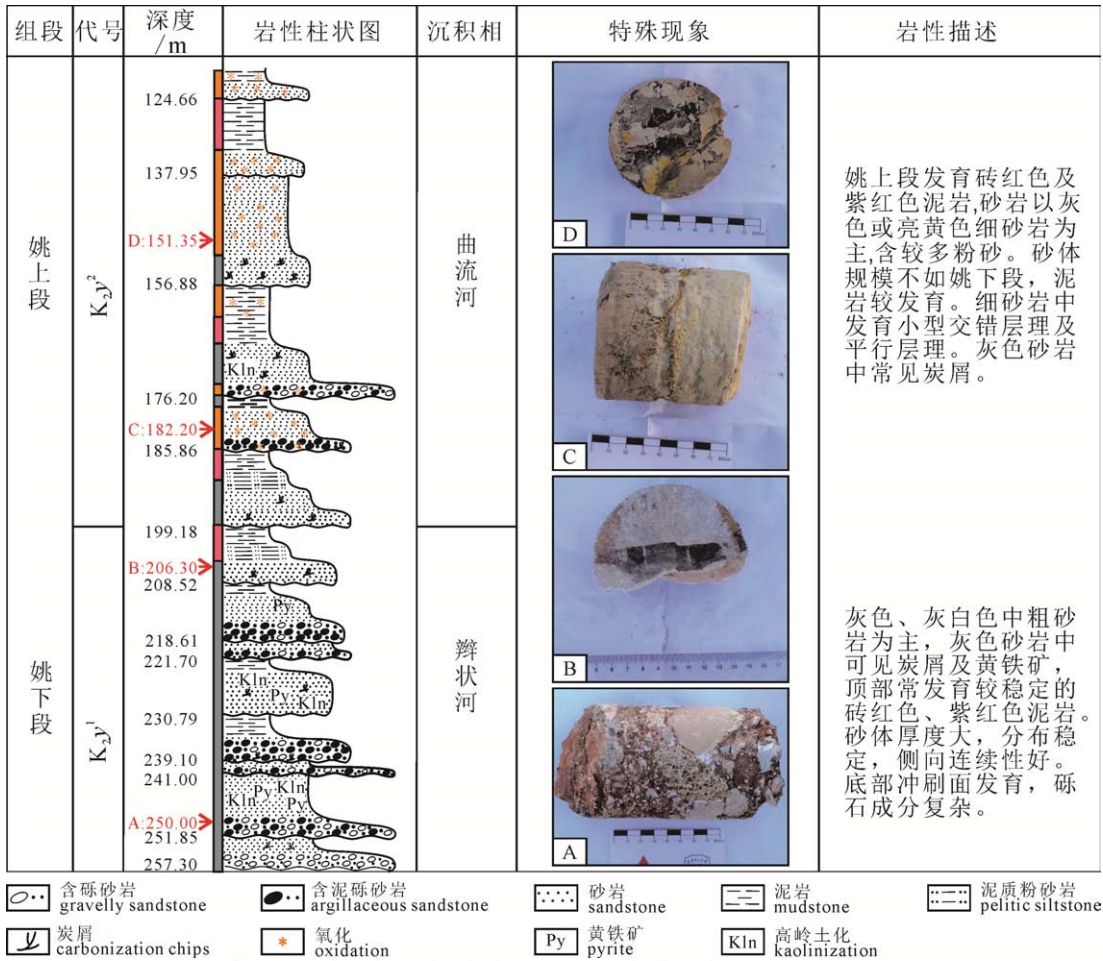
图 2 为研究区矿化孔 ZK18-1 含矿层段岩心描述。姚家组从沉积相可以分为姚上段及姚下段两段。姚下段砂体厚度大,分布较稳定,侧向连续性好,孔渗性好,以灰色、灰白色中粗砂岩为主,灰色砂岩中可见炭屑及黄铁矿,顶部发育较稳定的紫红色泥岩。综合分析认为,姚家组下段形成于辫状河环境,主要由滞留、心滩及少量的决口扇、落淤、洪泛平原微相组成。姚上段砂体不如姚下段厚大,岩性主要为灰白色或者亮黄色中细砂岩,含较多的粉

砂,细砂岩中发育小型交错层理,砂体也具有一定的规模,泥岩较发育,沉积微相主要为滞留、边滩、决口扇、洪泛平原,砂:泥接近或<1:1,为典型的曲流河环境沉积特征。勘探表明,盆地中砂岩型铀矿化主要发育在姚下段的粗粒心滩砂体中,姚上段曲流河砂体中也有少量的铀矿化。

2 岩相学特征

姚家组砂岩主要为岩屑砂岩,砂体成分成熟度低,具有近物源,沉积较快的特征。碎屑颗粒粒径主要集中在 0.2~0.5 mm 之间,为中粒砂状结构。碎屑颗粒的磨圆度主要为次棱—棱角状,分选性多为中等—差。砂岩普遍胶结较为致密,碎屑颗粒之间以点接触和线接触为主,胶结类型多为孔隙式胶结。

砂岩碎屑含量较高,多在 80%~90%之间,碎屑成分主要为石英、长石、岩屑及少量云母和重矿物。其中岩屑含量为 40%~70%,石英的含量为 30%~50%,长石的含量为 5%~10%。石英颗粒多为



A—姚下段底部冲刷面发育,见大量砾石,砾石成分复杂; B—灰白色砂岩中见炭化植物碎屑; C—氧化现象明显,砂体呈褐黄色; D—褐黄色砂体中见大块炭屑。
A—the scouring surface at the bottom of the lower Yao section is well developed, with a large amount of gravel and complex gravel composition; B—carbonized plant debris is observed in off-white sandstone; C—the oxidation phenomenon is obvious, and the sand body is brownish yellow; D—Large pieces of charcoal are observed in the brown-yellow sand body.

图 2 开鲁盆地钻孔 ZK18-1 岩芯剖面解释
Fig. 2 Interpretation of the core section of borehole ZK18-1 in Kailu Basin

单晶石英, 表面较为光洁, 少量石英为多晶石英颗粒, 各晶粒形状不规则, 彼此间多为缝合接触。可见细条状、尖角状石英(图 3A), 没有经过搬运, 应为火山晶屑直接掉落形成, 指示盆地周围酸性火山活动(陈梦雅, 2020)。长石含量较少, 以钾长石、斜长石为主。长石表面绢云母化蚀变较为发育, 镜下表现为表面粗糙, 多呈破碎状(图 3B)。云母多以黑云母为主, 见少量绢云母和白云母。薄片常见黑云母, 可见部分黑云母条带被碎屑颗粒挤压导致弯曲变形(图 3C)。黑云母具有易风化的特点, 在搬运过程中不易保存, 镜下观察常见黑云母, 说明了研究区距离母岩近, 黑云母能较为完整地保存下来。研究区的重矿物含量不高但是种类丰富, 主要有锆石、石榴石、绿帘石、电气石、磷灰石、榍石等(图 3D)。岩屑含量较为丰富且类型多样, 以凝灰岩岩屑和石英岩屑为主, 含有少量的花岗质岩屑、碳酸盐岩屑及千枚岩岩屑等。

研究区砂岩填隙物成分为杂基和胶结物两种, 成分 8%~20%, 总体含量较高。杂基是碎屑岩中的机械成因组分, 都较为细小, 成分包括了火山灰、伊利石、高岭石及少部分绿泥石等黏土类矿物。此外, 杂基中还含有原始机械沉积的粉砂级碎屑矿物, 如石英、长石微晶等, 粒径很小。砂岩中的胶结物主要为黏土矿物和碳酸盐胶结物, 黏土矿物以高岭石为主, 高岭石多呈书页状或鱼鳞片状(图 3E), 还可见部分伊利石、绢云母、绿泥石及绿脱石等(陈梦雅, 2020)。碳酸盐胶结物主要为方解石。方解石又可分为两种类型, 即亮晶方解石和泥晶方解石。研究区碳酸盐胶结物多为亮晶胶结, 呈连晶式胶结在石英、长石颗粒之间(图 3F)。

开鲁盆地含矿砂体中的硫化物主要为黄铁矿(表 1)。研究区黄铁矿较为发育, 野外观察可见其多呈结核状、粒状及浸染状分布在姚家组灰白色过渡带及还原带砂岩中, 常与炭屑等有机质伴生。镜下观察发现, 研究区黄铁矿的产状可以分为以下几类: 草莓状黄铁矿、胶状黄铁矿及粒状黄铁矿, 且多与叶片状或不规则状沥青铀矿共生。草莓状黄铁矿虽单体为草莓状但是多呈现出团块状聚集的特征(图 4A), 多分布在碎屑颗粒之间, 通常与铀矿物密切共生(吴仁贵等, 2012)(图 4B)。胶状黄铁矿晶形粗大, 分布在碎屑颗粒之间的孔隙中(图 4C), 起到胶结碎屑颗粒的作用(陈超等, 2016), 有时可见胶状黄铁矿围绕草莓状黄铁矿周围产出(图 4D)。粒状黄铁矿大小不一, 部分粒状黄铁矿为半自形-自形结构, 晶形较好且晶体较大; 部分黄铁矿粒径很小, 多产出于碎屑颗粒的边缘或凹坑内及碎屑颗粒之间(图 4E),

常与铀矿化密切相关。同时研究区还可见大量的黄铁矿充填炭屑细胞腔内, 具有交代炭屑的特征(图 4F)。另外姚家组砂岩在成岩过程中还广泛发育黏土化, 主要包括高岭石化、绢云母化、伊利石化以及绿泥石化等(贾立城等, 2018), 这些黏土矿物主要是岩石中不稳定组分经历溶蚀后形成的, 从而进一步改变了砂体中地球化学环境(黄广文, 2017)。在成岩成矿过程中, 新生的蚀变黏土矿物对含铀含氧流体中的铀表现出了吸附作用, 而黄铁矿则为铀沉淀富集提供了良好的还原环境。

3 样品与分析方法

本文所有电子探针样品均为来自于开鲁盆地钱家店—白兴吐矿床含矿目的层姚家组不同钻孔内的矿石样品, 均为灰白色砂岩, 具体取样位置及岩性特征见表 1。

铀矿物成分鉴定的电子探针实验在东华理工大学核资源与环境教育部重点实验室进行, 实验所用的仪器为 JXA-8100M 型电子探针和与之配套的 IncaEnergy 型能谱仪, 测试条件为: 加速电压 15.0 kV, 探针电流 20.0 nA, 束斑直径 < 2 μm 。

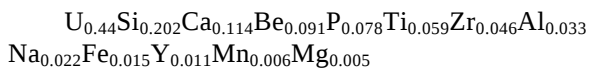
S 同位素测试采用二次离子质谱(SIMS)进行分析测试, 该分析测试在加拿大曼尼托巴大学同位素研究实验室进行, 所用仪器型号为 Cameca 7F, 分析条件为: 2 nA Cs^+ 初始离子束, 加速电压 10 kV, 束斑直径 15 μm 。

4 分析结果

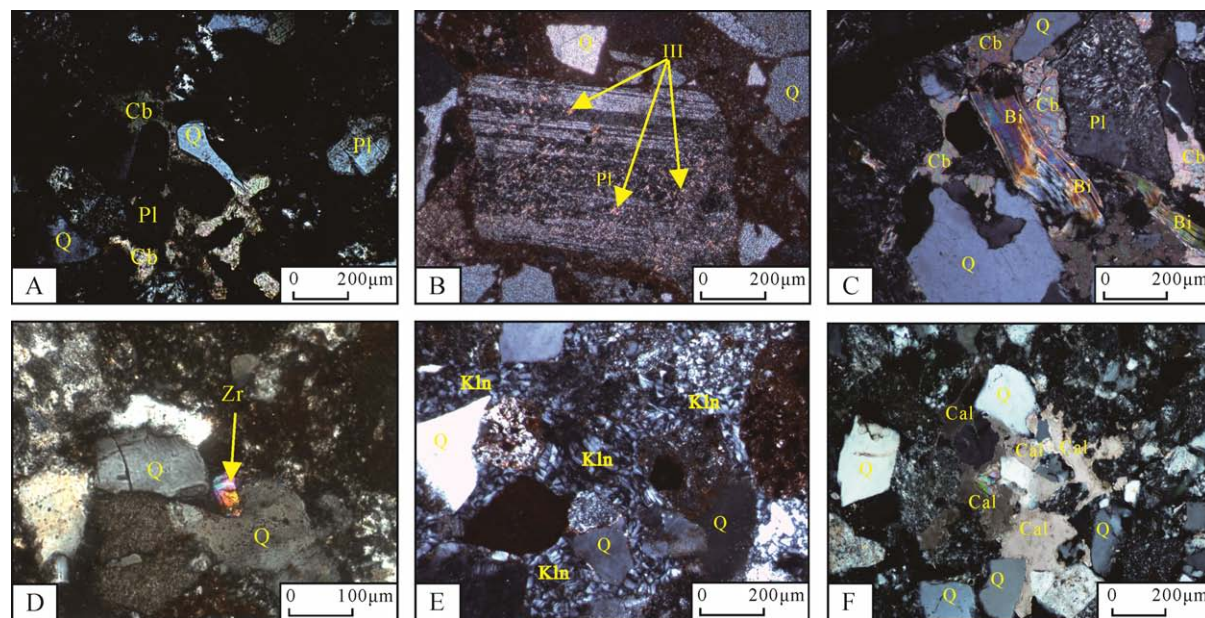
4.1 铀矿物种类

由于电子探针无法检测水和有机质, 且研究区铀矿物颗粒普遍较小, 局部直径小于束斑直径, 因此在分析测试时周围矿物可能会对铀矿物的含量产生影响, 导致电子探针分析结果偏离 100%, 但是结果并不影响对铀矿物种类的定性判别。由于水和有机质不参与铀矿物的晶格, 因此将电子探针数据换算成干组分, 按照 100%标准校准测试数据, 校准后的电子探针分析数据见表 2。根据电子探针定量分析可知, 研究区铀矿物类型以沥青铀矿为主, 含部分钍铀矿及少量铀石。

沥青铀矿(Pitchblende), 化学式为:



$\text{Pb}_{0.001}\text{O}_2$, UO_2 含量极高, 为 58.043%~85.924%, 平均含量 73.705%; SiO_2 含量为 1.082%~13.696%, 平均含量 7.508%; TiO_2 含量为 0.144%~7.743%, 平均含量 2.944%; CaO 含量为 1.957%~5.186%, 平均含量 3.972%; 其是研究区铀含量最高的矿物种类。

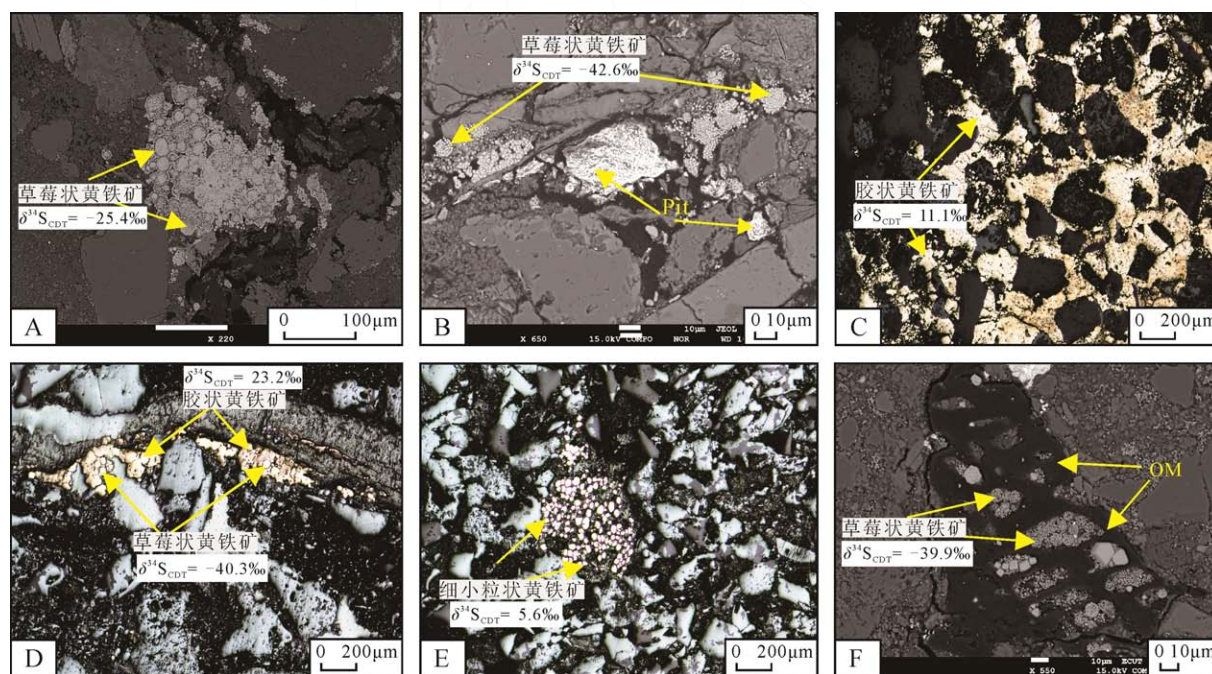


A—尖角状石英碎屑颗粒(Q), 18KL031, ZKH6-4, 602.20 m, (+); B—长石(Pl)伊利石化(III), 表面较脏, 18KL015, ZK 兴 87-8, 530.00 m, (+); C—黑云母(Bit)被挤压导致弯曲, 碳酸盐(Cb)胶结在颗粒中间, 18KL048, ZK 余 5-2, 668.30 m, (+); D—锆石(Zr), 18KL059, ZKH1-6, 592.50 m, (+); E—书页状高岭石(Kln), 18KL085, ZK 兴 147-6, 709.50 m, (+); F—方解石(Cal)胶结, 18KL059, ZKH1-6, 592.50 m, (+).

A—angular quartz debris particles (Q), 18KL031, ZKH6-4, 602.20 m, (+); B—feldspar (Pl) illitization (III), with dirty surface, 18KL015, ZK Xing 87-8, 530.00 m, (+); C—biotite (Bit) bent due to compression, carbonate (Cb) cemented in the middle of the particles, 18KL048, ZK Yu 5-2, 668.30 m, (+); D—zircon (Zr), 18KL059, ZKH1-6, 592.50 m, (+); E—book-like kaolinite (Kln), 18KL085, ZK Xing 147-6, 709.50 m, (+); F—calcite (Cal) cementation, 18KL059, ZKH1-6, 592.50 m, (+).

图 3 开鲁盆地目的层砂岩岩相学特征

Fig. 3 Petrographic characteristics of the target sandstone in Kailu Basin



A—草莓状黄铁矿, 19KL005, ZK125-7, 632.77 m (BSE 图); B—草莓状黄铁矿与沥青铀矿(Pit)密切共生, 18KL074, ZK9-5, 760.3 m, (BSE 图); C—胶状黄铁矿胶结在碎屑颗粒之间, 19KL039, ZK1-9, 698.03 m, (反射光); D—胶状黄铁矿围绕草莓状黄铁矿生长, 19KL066, ZK93-5, 523.6 m, (反射光); E—细小粒状黄铁矿分布在碎屑颗粒之间, 19KL024, ZK2-1, 636.9 m, (反射光);

F—粒状黄铁矿及草莓状黄铁矿充填在炭屑细胞腔(OM)内, 18KL074, ZK9-5, 760.3 m, (BSE 图)。

A—framboid pyrite, 19KL005, ZK 兴 125-7, 632.77 m, (BSE image); B—framboid pyrite is closely associated with pitchblende, 18KL074, ZK9-5, 760.3 m, (BSE image); C—colloidal pyrite is cemented between clastic particles, 19KL039, ZK1-9, 698.03 m, (reflected light); D—colloidal pyrite grows around framboid pyrite, 19KL066, ZK93-5, 523.6 m, (reflected light); E—the fine granular pyrite is distributed among the clastic particles, 19KL024, ZK2-1, 636.9 m, (reflected light); F—fine-grained pyrite and framboid pyrite are filled in the organic matter cell cavity (OM), 18KL074, ZK9-5, 760.3 m, (BSE image).

图 4 黄铁矿镜下特征

Fig. 4 Characteristics of pyrite under microscope

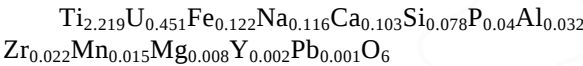
表 1 开鲁盆地姚家组砂岩取样表
Table 1 Sandstone sampling table of Yaojia Formation in Kailu Basin

样品号	钻孔号	深度/m	岩性描述	黄铁矿特征及产状
18KL074	ZK9-5	760.3	灰白色中砂岩	多数为草莓状, 部分为自形黄铁矿, 呈立方体、四面体状、八面体状
19KL005	ZK125-7	632.77	灰白色砾岩	多呈草莓状及不规则胶状
19KL011	ZK11-7	592.75	灰白色中砂岩	多数呈不规则胶状, 少数为半自形黄铁矿
19KL024	ZK2-1	636.9	灰色中砂岩	多呈不规则胶状集合体分布在碎屑颗粒边缘, 少部分为细粒半自形黄铁矿及草莓状黄铁矿
19KL039	ZK1-9	698.03	灰白色细砂岩	多呈不规则胶状分布在碎屑颗粒边缘, 起到胶结碎屑颗粒的作用; 少部分为细粒状自形-半自形黄铁矿
19KL066	ZK93-5	523.6	灰白色中砂岩	多为胶状及半自形黄铁矿, 晶形普遍较大

表 2 开鲁盆地铀矿物电子探针分析结果/%
Table 2 Electronic probe analysis results /% of uranium minerals in Kailu Basi

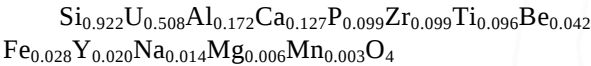
点号	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	UO ₂	ZrO ₂	CaO	Y ₂ O ₃	PbO	MnO	FeO	Na ₂ O	BeO	P ₂ O ₅	Total	铀矿物类型
18KL074-P1	0.128	0.379	1.169	2.884	85.924	1.359	3.158	0.178	0.208	0.877	0.244	1.750	0	1.742	100	沥青铀矿
18KL074-P2	0.181	0.473	10.614	0.216	66.378	6.647	4.934	2.206	0.113	0.044	0.269	0.185	0	7.740	100	沥青铀矿
18KL074-P3	0.085	0.545	0.598	52.83	37.103	1.899	1.653	0.089	0.000	0.095	1.304	2.431	0	1.368	100	钛铀矿
19KL005-P1	0.158	0.124	1.345	3.911	84.673	1.428	4.679	0.084	0.000	0.882	0.493	0.117	0	2.105	100	沥青铀矿
19KL005-P2	0.000	0.146	1.082	7.436	85.597	1.958	1.957	0.108	0.005	0.059	0.514	0.224	0	0.914	100	沥青铀矿
19KL005-P3	0.065	0.468	0.845	53.02	39.580	0.425	0.934	0.005	0.056	0.585	2.926	0.520	0	0.574	100	钛铀矿
19KL011-P1	0.195	3.334	7.458	3.624	74.619	1.282	4.584	0.080	0.000	0.147	0.627	0.630	2.541	0.877	100	沥青铀矿
19KL024-P1	0.000	0.239	12.766	0.250	61.846	5.072	3.198	1.105	0.106	0.073	1.534	0.003	10.150	3.661	100	沥青铀矿
19KL024-P2	0.056	0.643	19.544	0.275	66.574	4.508	3.099	0.682	0.026	0.001	1.531	0.004	0	3.058	100	铀石
19KL024-P3	0.000	0.317	12.221	0.144	75.163	1.045	3.870	0.694	0.000	0.012	1.122	0.033	0	5.377	100	沥青铀矿
19KL039-P1	0.067	5.712	22.029	0.252	52.762	8.993	2.518	2.011	0.062	0.092	0.096	0.302	0	5.105	100	铀石
19KL039-P2	0.144	0.483	2.812	54.780	33.766	0.086	2.645	0.137	0.148	0.298	3.736	0.307	0	0.662	100	钛铀矿
19KL-39-P3	0.265	3.658	7.218	7.743	71.101	1.148	4.180	0.102	1.146	0.158	0.920	0.766	0	1.593	100	沥青铀矿
19KL066-P1	0.114	0.593	13.696	0.290	58.043	11.979	5.186	2.621	0.000	0.103	0.438	0.084	0	6.854	100	沥青铀矿
19KL066-P2	0.195	4.548	27.178	8.944	51.041	1.632	3.268	0.041	0.000	0.135	0.908	0.215	1.309	0.587	100	铀石

钛铀矿(Brannerite), 化学式为:



UO₂ 含量为 33.766%~39.58%, 平均含量 36.816%; TiO₂ 含量为 52.83%~54.78%, 平均含量 53.543%, TiO₂ 含量明显比其他类型铀矿物高; FeO 含量较其他铀矿物也较高, 接近 3%。在研究区发现钛铀矿在一定意义上说明本区铀矿可能与中低温热液活动有关(闵茂中和张富生, 1992)。

铀石(Coffinite), 化学式为:



UO₂ 含量为 51.041%~66.574%, 平均含量 56.792%; SiO₂ 含量为 19.544%~27.178%, 平均含量 22.917%; 铀石中含少量 Al₂O₃、Y₂O₃、FeO 等, Al₂O₃ 平均含量 3.634%, Y₂O₃ 平均含量 0.911%, FeO 平均含量 0.845%。和沥青铀矿相比, 铀石的 SiO₂ 含量相对较高, UO₂ 含量相对较低。

4.2 铀矿物赋存形式

综合电子探针结果及背散射图像, 研究区铀矿物存在形式主要为独立铀矿物及吸附铀两种形式,

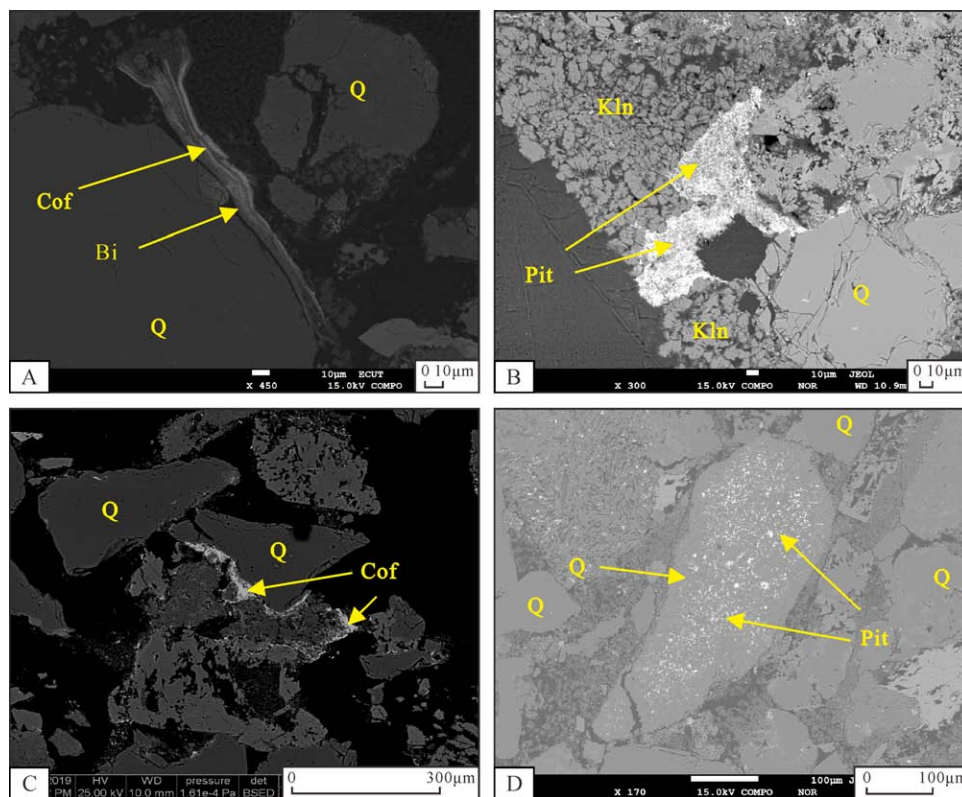
其分布规律大致可以分为以下几类:

4.2.1 产于黑云母解理中的铀矿物

观察研究区背散射图像可见铀石呈细脉状在黑云母的解理缝中产出(图 5A)。其主要原因是在成岩过程中, 黑云母发生蚀变, 体积变得疏松膨胀, 具有一定的吸附性, 吸附了流体中的游离铀。同时黑云母析出的 Fe²⁺创造了良好的还原环境, 使得流体中的 U⁶⁺发生还原, 并最终在黑云母的解理缝中富集沉淀(苗爱生等, 2009)。

4.2.2 被黏土矿物吸附的铀矿物

吸附态铀矿物是研究区常见的铀矿赋存形式之一, 其主要分布在碎屑颗粒边缘及填隙物中(图 5B)。研究区砂岩中吸附铀的物质主要为黏土矿物。研究表明, 黏土矿物具有很强的吸附性, 其含量越高就越有利于铀的富集(易超等, 2014)。研究区砂岩填隙物中的黏土矿物含量较高, 背散射图像下可见铀矿物被黏土矿物吸附呈网脉状或浸染状分布。吸附态的铀矿物大多颗粒十分细小, 在电子探针下难以辨认。个别样品中可见吸附态铀大规模分布, 一般为沥青铀矿或铀石。



A—铀石(Cof)在黑云母(Bi)解理缝中富集, 18KL074, ZK9-5, 760.3 m; B—沥青铀矿(Pit)被高岭石(Kln)吸附, 19KL024, ZK2-1, 636.9 m; C—铀石(Cof)在石英颗粒(Q)边缘富集, 19KL005, ZK125-7, 632.77 m; D—沥青铀矿(Pit)分布在石英颗粒(Q)中间, 19KL066, ZK93-5, 523.6 m。
A—coffinite (Cof) is enriched in biotite (Bi) cleavage fracture, 18KL074, ZK9-5, 760.3 m; B—pitchblende (Pit) is adsorbed by kaolinite (Kln), 19KL024, ZK2-1, 636.9 m; C—coffinite (Cof) is enriched at the edge of quartz (Q), 19KL005, ZK125-7, 632.77 m; D—pitchblende (Pit) is distributed in the middle of quartz (Q), 19KL066, ZK93-5, 523.6 m.

图5 开鲁盆地铀矿物 BSE 图像
Fig. 5 BSE images of uranium minerals in Kailu Basin

4.2.3 碎屑颗粒周围及中间的铀矿物

碱性环境下, 含铀含氧流体的活动能力较强, 容易在碎屑颗粒的边缘或者溶蚀孔洞中富集沉淀(苗爱生等, 2009), 因此在研究区的背散射图像中可见铀矿物呈星点状、不规则粒状或微细脉状等形式分布于碎屑石英、长石等颗粒边缘及裂隙或凹坑内(图 5C, D)。

4.2.4 与黄铁矿共生的铀矿物

野外观察发现研究区在还原带和过渡带砂岩中都出现了黄铁矿, 特别是在矿层周围黄铁矿十分发育, 这与铀矿的形成具有十分密切的关系。背散射图像显示大量铀矿物与黄铁矿共生的现象, 主要表现为沥青铀矿或铀石围绕草莓状黄铁矿或胶状黄铁矿周边生长(图 6A, B, C), 可见黄铁矿与沥青铀矿产出于有机质胞腔内(图 6D), 局部还可见铀矿物呈脉状充填在黄铁矿裂隙中(吴仁贵等, 2012)。由于黄铁矿为强还原物质, 为含铀含氧流体提供了良好的还原环境, 可以将流体中的 U^{6+} 还原为稳定 U^{4+} 并富集沉淀, 造成铀矿物与黄铁矿密切共生的现象。

4.3 黄铁矿原位硫同位素分析结果

黄铁矿硫同位素测试结果详见表 3。分析测试

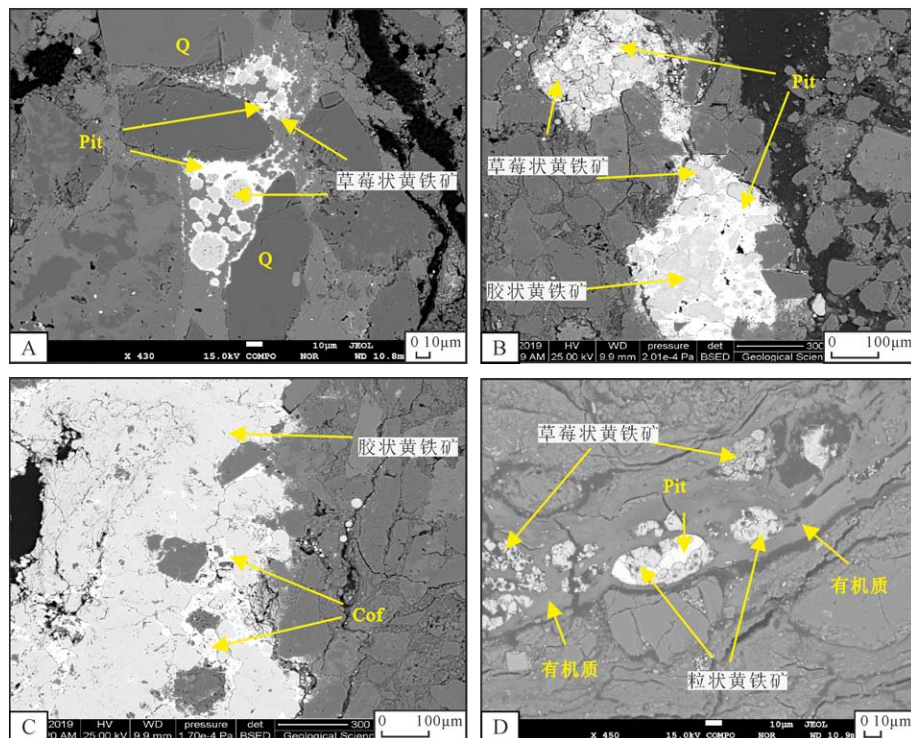
结果表明, 开鲁盆地钱家店—白兴吐矿床目的层姚家组砂岩中黄铁矿的 $d^{34}S_{CDT}$ 分布范围为 $-55.6\text{‰} \sim 23.2\text{‰}$, 平均值为 -20.87‰ , 极差值为 78.8‰ , 变化范围大, 说明硫的分馏程度相对较高, 硫的来源范围较广。

5 讨论

5.1 黄铁矿成因

硫同位素是成矿物质来源的有效指示剂之一(Chinnasamy 和 Mishra, 2013), 其能够反映成矿过程中地球化学环境的变化。黄铁矿是研究区最主要的硫化物, 其 S 同位素的值基本可以代表成矿热液中的硫同位素组成(Ohmoto, 1972; Robert and Ohmoto, 1974)。因此对黄铁矿的微观形貌和 S 同位素进行研究可以探究黄铁矿的成因及成矿热液的 S 来源, 从而为矿床成因的研究提供重要依据。

研究区钱家店—白兴吐矿床含矿目的层矿石样品中黄铁矿的 $d^{34}S$ 分布范围在 $-55.6\text{‰} \sim 23.2\text{‰}$, 平均值 -20.87‰ , 变化较大, 显示两种不同的特征, 草莓状黄铁矿及生物细胞腔内的黄铁矿在硫同位素上表现为亏损 $d^{34}S$, 其范围为 $-55.6\text{‰} \sim -4.3\text{‰}$,



A—沥青铀矿(Pit)围绕草莓状黄铁矿周围及石英碎屑颗粒边缘生长, 黄铁矿呈聚集状, 19KL024, ZK2-1, 636.9 m; B—沥青铀矿(Pit)与草莓状黄铁矿及胶状黄铁矿密切共生, 19KL024, ZK2-1, 636.9 m; C—铀石(Cof)围绕胶状黄铁矿周边生长 19KL024, ZK2-1, 636.9 m; D—黄铁矿与沥青铀矿(Pit)产生于有机质细胞腔内 18KL074, ZK9-5, 760.3 m。
A—pitchblende(Pit) grows around the framboid pyrite and the edge of the quartz debris, and the pyrite is aggregated, 19KL024, ZK2-1, 636.9 m; B—pitchblende(Pit) closely coexists with framboid pyrite and colloidal pyrite, 19KL024, ZK2-1, 636.9 m; C—coffinite (Cof) grows around colloidal pyrite, 19KL024, ZK2-1, 636.9 m; D—pyrite and pitchblende(Pit) are produced in the cell cavity of organic matter, 18KL074, ZK9-5, 760.3 m.

图6 黄铁矿与铀矿物 BSE 图像
Fig. 6 BSE images of pyrite and uranium minerals

平均值为 -32.24‰ ; 自形-半自形黄铁矿及胶状黄铁矿在硫同位素上显示较为富集 $d^{34}\text{S}$, 其范围为 $0.9\text{‰}\sim 23.2\text{‰}$, 平均值为 7.04‰ 。这两种不同特征的硫可能表明两个不同的参与铀矿化的黄铁矿的结晶过程。

前人研究发现, 黄铁矿中 S 主要来源于四种作用, 分别为细菌硫酸盐还原作用(BSR)、有机物热解(TDS)、热化学硫酸盐还原作用(TSR)及无机还原作用(玄武岩与海水)(丁波等, 2019)。无机还原作用(玄武岩与海水)形成的 $d^{34}\text{S}$ 多趋于正值, 通常为 20‰ , 而研究区 $d^{34}\text{S}$ 值并没有达到 20‰ , 因此基本可以排除无机还原作用。有机物热解作用是在温度 50℃ 以上时, 含 S 有机物受热发生分解, 生成 H_2S , 在热解过程中含 $d^{32}\text{S}$ 的键比 $d^{34}\text{S}$ 的键容易破裂, 造成 $d^{34}\text{S}$ 比原始物质低, $d^{34}\text{S}$ 通常在 $-17\text{‰}\sim 10\text{‰}$ (丁波等, 2019)。从硫同位素组成上看, 开鲁盆地黄铁矿有可能为有机物热解成因, 但是一般有机成因不大可能形成开鲁盆地大量的 H_2S 和黄铁矿, 且综合考虑到开鲁盆地目的层在成矿过程中曾经历过表生成矿作用及岩浆热作用(聂逢君等, 2017), 因此推测黄铁矿中 S 来源于细菌硫酸盐还原作用(BSR)和热化学硫

酸盐还原作用(TSR)。

细菌硫酸盐还原作用(BSR)一般是在温度 $\leq 50\text{℃}$ 的条件下, 地下水中的硫酸盐在厌氧细菌的作用下被还原, $^{32}\text{SO}_4^{2-}$ 优先被还原成 H_2^{32}S , 因此生成富含 ^{32}S 的“轻” H_2^{32}S , H_2^{32}S 与溶解在流体中的 Fe^{2+} 发生反应生成了黄铁矿。这种还原作用使含矿层的 S 同位素发生分馏, 造成了 $d^{34}\text{S}$ 出现较大负值(王正其等, 2005), 一般为 $-42.7\text{‰}\sim -5\text{‰}$ (郑永飞和陈江峰, 2000)。研究区 $d^{34}\text{S}$ 范围在 $-55.6\text{‰}\sim -4.3\text{‰}$ 的黄铁矿应为 BSR 作用所形成。这类黄铁矿镜下主要表现为草莓状及交代炭屑细胞腔的形式, 草莓状黄铁矿一般被认为与细菌作用有关(Chen et al., 2006), 是通过有机质球粒的交代或充填作用而形成的(Raiswell et al., 1988; 陈超等, 2016), 这类黄铁矿中高 As、Cu、Ni、Co 含量及轻 S 同位素特征证明了其细菌成因(Bonnetti et al., 2017)。野外观察中开鲁盆地钱家店—白兴吐矿床出露大量的炭屑及煤线等有机质, 在成岩过程中有机质的存在促进了厌氧细菌的繁殖, 厌氧细菌将流体中的硫酸盐还原(张晓, 2012), 生成大量 H_2S , H_2S 与 Fe^{2+} 反应最终形成大量草莓状黄铁矿(图 4A, B)。同时研究区还

表 3 黄铁矿硫同位素测试结果
Table 3 Characteristics of sulfur isotopes of pyrite

点号	岩性	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$
19KL005A-2C	灰白色砾岩	-39.6
19KL005A-3		-11.5
19KL005A-4A		-25.4
19KL011-4A	灰白色中砂岩	-23.3
19KL011-3A		-37.3
19KL011-2		-34.5
19KL011-1		-54.4
19KL024-11A	灰白色中砂岩	-53.9
19KL024-3A		-53.5
19KL024-4A		5.6
19KL024-6A		-55.6
19KL024-6B		-36.2
19KL024-9A		-4.3
19KL024-10A		-28.1
19KL039A-1B		-22.2
19KL039A-2B		-26.2
19KL039A-3A	灰白色细砂岩	0.9
19KL039A-3C		2.7
19KL039A-3D		-31.2
19KL039B-1A		-25.8
19KL039B-1C		11.1
19KL039B-2A		-23.0
19KL039B-2B		-17.8
19KL066A-1A	灰白色中砂岩	4.6
19KL066A-1B		-4.5
19KL066A-1C		23.2
19KL066A-1D		5.6
19KL066A-2A		-40.3
19KL066A-2B		-51.6
19KL066A-3B		3.6
19KL066A-3C		18.0
19KL066B-3B		-8.5
19KL066B-3C		1.2
19KL066B-3D		0.9
19KL066B-2A		-31.5
18KL074-2B		-42.6
18KL074-4A		-39.9
18KL074-5A		-47.8
平均值		-20.87

可见黄铁矿充填炭屑细胞腔并交代炭屑的现象(图4F),也证明了区内黄铁矿具备生物成因的特点。

热化学硫酸盐还原作用(TSR)是在温度相对较高的情况下,地层中的硫酸盐类矿物中的S在有机质的作用下发生还原,生成大量还原S。研究表明,TSR发生的最低温度为140℃(Machel et al., 1995; Worden et al., 1995),聂逢君等(2017)对开鲁盆地含矿目的层砂岩展开岩石学研究并发现,姚家组含矿目的层砂岩中存在大量的热流体改造现象,产生了大量的新生胶结物,并对碳酸盐胶结物进行测温,

结果显示目的层砂岩胶结物平均温度为118.7℃,最高温度为178.8℃,并在140~150℃范围内出现峰值,其温度达到了TSR作用发生所要求的最低温度。TSR反应的另一个条件是充足的烃类有机质(气态烃或液态烃),目的层砂岩中烃含量丰富,整体显示CH₄、H₂S等还原性物质含量较高(闫枫, 2018),同时研究区断裂贯通目的层与深部地层,为物质的运移提供了通道。除此之外,TSR反应还需要充足的硬石膏。研究表明,盆地内白垩系泉头组和姚家组红层中,普遍发育蒸发盐沉积(王璞珺等, 1995)。蒸发盐多产于紫红色粉砂质泥岩中,常与钙质结核共生,其主要成分为硬石膏、重晶石及天青石和少量交代残余石膏。泉头组及姚家组中充足的蒸发盐沉积为TSR反应提供了必要的硬石膏条件,使得反应能够顺利进行。

5.2 黄铁矿与铀矿化关系

砂岩型铀矿中铀主要以U⁶⁺形式存在于成矿流体中进行迁移,在还原环境下,流体中的U⁶⁺被还原成U⁴⁺从而富集沉淀形成铀矿物。研究区出露大量黄铁矿,多以草莓状黄铁矿、胶状黄铁矿及粒状黄铁矿形式出现,部分充填在有机质细胞腔内,部分在碎屑颗粒凹坑内及胶结物中,多与叶片状及不规则状沥青铀矿共生,两者存在极为密切的关系。

早白垩世时期,开鲁盆地处于伸展断陷成盆阶段,该时期古气候条件较为温暖潮湿,盆地中沉积的碎屑岩建造富含煤、石油和天然气(于文斌, 2009),同时砂体中富含有机质炭屑等还原物质。晚白垩世嫩江期末开鲁盆地遭受挤压全面隆升,目的层姚家组出露地表,接受来自蚀源区含铀含氧流体渗入到目的层砂体中,同时带入了一定的活性铁、硫酸盐还原菌、SO₄²⁻及U⁶⁺。有机质等在厌氧的硫酸盐还原菌的作用下与砂体中的硫酸盐发生反应生成大量H₂S气体。在充足的活性铁浓度的条件下,H₂S首先与含铀含氧流体中带入的活性铁发生反应,形成四方硫铁矿(Fe₉S₈),四方硫铁矿通过结构中铁的散出转变为胶黄铁矿(Fe₃S₄),胶黄铁矿具磁性,在磁性吸引力的作用下,黄铁矿最终聚合成草莓状(丁波等, 2019)。同时在黄铁矿形成的强还原环境下,含铀含氧流体中带入的U⁶⁺不断被还原成U⁴⁺并富集沉淀,形成铀矿物与草莓状黄铁矿密切共生的现象。前人(Goldhaber et al., 1987)研究表明,成矿溶液的pH值是控制铀吸附的关键因素之一,在pH值接近6时,铀吸附量达到最大。考虑到研究区含矿砂岩中广泛发育高岭石化,说明成矿流体可能是偏酸性的,有利于铀的吸附,造成有机质、黏土矿物及颗粒表面都会吸附一定量的铀,当其达到一定浓度的时候,会被硫酸盐还原菌的产物H₂S还原形成以

胶状形式产于有机质细胞腔内的沥青铀矿(图 6D)。研究区常见含矿层中发育富铀有机质也说明了铀成矿过程中经历了生物作用。

古近纪时期开鲁盆地持续隆升剥蚀, 构造天窗进一步发育。同时该阶段的差异升降活动伴随着断裂构造, 辉绿岩脉沿断裂上涌, 改变了成矿区域的热场, 并为后期热流体形成提供了物质条件。研究区辉绿岩蚀变发育, 其暗色矿物如辉石、角闪石、黑云母等释放出大量的 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Ti^{2+} 进入砂岩形成成矿热流体(聂逢君等, 2017)。过量的 Fe^{2+} 创造了良好的还原环境, 并与砂体中的还原产物 H_2S 结合形成新生的黄铁矿(刘斌等, 2019)。 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Ti^{4+} 等离子与其他阴离子结合, 形成了铁绿泥石、铁白云石、菱铁矿等。由于热流体的作用, 研究区发育强烈的蚀变现象, 大量长石蚀变为绢云母和黏土矿物; 黑云母强烈蚀变成绿泥石, 并保留黑云母假象; 碳酸盐化和赤铁矿化进一步发育(徐喆等, 2011; 朱强等, 2015; 荣辉等, 2016; 陈梦雅, 2020)。先前形成的部分沥青铀矿中的铀被活化, 重新迁移并在合适的地方富集沉淀。在研究区发现的钛铀矿也说明了铀矿化与热液作用密切相关。此外, 研究区的矿体在空间上和断裂及辉绿岩脉关系十分密切, 也为铀矿后期热液叠加改造成矿提供了佐证。

6 结论

(1) 开鲁盆地铀矿床中铀主要以独立铀矿物及吸附铀形式存在, 吸附铀矿物主要为黏土矿物吸附。独立铀矿物主要以沥青铀矿为主, 含有部分钛铀矿及少量铀石, 沥青铀矿多围绕黄铁矿产出, 二者关系密切。

(2) 开鲁盆地钱家店—白兴吐矿床含矿目的层砂岩中黄铁矿主要以草莓状、胶状及粒状产出, 多与沥青铀矿共生, 其中黄铁矿的 $d^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 分布范围为 -55.6% ~ 23.2% , 平均值为 -20.87% , 极差值为 78.8% , 变化范围大, 综合区内成矿地质背景, 认为黄铁矿具有细菌硫酸盐还原作用及热化学硫酸盐还原作用两种成因。

(3) 综合开鲁盆地含矿目的层砂岩的岩相学、铀矿物特征以及黄铁矿 S 同位素, 结合前人研究, 认为研究区铀矿经历了层间氧化成矿和热液流体叠加改造成矿, 黄铁矿和炭屑等有机质为铀成矿作用提供了必要的还原剂, 创造了良好的还原环境, 使得 U^{6+} 被还原成 U^{4+} 最终富集形成沥青铀矿及铀石等, 并造成黄铁矿与铀矿密切共生的现象。

致谢: 感谢核工业二四三大队在野外样品采集过程中的支持和帮助。

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (Nos. U2067202; 41772068; 41562006), and National Program on Key Basic Research Project (973 Program) (No. 2015CB453002).

参考文献:

- 陈超, 刘洪军, 侯惠群, 韩绍, 柯丹, 白云生, 欧光习, 李言瑞. 2016. 鄂尔多斯盆地北部直罗组黄铁矿与砂岩型铀矿化关系研究[J]. 地质学报, 90(12): 3375-3380.
- 陈程, 郭庆银, 蔡煜琦. 2018. 内蒙古通辽地区姚家组沉积特征与铀成矿关系探讨[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 41(1): 15-21.
- 陈方鸿, 张明瑜, 林畅松. 2005. 开鲁盆地钱家店凹陷含铀岩系姚家组沉积环境及其富铀意义[J]. 沉积与特提斯地质, 25(3): 74-79.
- 陈娟, 张庆龙, 王良书, 解国爱, 徐士银, 毕素萍, 葛荣峰. 2008. 松辽盆地长岭断陷盆地断陷期构造转换及油气地质意义[J]. 地质学报, 82(8): 1027-1035.
- 陈梦雅. 2020. 开鲁盆地砂岩型铀矿流体蚀变特征与成矿作用研究[D]. 南昌: 东华理工大学.
- 陈晓林, 方锡珩, 郭庆银, 夏毓亮, 庞雅庆, 孙晔. 2008. 对松辽盆地钱家店凹陷铀成矿作用的重新认识[J]. 地质学报, 82(4): 553-561.
- 陈祖伊, 陈戴生, 古抗衡, 王亚婧. 2010. 中国砂岩型铀矿容矿层位、矿化类型和矿化年龄的区域分布规律[J]. 铀矿地质, 26(6): 321-330.
- 蔡煜琦, 李胜祥. 2008. 钱家店铀矿床含矿地层——姚家组沉积环境分析[J]. 铀矿地质, 24(2): 66-72.
- 丁波, 刘红旭, 张宾, 李平, 蒋宏, 张虎军, 谢希良, 郭春杰. 2019. 伊犁蒙古古尔铀矿床含矿层砂岩中黄铁矿形成机制及对铀成矿的指示意义[J]. 矿床地质, 38(6): 1379-1391.
- 郭福能. 2017. 松辽盆地西南部上白垩统姚家组铀成矿规律与远景预测[D]. 南昌: 东华理工大学.
- 黄广文, 余福承, 潘家永, 陈正乐, 吴德海, 薛万文, 宋泰忠, 李善平. 2021. 新疆蒙古古尔铀矿床黄铁矿微量元素与硫同位素地球化学特征及其对铀成矿作用的指示[J]. 中国地质, 48(2): 507-519.
- 黄广文. 2017. 伊犁盆地蒙古古尔铀矿床矿石组分及碎屑物源示踪研究[D]. 南昌: 东华理工大学.
- 贾立城, 蔡建芳, 黄笑, 张康, 张亮亮, 孙晨. 2018. 宝龙山铀矿床姚家组下段砂岩岩石学特征与成岩作用[J]. 铀矿地质, 34(5): 264-273.
- 焦养泉, 吴立群, 荣辉. 2018. 砂岩型铀矿的双重还原介质模型及其联合控矿机理: 兼论大营和钱家店铀矿床[J]. 地球科学, 43(2): 459-474.
- 林锦荣, 田华, 董文明, 夏毓亮, 郑纪伟, 戚大能, 腰善丛. 2009. 松辽盆地东南部铀矿找矿目的层原生地球化学类型与后生蚀变作用[J]. 铀矿地质, 25(4): 202-207.
- 刘斌, 陈卫锋, 高爽, 方启春, 毛玉锋, 唐湘生, 严永杰, 魏欣, 赵葵东, 凌洪飞. 2019. 相山铀矿田黄铁矿微量元素、硫同

- 位素特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 38(6): 1321-1335.
- 罗毅, 何中波, 马汉峰, 孙祥. 2012. 松辽盆地钱家店砂岩型铀矿成矿地质特征[J]. 矿床地质, 31(2): 391-400.
- 马汉峰, 罗毅, 李子颖, 何中波, 夏毓亮, 王明太. 2009. 松辽盆地南部姚家组沉积特征及铀成矿条件[J]. 铀矿地质, 25(3): 144-149.
- 苗爱生, 陆琦, 刘惠芳, 肖平. 2009. 鄂尔多斯砂岩型铀矿床古层间氧化带中铀石的产状和形成[J]. 地质科技情报, 28(4): 51-58.
- 闵茂中, 张富生. 1992. 成因铀矿物学概论[M]. 北京: 原子能出版社: 54-59.
- 聂逢君, 严兆彬, 夏菲, 何剑锋, 张成勇, 封志兵, 张鑫, 杨东光, 陈梦雅, 谈顺佳, 张进, 康世虎, 宁君, 杨建新, 申科峰, 蔡建芳. 2021. 砂岩型铀矿的“双阶段双模式”成矿作用[J]. 地球学报, 42(6): 823-848.
- 聂逢君, 严兆彬, 夏菲, 李满根, 卢亚运, 蔡建芳, 郭福能, 宁君. 2017. 内蒙古开鲁盆地砂岩型铀矿热流体作用[J]. 地质通报, 36(10): 1850-1866.
- 荣辉, 焦养泉, 吴立群, 季东民, 里宏亮, 朱强, 曹民强, 汪小妹, 李青春, 谢惠丽. 2016. 松辽盆地南部钱家店铀矿床后生蚀变作用及其对铀成矿的约束[J]. 地球科学, 41(1): 153-166.
- 唐克东, 邵济安, 李永飞. 2011. 松嫩地块及其研究意义[J]. 地学前缘, 18(3): 57-65.
- 王璞珺, 任延广, 王东坡. 1995. 松辽盆地白垩系泉头组蒸发盐岩的成因及其古环境意义研究[J]. 沉积学报, 13(A01): 53-62.
- 王正其, 曹双林, 潘家永, 管太阳, 张国玉. 2005. 新疆 511 铀矿床微量元素富集特征研究[J]. 矿床地质, 24(4): 409-415.
- 吴仁贵, 徐喆, 宫文杰, 蔡建芳, 宁君. 2012. 松辽盆地白兴吐铀矿床成因讨论[J]. 铀矿地质, 28(3): 142-147.
- 夏毓亮, 林锦荣, 李子颖, 李胜祥, 刘汉彬, 王志明, 范光, 郑纪伟, 李真济, 张明瑜. 2003. 松辽盆地钱家店凹陷砂岩型铀矿预测评价和铀成矿规律研究[J]. 中国核科技报告, (03): 105-117.
- 徐喆, 吴仁贵, 余达淦, 饶明辉, 李彦林, 高玉友, 禹宝利. 2011. 松辽盆地砂岩型铀矿床的热液作用特征——以宝龙山地段砂岩铀矿为例[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 34(3): 201-208.
- 许坤, 李瑜. 1995. 开鲁盆地晚中生代地层[J]. 地层学杂志, 19(2): 88-95.
- 闫枫. 2018. 松辽盆地西南部钱家店砂岩型铀矿床岩石学和矿床地球化学研究[D]. 西安: 西北大学.
- 易超, 李西得, 陈心路, 张康, 王明太. 2014. 鄂尔多斯盆地东北部后生蚀变砂岩特征研究[J]. 矿床地质, 33(S1): 875-876.
- 殷敬红, 张辉, 咎国军, 李晓晨. 2000. 内蒙古东部开鲁盆地钱家店凹陷铀矿成藏沉积因素分析[J]. 古地理学报, 2(4): 76-83.
- 于文斌. 2009. 松辽盆地南部白垩系砂岩型铀矿成矿条件研究[D]. 吉林: 吉林大学.
- 张成勇, 夏菲, 严兆彬, 邓薇, 聂逢君, 张鹏飞, 文振宇, 刘波, 戴明建, 封志兵. 2021. 巴音戈壁盆地塔木素铀矿床含矿砂岩成岩作用类型、演化序列及其对铀成矿的约束[J]. 地球学报, 42(6): 907-920.
- 张晓. 2012. 伊犁盆地南缘蒙古古尔铀矿床成因研究[D]. 北京: 核工业北京地质研究院.
- 张振强, 桑吉盛, 金成洙. 2006. 松辽盆地东南隆起区反转构造对砂岩型铀矿成矿的作用[J]. 铀矿地质, 22(3): 151-156.
- 赵凤民, 沈才卿. 1986. 黄铁矿与沥青铀矿的共生条件及在沥青铀矿形成过程中所起作用的实验研究[J]. 铀矿地质, 2(4): 193-199.
- 郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社: 193-247.
- 朱强, 焦养泉, 吴立群, 荣辉, 谢惠丽, 马小东. 2015. 松辽盆地钱家店地区姚家组铀储层岩石学特征及成岩作用[J]. 中国科技论文, 10(15): 1802-1808.
- 朱筱敏, 康安, 谢庆宾, 康强, 王贵迎, 高永富. 2000. 内蒙古钱家店凹陷侏罗系层序地层与岩性圈闭[J]. 石油勘探与开发, 27(2): 48-52.
- 邹明亮, 黄宏业, 刘鑫扬, 范立亭, 向庭富, 徐浩, 欧阳平宁. 2017. 华南诸广岩体中段含矿黄铁矿特征及其与铀成矿关系[J]. 地质论评, 63(4): 1021-1039.

References:

- BONNETTI C, LIU Xiao-dong, YAN Zhao-bin, CUNEY M, MICHELS R, MALARTRE F, MERCADIER J, CAI Ji-ang-fang. 2017. Coupled uranium mineralisation and bacterial sulphate reduction for the genesis of the Baxingtu sandstone-hosted U deposit, SW Songliao Basin, NE China[J]. Ore Geology Reviews, 82: 108-129.
- CAI Yu-qi, LI Sheng-xiang. 2008. Sedimentary environment analysis of Yaojia formation——the ore-hosting stratum of Qianjiadian uranium deposit[J]. Uranium Geology, 24(2): 66-72(in Chinese with English abstract).
- CHEN Chao, LIU Hong-jun, HOU Hui-qun, HAN Shao, KE Dan, BAI Yun-sheng, OU Guang-xi, LI Yan-rui. 2016. The relationship between pyrite and sandstone-hosted uranium mineralization of the Zhiluo Formation in the northern Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 90(12): 3375-3380(in Chinese with English abstract).
- CHEN Cheng, GUO Qing-yin, CAI Yu-qi. 2018. Sedimentary characteristics and its relationship with the uranium mineralization of the Yaojia Formation in Tongliao area, Inner Mongolia[J]. Journal of East China University of Technology (Nature Science), 41(1): 15-21(in Chinese with English abstract).
- CHEN D F, FENG D, SU Z, SONG Z G, CHEN G Q, CATHLES L M. 2006. Pyrite crystallization in seep carbonates at gas vent and hydrate site[J]. Materials Science and Engineering: C, 26(4): 602-605.
- CHEN Fang-hong, ZHANG Ming-yu, LIN Chang-song. 2005. Sedimentary environments and uranium enrichment in the Yaojia Formation, Qianjiadian depression, Kailu Basin, Nei Mongol[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 25(3): 74-79(in Chinese with English abstract).
- CHEN Juan, ZHANG Qing-long, WANG Liang-shu, XIE Guo-ai, XU Shi-yin, BI Su-ping, GE Rong-feng. 2008. Tectonic

- transformation of Changling fault depression in the southern Songliao Basin and its significance of hydrocarbon accumulation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(8): 1027-1035(in Chinese with English abstract).
- CHEN Meng-ya. 2020. Fluid alteration characteristics and mineralization of sandstone type uranium deposits in Kailu Basin[D]. Nanchang: East China University of Technology(in Chinese with English abstract).
- CHEN Xiao-lin, FANG Xi-heng, GUO Qing-yin, XIA Yu-liang, PANG Ya-qing, SUN Ye. 2008. Re-discussion on uranium metallogenesis in Qianjiadian Sag, Songliao Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 553-561(in Chinese with English abstract).
- CHEN Zu-yi, CHEN Dai-sheng, GU Kang-heng, WANG Ya-jing. 2010. The regional distribution regularities of ore-hosting horizon, deposit type and mineralization ages of China's sandstone-hosted uranium deposits[J]. *Uranium Geology*, 26(6): 321-330(in Chinese with English abstract).
- CHINNASAMY S S, MISHRA B. 2013. Greenstone metamorphism, hydrothermal alteration, and gold mineralization in the genetic context of the granodiorite-hosted gold deposit at Jonnagiri, Eastern Dharwar Craton, India[J]. *Economic Geology*, 108 (5): 1015-1036.
- DING Bo, LIU Hong-xu, ZHANG Bin, LI Ping, JIANG Hong, ZHANG Hu-jun, XIE Xi-liang, GUO Chun-jie. 2019. Mineralogical and isotopes evidence for origin of pyrite: Implication for formation mechanism of pyrite and its relationship with uranium mineralization in Mengqigu'er uranium deposit, Yili Basin[J]. *Mineral Deposits*, 38(6): 1379-1391(in Chinese with English abstract).
- GOLDHABER M B, HEMINGWAY B S, MOHAGHEGHI A, REYNOLDS R L, NORTHROP H R. 1987. Origin of coffinite in sedimentary rocks by a sequential adsorption-reduction mechanism[J]. *Bulletin De Mineralogie*, 110(2): 131-144.
- GUO Fu-neng. 2017. Uranium metallogenic regularity and prospect prediction of Upper Cretaceous Yaojia formation in southern Songliao Basin[D]. Nanchang: East China University of Technology(in Chinese with English abstract).
- HUANG Guang-wen, YU Fu-cheng, PAN Jia-yong, CHEN Zheng-le, WU De-hai, XUE Wan-wen, SONG Tai-zhong, LI Shan-ping. 2021. Genesis of pyrite from the Mengqiguer uranium deposit in Ili Basin of Xinjiang and its implication for mineralization[J]. *Geology in China*, 48(2): 507-519(in Chinese with English abstract).
- HUANG Guang-wen. 2017. The mineral composition debris source tracer study of Mengqiguer Uranium Deposit in Yili Basin[D]. Nanchang: East China University of Technology(in Chinese with English abstract).
- JIA Li-cheng, CAI Jian-fang, HUANG Xiao, ZHANG Kang, ZHANG Liang-liang, SUN Chen. 2018. Petrological characteristics and diagenesis of sandstone of the lower Yaojia Formation in Baolongshan uranium deposit, south of Songliao Basin[J]. *Uranium Geology*, 34(5): 264-273(in Chinese with English abstract).
- JIAO Yang-quan, WU Li-qun, RONG Hui. 2018. Model of inner and outer media within uranium reservoir sandstone of sandstone-type uranium deposits and its ore-controlling mechanism: Case studies in daying and Qianjiadian uranium deposits[J]. *Earth Science*, 43(2): 459-474(in Chinese with English abstract).
- LIN Jin-rong, TIAN Hua, DONG Wen-ming, XIA Yu-liang, ZHENG Ji-wei, QI Da-neng, YAO Shan-cong. 2009. Original geochemical types and epigenetic alteration of rocks in prospecting target stratum for uranium deposit in the southeast of Songliao basin[J]. *Uranium Geology*, 25 (4): 202-207(in Chinese with English abstract).
- LIU Bin, CHEN Wei-feng, GAO Shuang, FANG Qi-chun, MAO Yu-feng, TANG Xiang-sheng, YAN Yong-jie, WEI Xin, ZHAO Kui-dong, LING Hong-fei. 2019. Sulfur isotope and trace element geochemical characteristics of pyrite in Xiangshan uranium orefield and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 38(6): 1321-1335(in Chinese with English abstract).
- LUO Yi, HE Zhong-bo, MA Han-feng, SUN Xiang. 2012. Metallogenic characteristics of Qianjiadian sandstone uranium deposit in Songliao basin[J]. *Mineral Deposits*, 31(2): 391-400(in Chinese with English abstract).
- MA Han-feng, LUO Yi, LI Zi-ying, HE Zhong-bo, XIA Yu-liang, WANG Ming-tai. 2009. Sedimentary features and uranium metallogenic conditions of Yaojia formation in southern Songliao basin[J]. *Uranium Geology*, 25(3): 144-149(in Chinese with English abstract).
- MACHEL H G, KROUSE H R, SASSEN R. 1995. Products and distinguishing criteria of bacterial and thermochemical sulfate reduction[J]. *Applied Geochemistry*, 10(4): 373-389.
- MIAO Ai-sheng, LU Qi, LIU Hui-fang, XIAO Ping. 2009. Occurrence and formation of coffinite in ancient interlayer oxidizing zone of sandstone type U-deposit in Ordos Basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 28 (4): 51-58(in Chinese with English abstract).
- MIN Mao-zhong, ZHANG Fu-sheng. 1992. Introduction to genetic uranium mineralogy[M]. Beijing: Atomic Energy Press: 54-59(in Chinese).
- NIE Feng-jun, YAN Zhao-bin, XIA Fei, HE Jian-feng¹⁾, ZHANG Cheng-yong, FENG Zhi-bing, ZHANG Xin, YANG Dong-guang, CHEN Meng-ya, TAN Shun-jia, ZHANG Jin, KANG Shi-hu, NING Jun, YANG Jian-xin, SHEN Ke-feng, CAI Jian-fang. 2021. Two-stage and Two-mode Uranium Mineralization for Sandstone-type Uranium Deposits[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(6): 823-848(in Chinese with English abstract).
- NIE Feng-jun, YAN Zhao-bin, XIA Fei, LI Man-gen, LU Ya-yun, CAI Jian-fang, GUO Fu-neng, NING Jun. 2017. Hot fluid flows in the sandstone-type uranium deposit in the Kailu basin, Northeast China[J]. *Geological Bulletin of China*, 36(10): 1850-1866(in Chinese with English abstract).
- OHMOTO H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. *Economic Geology*, 67(5):

- 551-578.
- RAISWELL R, BUCKLEY F, BERNER R A, ANDERSON T F. 1988. Degree of pyritization of iron as a paleoenvironmental indicator of bottom-water oxygenation[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 58(5): 812-819.
- RONG Hui, JIAO Yang-quan, WU Li-qun, JI Dong-min, LI Hong-liang, ZHU Qiang, CAO Min-qiang, WANG Xiao-mei, LI Qing-chun, XIE Hui-li. 2016. Epigenetic alteration and its constraints on uranium mineralization from the Qianjiadian uranium deposit, southern Songliao Basin[J]. *Earth Science*, 41(1): 153-166(in Chinese with English abstract).
- RYE R O, OHMOTO H. 1974. Sulfur and carbon isotopes and ore genesis: A review[J]. *Economic Geology*, 69(6): 826-842.
- TANG Ke-dong, SHAO Ji-an, LI Yong-fei. 2011. Songnen Massif and its research significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(3): 57-65(in Chinese with English abstract).
- WANG Pu-jun, REN Yan-guang, WANG Dong-po. 1995. Evaporite origin and its palaeoenvironmental significance of Quantou Formation, Songliao Cretaceous Nearshore continental Basin (NE China)[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 13(A01): 53-62(in Chinese with English abstract).
- WANG Zheng-qi, CAO Shuang-lin, PAN Jia-yong, GUAN Tai-yang, ZHANG Guo-yu. 2005. Trace element geochemistry of No. 511 uranium ore deposit in Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 24(4): 409-415(in Chinese with English abstract).
- WORDEN R H, SMALLEY P C, OXTOBY N H. 1995. Gas sourcing by thermochemical sulfate reduction at 140°C[J]. *AAPG Bulletin*, 79(6): 854-863.
- WU Ren-gui, XU Zhe, GONG Wen-jie, CAI Jian-fang, NING Jun. 2012. Discussion on the genesis of Baixintu uranium deposit in Songliao Basin[J]. *Uranium Geology*, 28(3): 142-147(in Chinese with English abstract).
- XIA Yu-liang, LIN Jin-rong, LI Zi-ying, LI Sheng-xiang, LIU Han-bin, WANG Zhi-ming, FAN Guang, ZHENG Ji-wei, LI Zhen-ji, ZHANG Ming-yu. 2003. Perspective and resource evaluation and metallogenic studies on sandstone-type uranium deposit in Qianjiadian Depression of Songliao Basin[J]. *China Nuclear Science and Technology Report*, (03): 105-117(in Chinese with English abstract).
- XU Kun, LI Yu. 1995. Late Mesozoic strata of the Kailu Basin[J]. *Journal of Stratigraphy*, 19(2): 88-95(in Chinese with English abstract).
- XU Zhe, WU Ren-gui, YU Da-gan, RAO Ming-hui, LI Yan-lin, GAO Yu-you, YU Bao-li. 2011. Features of hydrothermal alteration of sandstone-type uranium deposits in Songliao Basin—A case of study in sandstone-type uranium deposit of Baolongshan Section[J]. *Journal of East China Institute of Technology (Nature Science)*, 34(3): 201-208(in Chinese with English abstract).
- YAN Feng. 2018. Petrology and geochemistry of the Qianjiadian sandstone-type uranium deposit in the southwest of Songliao Basin[D]. Xi'an: Northwestern University(in Chinese with English abstract).
- YI Chao, LI Xi-de, CHEN Xin-lu, ZHANG Kang, WANG Ming-tai. 2014. Characteristics of epigenetic altered sandstone in Northeast Ordos Basin[J]. *Mineral Deposits*, 33(S1): 875-876(in Chinese).
- YIN Jing-hong, ZHANG Hui, ZAN Guo-jun, LI Xiao-chen. 2000. Sedimentation factors analysis of uranium mineralization of Qianjiadian depression, Kailu Basin, east Inner Mongolia autonomous region[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2(4): 76-83(in Chinese with English abstract).
- YU Wen-bin. 2009. Reaearch on metallogenic conditions of sandstone type uranium deposit of Cretaceous in southern Songliao basin[D]. Jinlin: Jilin University(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Cheng-yong, XIA Fei, YAN Zhao-bin, DENG Wei, NIE Feng-jun, ZHANG Peng-fei, WEN Zhen-yu, LIU Bo, DAI Ming-jian, FENG Zhi-bing. 2021. Diagenesis Types and Evolution Sequence of Ore Bearing Sandstone and Their Constraints on Uranium Mineralization in Tamusu Uranium Deposit, Bayingobi Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(6): 907-920(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xiao. 2012. A Review on Genesis of Mengqiguer Uranium Deposit in the Southern Margin of Yili Basin, Xinjiang[D]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhen-qiang, SANG Ji-sheng, JIN Cheng-zhu. 2006. Inversion structure and its contribution to sandstone uranium metallogenesis in southeast uplift domain of Songliao basin[J]. *Uranium Geology*, 22(3): 151-156(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Feng-min, SHEN Cai-qing. 1986. Experimental researches on paragenetic condition for pyrite and pitchblende and its role in pitchblende formation process[J]. *Uranium Geology*, 2(4): 193-199(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Yong-fei, CHEN Jiang-feng. 2000. Stable isotope geochemistry[M]. Beijing: Science Press: 193-247(in Chinese).
- ZHU Qiang, JIAO Yang-quan, WU Li-qun, RONG Hui, XIE Hui-li, MA Xiao-dong. 2015. Petrology and diagenesis of the uranium reservoir in the Yaojia formation of Songliao Basin, Qianjiadian area[J]. *China Sciencepaper*, 10(15): 1802-1808(in Chinese with English abstract).
- ZHU Xiao-min, KANG An, XIE Qing-bin, KANG Qiang, WANG Gui-ying, GAO Yong-fu. 2000. Jurassic sequence stratigraphy and lithologic traps in Qianjiadian depression, Inner Mongolia[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 27(2): 48-52(in Chinese with English abstract).
- ZOU Ming-liang, HUANG Hong-ye, LIU Xin-yang, FAN Li-ting, XIANG Ting-fu, XU Hao, OUYANG Ping-ning. 2017. Characterization of arsenic-bearing pyrite and the relationship with uranium metallogenesis in the central Zhuguang pluton, Southern China[J]. *Geological Review*, 63(4): 1021-1039(in Chinese with English abstract).