

松辽盆地西南部钱家店凹陷 DL 铀矿带 铀的赋存形式及成矿时代

黄少华¹⁾, 秦明宽¹⁾, 刘章月¹⁾, 张亮亮²⁾, 郭强¹⁾,

贾立城¹⁾, 江文剑¹⁾, 刘佳林¹⁾, 东艳¹⁾

1) 中核集团铀资源勘查与评价重点实验室, 核工业北京地质研究院, 北京, 100029;

2) 核工业二四三大队, 内蒙古赤峰, 024000



内容提要:为查明松辽盆地西南部钱家店凹陷新发现 DL 铀矿带青山口组铀的赋存形式、富集成矿机制及过程, 联合对灰色砂、泥岩矿石开展了系统的岩矿鉴定、扫描电镜观察、能谱及电子探针分析、全岩 U—Pb 同位素定年。结果表明, 砂泥岩矿石属于多物源供给的辫状河流相碎屑岩建造, 成分和结构成熟度均偏差; 矿石中铀均主要以沥青铀矿为主, 其次为含铀钛矿物, 少量含铀碳酸盐矿物, 含铀、锆、硅混合物及吸附态铀。沥青铀矿主要呈胶状、团块状及微粒状产在矿石局部强吸附还原域的杂基、碎屑矿物溶蚀孔洞(隙)或边缘等可赋存空间位置, 且与碳屑有机质、黄铁矿、高岭石和蒙脱石黏土矿物、铁白云石及含钛矿物紧密共(伴)生。目的层总体先后存在弱酸性还原流体和碱性还原热液流体双重铀富集成矿作用; 并通过矿石全岩 U—Pb 同位素定年新获得了 50.6±1.6 Ma、32.2±3.9 Ma、27±4 Ma、26.0±2.7 Ma、23.9±2.8 Ma 等一批成矿年龄, 指示了古近纪期间的主成矿事件。基于区内构造—沉积演化特征, 初步构建了 DL 铀矿带青山口组四阶段的多元流体耦合叠加铀成矿过程: ① 沉积—成岩预富集阶段; ② 嫩江期末构造反转初始成矿阶段; ③ 古近纪热液流体改造成矿阶段; ④ 新近纪叠加改造阶段。该研究对盆地下一步的铀矿找矿和后期地浸开采具有重要指导意义。

关键词:青山口组; 砂—泥岩矿石; 铀的赋存状态; 成矿年龄; 松辽盆地, 钱家店凹陷; DL 铀矿带

松辽盆地西南部钱家店凹陷自 20 世纪 90 年代首次在姚家组发现钱家店矿床(钱Ⅱ)以来, 之后相继发现了宝龙山、钱Ⅲ、钱Ⅳ等大中型砂岩型铀矿(夏毓亮等, 2003; 万军等, 2020)。许多学者对钱家店—宝龙山矿床开展了铀源、构造、沉积、后生蚀变、铀的赋存状态、形成时代、成矿模式及控矿因素等一系列卓有成效的研究(张明瑜等, 2005; 罗毅等, 2012; Bonnetti et al., 2017; Zhao Long et al., 2018; 贾立城等, 2018; 李建国等, 2020; 杨松林, 2020; Rong Hui et al., 2021), 形成了经典的构造剥蚀天窗控矿认识(罗毅等, 2012; Chen Zhenyan et al., 2021)。DL 铀矿带是区内近年来该理论找矿取得的重大新发现, 具有与钱家店—宝龙山矿床较相似的成因(禹宝利等, 2020)。该矿带整体呈北东

向展布, 长约 10 km, 宽 0.5~2 km 不等, 矿体延伸稳定, 规模较大, 目前研究程度较低。有学者已对该矿带上白垩统青山口组含矿层砂岩矿石中铀的赋存状态及矿物组成开展了少量刻画(邓刘敏等, 2021), 但系统研究仍较为薄弱, 对泥岩矿石铀的赋存形式、铀成矿年龄等方面还未有涉及。因此, 笔者等以新发现的 DL 矿带青山口组砂、泥岩矿石为研究对象, 全面开展了铀矿物种类及其共(伴)生关系深入剖析, 较精确厘定了铀成矿年龄, 探讨了区内青山口组多元流体多阶段耦合叠加铀富集成矿机制及过程, 以期为进一步深化砂岩型铀矿成因理论认识和红杂色建造铀的富集机理提供矿物学和年代学约束; 也可为盆地远景区预测和该矿带下一步地浸开采提供重要的参考依据。

注: 本文为中核集团第四批青年英才项目(编号: QNYC2102)、松辽盆地砂岩型铀矿成矿机理与成矿规律研究项目(编号: 2017-1403)和内蒙古通辽市大林地区铀矿普查项目(编号: 201910-1)的成果。

收稿日期: 2021-09-14; 改回日期: 2022-02-18; 网络首发: 2022-03-20; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.03.055

作者简介: 黄少华, 男, 1989 年生, 高级工程师, 博士, 主要从事盆地砂岩型铀矿成矿机理及成矿规律研究; Email: huangshaohua20@126.com。通讯作者: 秦明宽, 男, 1968 年生, 研究员级高级工程师, 博士生导师, 主要从事盆地砂岩型铀矿研究; Email: qinmk9818@163.com。

1 地质背景

1.1 区域地质

钱家店凹陷属于松辽盆地西南部开鲁拗陷内的次级负向构造单位(万军等, 2020), 是一个在海西期褶皱基底上发育起来的中—新生代断拗转换型叠合凹陷(图 1a)。该凹陷呈东北向窄长条带状展布, 长约 100 km, 宽 9~12 km, 面积约 1280 km²(张明瑜等, 2005); 研究区位于其东北部。该凹陷具有与盆地相似的断陷、拗陷和构造反转萎缩的三阶段构造—沉积演化过程(李建国等, 2020); 基底主要为古生代变质岩系, 还包括一些中生代火山岩, 海西期和燕山期花岗岩(Liu Jialin et al., 2020); 盖层二元结构明显, 主要包括下白垩统义县组(K_{1y})、九佛堂组(K_{1jf})、沙海组(K_{1sh})和阜新组(K_{1f}); 上白垩统泉头组(K_{2q})、青山口组(K_{2qn})、姚家组(K_{2y})、嫩江组(K_{2n})、四方台组(K_{2s})和明水组(K_{2m}); 中新

统大安组(N_{1d})和上新统泰康组(N_{2t}), 以及薄层第四系松散沙土堆积物(图 1c); 大面积缺失古近系沉积(王伟等, 2017; 贾立城等, 2018)。区域上, 盆地基底断裂主要发育 NE—NNE、NW、EW 和 SN 向 4 组, 其中以 NE—NNE 向最发育, EW 和 SN 向断裂形成时间较早。研究区主要发育东北向贯穿基底的 F₁ 控凹断裂及其派生的 F₂、F₃ 次级断裂(图 1b), 它们不仅是深部岩浆、热液、油气等物质的上升通道, 而且是地下流体的局部排泄区, 控制着区内辉绿岩、砂岩型铀矿的形成和空间展布(刘汉彬等, 2021)。此外, 架玛吐隆起及后期构造挤压作用形成的白兴吐剥蚀天窗对各矿床的空间定位和保存也具有十分重要的控制作用(杨松林, 2020)。

1.2 矿化特征

松辽盆地西南部钱家店凹陷 DL 铀矿带是区内砂岩型铀矿找矿近年来取得的重大突破, 总体具有与钱家店—宝龙山矿床较相似的成矿地质特征和统

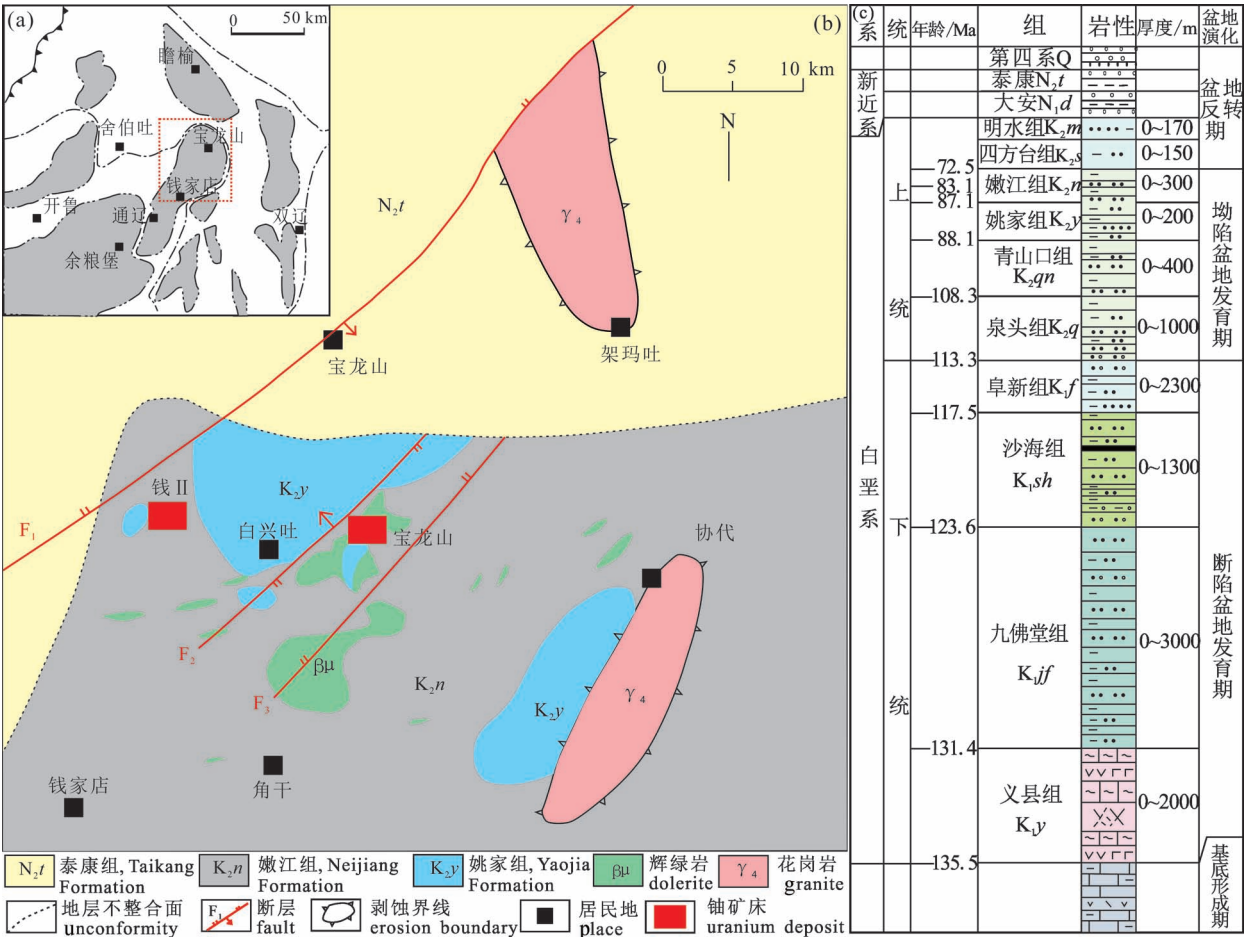


图 1 松辽盆地西南部钱家店凹陷构造位置(a)、铀矿地质(b)和地层柱状图(c)(王伟等, 2017)综合图
Fig. 1 Tectonic location(a), uranium geology(b) and stratigraphic column(c) of the Qianjiadian Sag, southwestern Songliao Basin (modified from Wang Wei et al., 2017&)

一的控矿规律(禹宝利等, 2020)。矿区主要含矿层青山口组是一套半干旱—干旱气候条件下形成的辫状河流相红杂色碎屑岩建造(图 1c), 顶板隔水层为一套厚 8~20 m 较稳定的泛滥平原相红色泥岩隔水层(Chen Zhenyan et al., 2021), 底板隔水层在西侧为下白垩统义县组红色泥岩, 东侧较缺失, 多直接角度不整合超覆于石炭系—二叠系变质岩和架玛吐海西期花岗岩体之上(图 2)。铀矿化主要赋存于上白垩统青山口组, 少量产于上白垩统姚家组, 具体产于氧化还原过渡带之间残留的灰色层中(贾立城等, 2018)。矿体具有多层板状、层状发育特征(图 2), 不发育卷头或翼部矿, 埋深一般在 450~680 m 之间, 厚度为 2~25 m 不等, 平均厚度 6.22 m, 具有由北东往西南逐步加深加厚的趋势(邓刘敏等, 2021); 平均品位为 0.03%, 平米铀量为 1.5~10 kg/m², 少量达 30 多 kg/m², 平均 4.05 kg/m²; 平米铀量是指矿体(层)平面上单位面积内铀金属量, 它是由矿体的品位、矿石密度与厚度组成的一个综合性指标。矿石岩性主要为(浅)灰色砂砾岩、(含砾)粗砂岩及中砂岩, 少量灰色细砂岩和泥岩。此外, 该矿带具有与国内外典型砂岩型铀矿床不同的成矿地质特征: ①纵向上, 青山口组具有独特的“两红夹一灰”的后生蚀变分带特征, 且下氧化带控矿相对更为明显(图 2); ②平面上, 青山口组不具有明显的地球化学分区, 含矿层的绝大多数砂体全部呈红色氧化, 仅少量灰色体呈包裹残留状的北东向展布, 这导致目前对地下水补给渗流方向判别难度较大, 认识并不

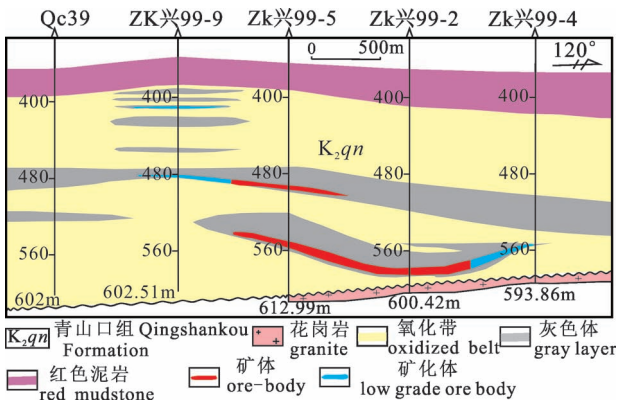


图 2 松辽盆地西南部钱家店凹陷 DL 铀矿带上白垩统青山口组氧化带、灰色层及矿体剖面展布图

Fig. 2 Profile of oxidation zone, gray layer and ore body from the Upper Cretaceous Qingshankou Formation in the DL uranium mineralized belt of the Qianjiadian Sag, southwestern Songliao Basin

统一, 也一定程度影响了找矿方向的预测; ③底部第一层主矿体厚大(图 2), 其规模及延伸稳定性最好, 而上部的几层矿体多呈鸡窝状、规模较小; ④相当一部分主矿体直接产于变质岩或花岗岩等基岩上部约 10~20 m 的青山口组灰色层中(图 2), 并不发育底板泥岩隔水层。

2 样品采集和分析

本次在钱家店凹陷 DL 铀矿带不同钻孔中采集了矿石样品共 24 个, 岩性包括不同粒度的灰色、浅灰色砂岩和灰色泥岩。野外首先对这些样品进行了详细的岩性观察、照相及描述; 之后, 室内分别磨制了光薄片和适合扫描电镜观察的块样(长、宽、高均约为 1 cm); 同时, 对 18 件样品依次进行了碎样、Ra 测试和全岩 U—Pb 同位素测年。最后, 利用偏光显微镜对光薄片进行大量的岩矿鉴定, 圈定出疑似铀矿发育部位; 并与块样一起进行了扫描电镜观察、能谱半定量分析和电子探针定量分析。其中, ZEISS sigma300 型高分辨率场发射扫描电镜的加速电压为 20 kV, 工作距离为 10 mm, 二次电子(SE)成像分辨率: 低真空, 1.5 nm, 30 kV, 高真空, 1.0 nm, 15 kV; 背散射条件: 30 kV 时优于 1.5 nm, 10 kV 优于 3.5 nm, 放大倍率范围: 20~1000000 倍; 能谱仪型号为 OXFORD X-MAX80, 脉冲处理器档位为 275 kcps, 输入计数率在 300~450 cps 之间, 分析元素范围为 Be—U。电子探针仪器型号为 JXA-8100, 加速电压为 20 kV, 加速电流为 10 nA, 束斑直径为 2~5 μm, 采用波谱分析方式; U-Pb 同位素测试仪器型号为 ISOPROBE-T 热表面电离质谱仪和 Phoenix 热表面电离质谱仪; 镭(Ra)元素测试仪器型号为 PC-2100 氢(镭)分析仪, 检测方法和依据为 GB/T 13073-2010《岩石样品中²²⁶Ra 的分析方法放射气法》, 以上样品处理和分析测试均在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。

3 结果分析

3.1 矿石岩石、矿物学特征

野外观察发现, 矿区青山口组矿石大部分为灰色、灰白色等冷色调的不同粒级砂岩(图 3a、b), 少数为冷色调的泥岩和砂砾岩(图 3c)。其中, 砂岩矿石岩性主要为浅灰色、灰色(含砾)粗砂岩, 其次为砂砾岩和细砂岩, 少量中砂岩。宏观上, 砂岩矿石一般胶结较疏松—疏松(图 3a、b), 透水性好, 泥质杂基充填, 少量钙质胶结致密; 其分选性中等—较好,

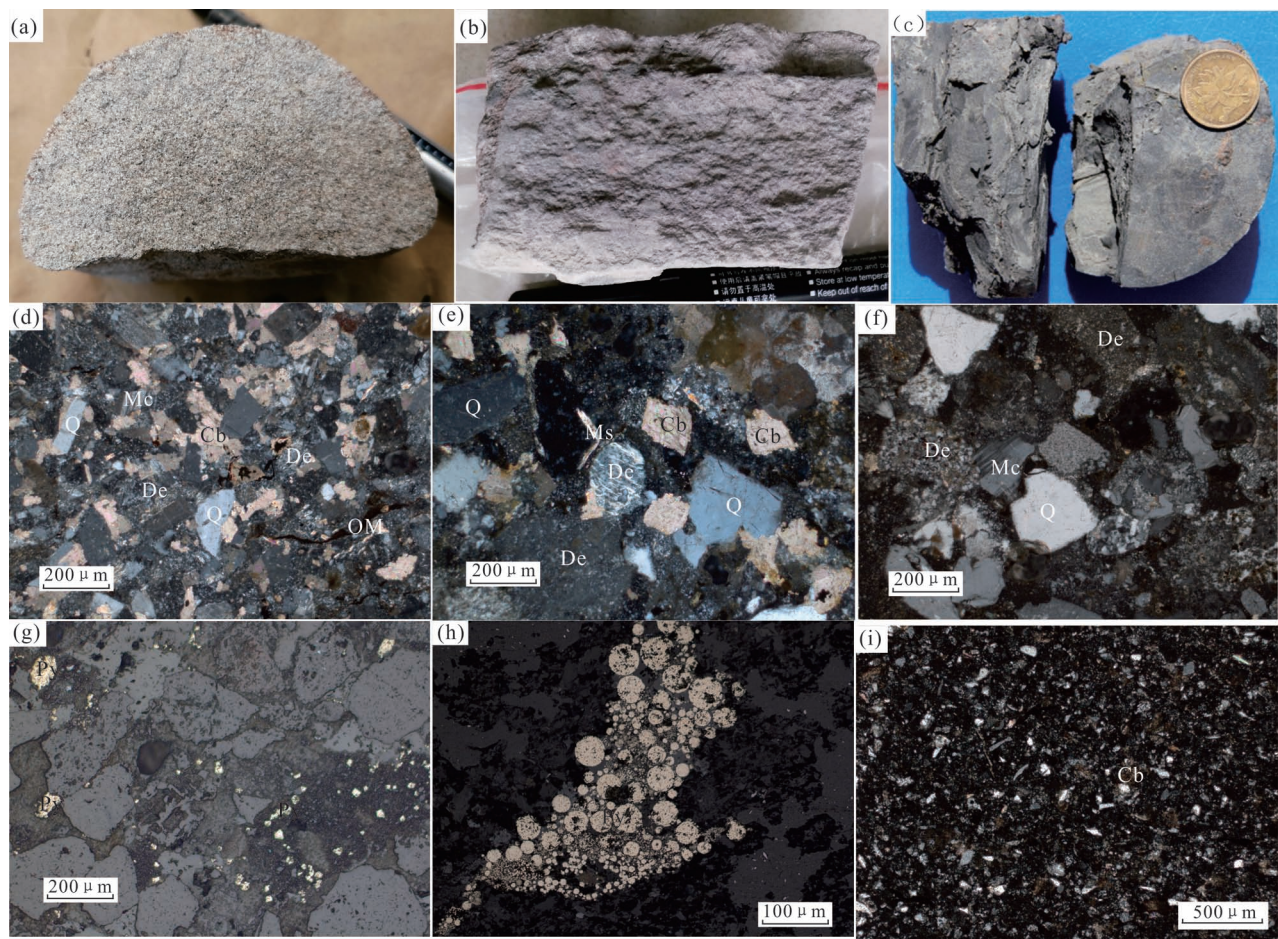


图3 松辽盆地西南部钱家店凹陷 DL 铀矿带上白垩统青山口组不同岩性矿石宏观及微观特征

Fig. 3 Macro and microscopic characteristics of ores with different lithology from the Upper Cretaceous Qingshankou Formation in the DL uranium mineralized belt of the Qianjiadian Sag, southwestern Songliao Basin

(a) 浅灰色粗砂岩矿石,分选性较好,99-5,488.85 m;(b) 灰色细砂岩矿石,135-1,680 m;(c) 深灰色泥岩矿石,19-17,559 m;(d) 岩屑砂岩,含碳酸盐、有机质,135-1;(e) 岩屑砂岩,含碳酸盐,97-5-1,5475 m;(f) 岩屑砂岩,97-5-3,546 m;(g) 分散胶状黄铁矿,97-5-1;(h) 草莓状黄铁矿集合体,135-1;(i) 泛滥平原相含碳酸盐结核体的粉砂质泥岩,19-11,563.2 m;Q—石英;De—岩屑;OM—有机质;Cb—碳酸盐矿物;Ms—白云母;Py—黄铁矿;Mc—微斜长石

(a) Light gray coarse sandstone ore with well sorting, 99-5,488.85 m;(b) gray fine sandstone ore, 135-1, 680 m;(c) dark gray mudstone ore, 19-17, 559 m;(d) lithic sandstone, containing carbonate and organic matter, 135-1;(e) lithic sandstone with carbonate, 97-5-1, 5475 m;(f) lithic sandstone, 97-5-3, 546 m;(g) dispersed colloidal pyrite, 97-5-1;(h) pyrite framboid, 135-1;(i) silty mudstone, 19-11, 563.2 m. Q—quartz;De—rock fragments;OM—organic matter;Cb—carbonate;Ms—muscovite;Py—pyrite;Mc—microcline

磨圆度中等—偏差,碎屑成分由石英、火山岩屑和长石组成,成分成熟度偏低,属于长石岩屑砂岩(张宾等,2020);砂岩矿石通常发育较强烈的白色高岭石化(图3a),局部肉眼可见少量细分散状、团块状、(短)条带状的碳屑,但很少见黄铁矿,还原容量一般。泥岩矿石分布较少,主要呈深灰色(图3c)、灰色,块状致密,透水性差,后生蚀变弱;内部有时见较多杂乱分布的黑色碳质碎屑,沿层理面发育,偶见细粒黄铁矿,具较高的还原容量(丁波等,2020)。微观上,砂岩矿石碎屑多呈次棱角状(图3d),单晶石

英和中酸性火山岩屑含量高(图3d—f),长石主要为聚片双晶斜长石(图3d)、格子双晶的微斜长石和具条纹双晶的条纹长石(图3f),少量条带状白云母压实变形(图3e);颗粒间多为点—线接触,颗粒支撑结构,呈孔隙—接触式胶结;同时,砂岩中常发育较多分散状的自形—半自形碳酸盐矿物(图3d,e),成分主要为白云石和铁白云石,且对碎屑颗粒具有一定的交代作用(图3e),指示了其生成因;岩石中局部还可见浸染状或短条带状的有机质;黄铁矿含量较少,其形貌及分布特征主要有两种:一种为分

散的胶状黄铁矿(图 3g),另一种为草莓状黄铁矿(图 3h);局部可见大量胶状黄铁矿集合体呈胶结形式产出。镜下特征显示,泥岩矿石具有与砂岩相似的碎屑物质组成,主要为石英和火山岩屑(图 3i),其次为长石,成分成熟度和结构成熟度均较低,指示其为泛滥平原相沉积成因(贾立城等, 2018);内部常含较多细分散状的碳屑及少量黄铁矿和碳酸盐矿物。

3.2 泥岩矿石铀的赋存形式

扫描电镜观察及能谱分析结果显示,泥岩矿石中的铀主要为沥青铀矿,其次为含铀钛矿物,少量吸附态铀(图 4);其中,沥青铀矿多呈非晶态胶状形式产于钾长石、岩屑等碎屑颗粒的溶蚀孔洞(隙)和杂基中(图 4a、b),部分呈弥散状吸附沉淀在高岭石等黏土矿物粒间孔隙(图 4c);其次,局部可见大量沥青铀矿与成矿期细粒状黄铁矿密切伴生,并穿插成岩期缓慢形成的粒径较大的矿前草莓状黄铁矿(图

4d);部分含砂泥岩矿石还遭受了一定的后期流体改造,可见早期形成于长石孔隙中沥青铀矿被更晚期的黄铁矿完全包裹(图 4e),部分沥青铀矿赋存在热液成因铁白云石的边部,而相对晚期的矿后黄铁矿周边不含铀(图 4f)。含铀钛矿物通常晶体形态差,其中铀与钛含量呈“此消彼长”的关系,镜下亮白色铀与灰色钛呈杂乱交织显示(图 4g)。

3.3 砂岩矿石铀的赋存形式

根据扫描电镜观察、能谱及电子探针分析结果得出,砂岩矿石中铀也主要是以沥青铀矿的形式存在,其次为含铀钛矿物,少量含铀、锆、硅混合物,含铀碳酸盐矿物和吸附态铀(图 5)。背散射图像显示,铀主要与有机质、黏土矿物、黄铁矿、铁白云石及含钛矿物关系密切,但并不与具体某种物质呈严格的相关关系。其中,砂岩中可见两种有机质(图 5a),早期深灰色有机质属于沉积成因碳质碎屑(Rong Hui et al., 2021),内部常含较多沥青铀矿

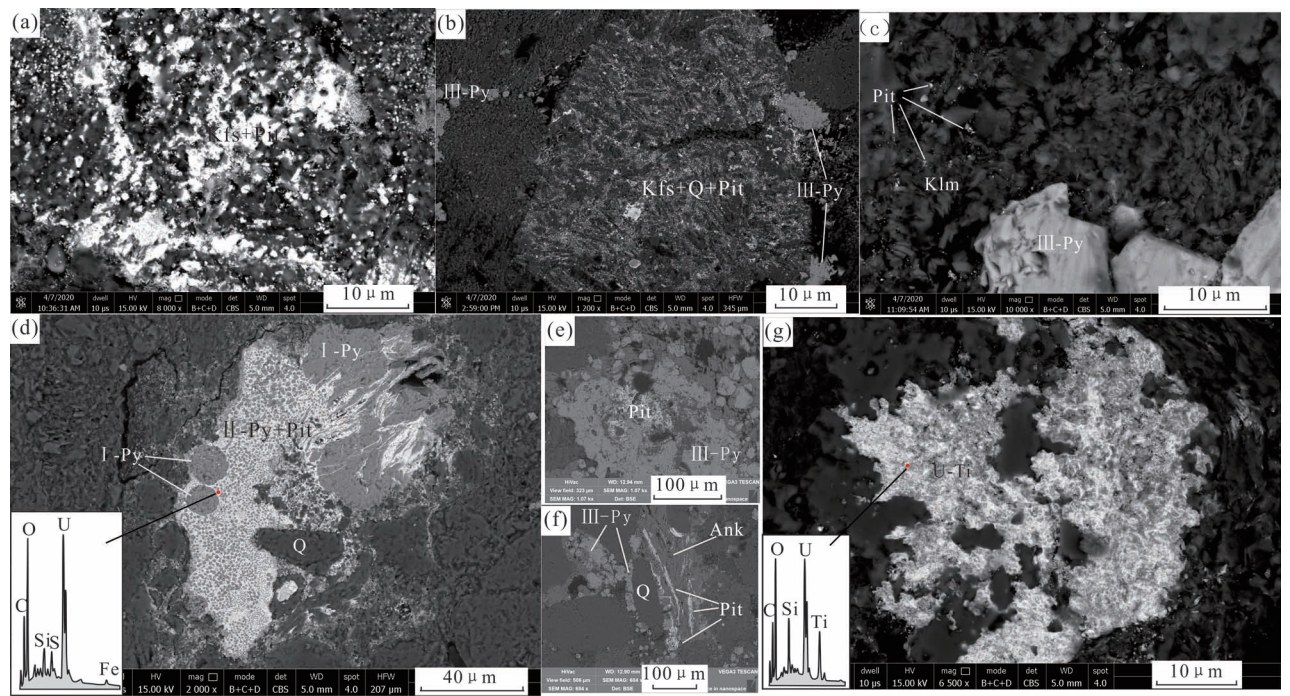


图 4 松辽盆地西南部钱家店凹陷 DL 铀矿带上白垩统青山口组泥岩矿石中铀的赋存形式

Fig. 4 Uranium occurrence for the mudstone ore of the Upper Cretaceous Qingshankou Formation in the DL uranium mineralized belt of the Qianjiadian Sag, southwestern Songliao Basin

(a) 钾长石孔隙中的沥青铀矿;(b) 钾长石、石英细颗粒与沥青铀矿;(c) 高岭石粒间产沥青铀矿;(d) 铀与黄铁矿细颗粒共生,包裹早期草莓状黄铁矿;(e) 黄铁矿包裹早期沥青铀矿;(f) 铁白云石周边含铀,伴生黄铁矿;(g) 含铀、钛的混合物。Pit—沥青铀矿;Kfs—钾长石;Q—石英;Py—黄铁矿;Klm—高岭石;Ank—铁白云石

(a) Pitchblende occurred in pores of potassium feldspar;(b) pitchblende associated with fine potassium feldspar and quartz;(c) pitchblende existed within the kaolinite intergranular;(d) pitchblende associated with ore-stage pyrite, wrapped by pre-ore pyrite framboids;(e) pyrite wrapped early pitchblende;(f) pitchblende occurred around the ankerite, and associated with pyrite;(g) U—Ti bearing mixtures. Pit—pitchblende; Kfs—potassium feldspar; Q—quartz; Py—pyrite; Klm—kaolinite; Ank—ankerite

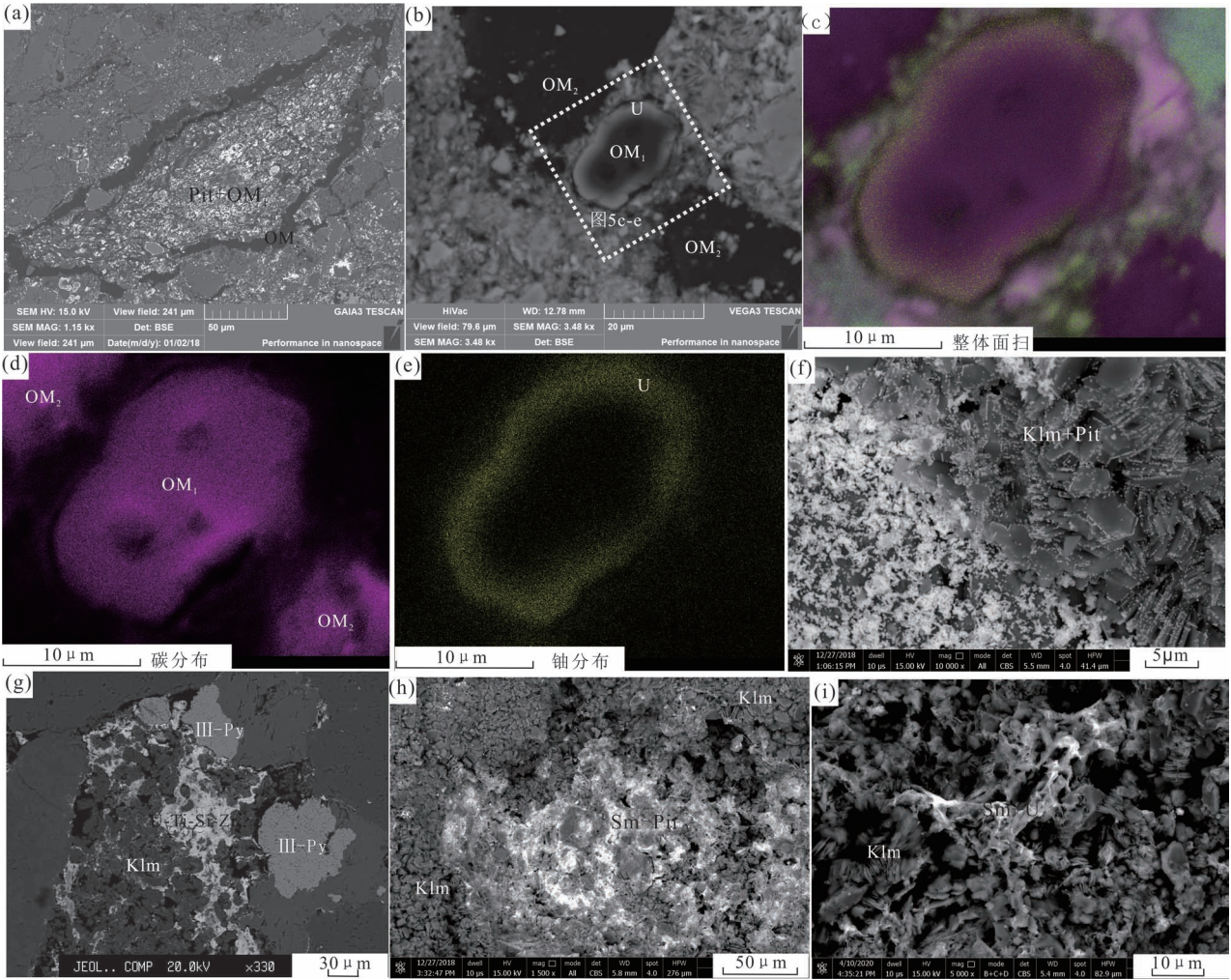


图 5 松辽盆地西南部钱家店凹陷 DL 铀矿带上白垩统青山口组砂岩矿石铀—有机质—黏土矿物赋存关系

Fig. 5 Occurrence relationship between uranium, organic matter and clay minerals for sandstone ore of the Upper Cretaceous

Qingshankou Formation in the DL uranium mineralized belt of the Qianjiadian Sag, southwestern Songliao Basin

(a) 早期碳屑有机质内部含大量沥青铀矿,被晚期有机质包裹;(b—e) 碳屑颗粒边缘含沥青铀矿;(f) 书页状高岭石边缘赋存沥青铀矿;(g) 书页状高岭石粒间产含铀、钛、锆、硅的胶状混合物,伴生胶状黄铁矿;(h) 蜂窝状蒙脱石含沥青铀矿;(i) 絮状蒙脱石边缘吸附铀。Pit—沥青铀矿;OM—有机质;Py—黄铁矿;Sm—蒙脱石;Klm—高岭石

(a) Pitchblende coexists with carbonaceous debris, wrapped within late homogeneous organic matter;(b—e) pitchblende occurred around the carbonaceous debris;(f) pitchblende existed on the edge of leaf-shape kaolinite;(g) U—Ti—Zr—Si mixtures developed within the intergranular of book-like kaolinite, associated colloidal pyrite;(h) pitchblende occurred around the honeycomb montmorillonite;(i) pitchblende existed on the edge of flocculent montmorillonite. Pit—pitchblende;OM—organic matter;Py—pyrite;Sm—montmorillonite;Klm—kaolinite

(图 5a),有的边缘含较多弥散状铀(图 5b—e),往内部逐渐减少,它们均是原生沉积碳屑在成矿阶段对地下水中铀吸附还原沉淀的(谢惠丽等, 2020);另一种有机质常呈暗黑色浸染状、条带状或团块状分布(图 5a—b),有时候包裹在早期碳质碎屑周边,其内部常不含铀,可能是早期碳屑在后期受热改造变质形成的沥青质(Kochkin, 2020)。矿石中铀与黏土矿物关系显示,有的沥青铀矿呈微纳米级球状产在片状六方形高岭石的边部(图 5f)或书页状高

岭石的粒间,还可见热液成因非晶态含铀、锆、钛混合物与书页状高岭石密切共生(图 5g),呈港湾状产出;而有的沥青铀矿则只赋存于长石发生碱性蚀变的絮状、蜂窝状次生蒙脱石中,而周边的高岭石不含铀(图 5h);表明砂岩可能具有不同酸碱性和不同温度流体多阶段成矿作用(刘章月等, 2016; 李建国等, 2020)。此外,可见少量铀仅被吸附在絮状蒙脱石表面(图 5i),边部书页状高岭石却不吸附铀,显示出蒙脱石较高岭石具有更高的吸附铀的能力(丁

波等, 2020)。

根据黄铁矿与铀矿之间的关系(Bonnetti et al., 2017), 砂岩矿石中也存在成矿前、成矿期和成矿期后三期不同类型的黄铁矿(图 5、图 6)。背散射图像结果显示, 矿前黄铁矿形成于沉积成岩期, 含量少, 主要呈草莓状, 其次为少量细分散的胶状, 其边部通常不含或少含铀; 矿期黄铁矿与铀关系密切, 可见亮白色胶状沥青铀矿内部包裹一些细粒胶状黄铁矿(图 6a), 两者呈先后析出或交代的关系。矿后期黄铁矿含量高, 主要呈胶状, 边部均不含铀或包裹早期形成的铀矿物(图 5g、图 6b)。矿石中铀与热液成因铁白云石关系密切是其与国内其它矿区铀赋存形式不同的一大显著特征, 镜下可见大量胶状沥青铀矿产于铁白云石边部(图 6b)或细粒自形石英颗粒表面(图 6c), 有的还形成了自形富铀碳酸盐矿物(图 6c), 并在周边伴生含铀的高岭石(图 5f); 这亦是后期富 CO₂ 碱性热液流体改造的结果(Ma Pengjie et al., 2021)。此外, 矿石中还含较多含铀钛矿物, 部分还保留了锐钛矿的原生网格状、柱状晶

体结构(图 6d), 部分发生了铀自边缘往内部逐渐交代的作用(图 6e)。因此, 早期蚀源区母岩经风化、搬运、沉积形成的含钛矿物(如锐钛矿、钛铁矿或金红石)在过渡带成矿阶段的还原环境下对含铀含氧水中的铀发生较低温吸附—还原—交代作用是其富铀机制之一(Pointer et al., 1989; 丁波等, 2020); 可能也含少量热流体作用形成的钛铀矿。

进一步的电子探针测试结果显示(表 1), 砂岩矿石中沥青铀矿的 UO₂ 为 69.53%~71.71%, SiO₂ 为 1.42%~2.18%, CaO 为 1.71%~3.12%, P₂O₅ 为 1.46%~1.56%, ZrO₂ 含量为 4.48%~5.59%, TiO₂ 为 1.67%~1.91%; 此外还含痕量的 Al₂O₃、FeO、MnO 等杂质。此次电子探针成分分析总量为 84.71%~87.06%, 总量偏低, 具体原因见文献谢惠丽等(2020)。

3.4 铀成矿时代

盆地砂岩型铀矿一般形成于动态的低温开放系统, 铀的化学沉淀富集方式与热液型铀矿完全不同, 前苏联称之为水成铀矿床(Kochkin, 2020)。该类

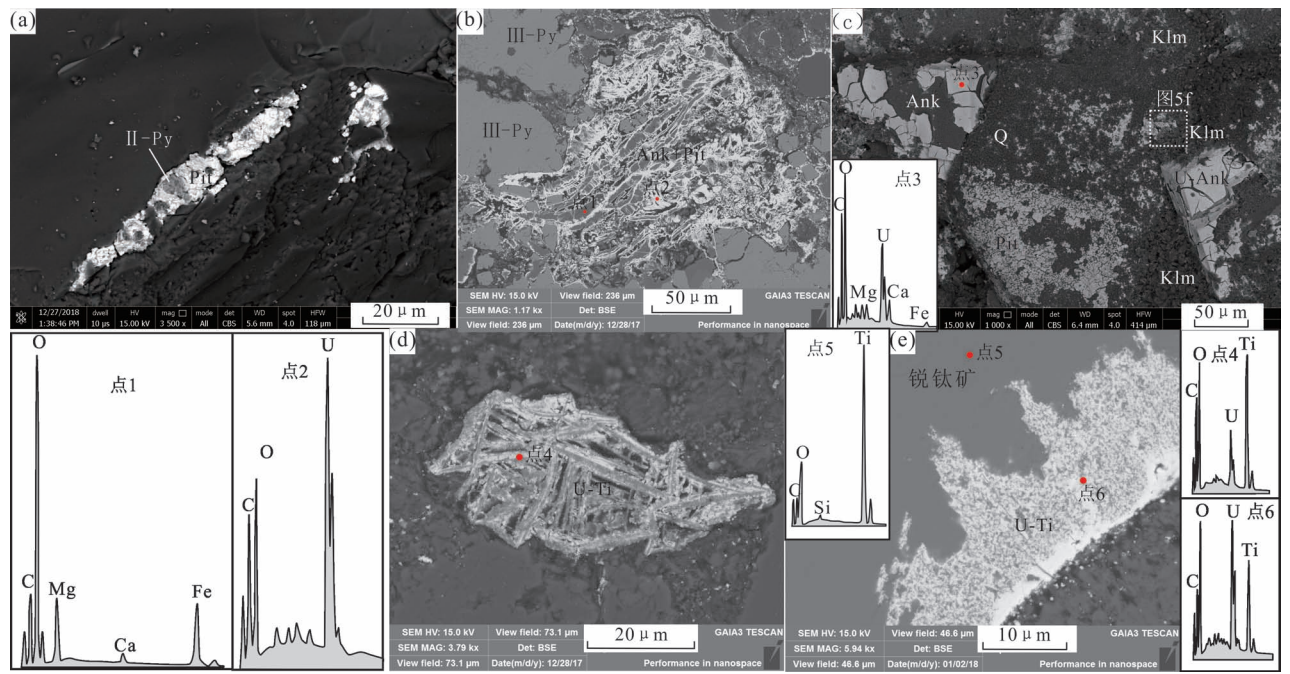


图 6 松辽盆地西南部钱家店凹陷 DL 铀矿带上白垩统青山口组砂岩矿石铀—黄铁矿—铁白云石—含钛矿物的赋存关系
Fig. 6 Occurrence relationship of uranium, pyrite, ankerite, titanium bearing minerals from sandstone ores of the Upper Cretaceous Qingshankou Formation in the DL uranium mineralized belt of the Qianjiadian Sag, southwestern Songliao Basin
(a) 沥青铀矿与矿期黄铁矿交织共生; (b) 铁白云石周边产沥青铀矿; (c) 自形含铀铁白云石; (d) 含铀锐钛矿; (e) 铀自边缘往内部逐渐交代锐钛矿。Pit—沥青铀矿; Pit—沥青铀矿; Q—石英; Py—黄铁矿; Klm—高岭石; Ank—铁白云石
(a) Pitchblende coexistence with ore-stage pyrite; (b) pitchblende occurred on the edge of ankerite; (c) automorphic uranium bearing iron dolomite; (d) uranium bearing anatase; (e) anatase gradually metasomatized by uranium from the edge to the inside. Pit—pitchblende; Q—quartz; Py—pyrite; Klm—kaolinite; Ank—ankerite

表 1 松辽盆地西南部钱家店凹陷 DL 铀矿带上白垩统青山口组
铀矿物电子探针测试结果 (%)

Table 1 EPMA results (%) of uranium minerals form the Upper Cretaceous Qingshankou Formation in the DL uranium mineralized belt in the Qianjiadian Sag, southwestern Songliao Basin									
样号	测点	Al ₂ O ₃	FeO	UO ₂	Na ₂ O	MgO	TiO ₂	Y ₂ O ₃	SiO ₂
ZKX97-5-1	1	0.41	0.26	71.71	1.01	0.13	1.81	0.11	1.42
	2	0.57	0.44	70.18	1.03	0.09	1.67	0.16	2.18
	3	0.27	0.37	69.53	1.23	0.11	1.91	0.06	1.48
样号	测点	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	CaO	MnO	P ₂ O ₅	SO ₃	ZrO ₂	总量
ZKX97-5-1	1	0.17	0.10	2.97	0.13	1.46	0.14	5.13	87.06
	2	/	0.12	1.71	0.08	1.56	0.44	4.48	84.71
	3	/	0.16	3.12	0.19	1.47	0.78	5.59	86.27

型矿床成矿在地质历史过程中既具有长期连续性,又具备幕式性,矿石始终遭受了后期流体的不断改造作用,U—Pb 体系处于不完全封闭状态,铀、铅同位素处于或捕获或丢失状态 (Golubev et al., 2013),其成矿年龄的厘定一直是一个世界难题 (Corcoran et al., 2020)。目前,砂岩铀矿定年总体上存在两种方法 (张晓等, 2020; 林效宾等, 2020): ①全岩或单矿物的 U—Pb 同位素溶蚀法 (TIMS), 即稀释—热电离质谱测年; ②原位微区测年: 包括电子探针 (EMPA)、激光剥蚀电感耦合等离子质谱 (LA-ICP-MS)、二次离子质谱 (SIMS)。然而, 由于矿石品位低、单矿物挑选困难且颗粒小、铀矿物内部元素和同位素分布不均一性、基体效应等诸多因素影响, 原位微区定年方法当前仍存在较大的不确定性和难于操作性, 技术应用还不太成熟。因此, 利用传统的基于铀—镭平衡校正铀含量以消除铀迁移的全岩 U—Pb 同位素溶蚀法定年仍不失为一种较好的测年方法选择 (夏毓亮等, 2003); 它一定程度上

消除了近代地下流体改造对成矿时代的影响, 获得的年龄相对更切合地质事实 (黄少华等, 2020), 也是目前应用范围最广、效果较好的定年技术。

本次对采自 DL 矿带 3 口钻孔的 18 个砂岩矿石样品开展了全岩铀—铅同位素定年, 铀、镭及同位素测试结果见表 2。由表 2 可得, 砂岩矿石铀的非均质性强, 含量为 $(62.9 \times 10^{-6} \sim 6186 \times 10^{-6})$, Pb 含量为 $(13.1 \times 10^{-6} \sim 75.3 \times 10^{-6})$, Ra 含量变化较大, 为 $0.983 \sim 49.9 \text{ Bq/g}$, $n(^{238}\text{U})/n(^{204}\text{Pb})$ 为 $253.786 \sim 15115.86$, $n(^{208}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 为 $38.68 \sim 38.806$, $n(n(^{207}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb}))$ 为 $15.736 \sim 20.399$, $n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 为 $20.844 \sim 104.031$ 。通过对钻孔 ZK 兴 97-7 的 1、2、7、9、11、14 样品未进行 Ra 校正拟合得出了 $32.2 \pm 3.9 \text{ Ma}$ 的 U—Pb 等时线年龄, MSWD 为 1.4, 年龄相对较可靠, 是始新世末—渐新世初的成矿响应 (图 7a); 通过对钻孔 ZK 兴 125-9-12 的 1、2、3、4 号样品不进行 Ra 校正拟合得出相对更年轻的 $23.9 \pm 2.8 \text{ Ma}$ 的 U—Pb 等时线年龄 (图 7a、b), MSWD 为 1.8, 数据较可靠, 是渐新世末构造隆升事件下的铀成矿作用; 进一步联合对钻孔 ZK 兴 125-9-11 的 1、3、4、5 样品和 ZK 兴 125-9-12 的 3、4 样品进行 Ra 校正后拟合得出 $50.6 \pm 1.6 \text{ Ma}$ 的 U—Pb 等时线年龄 (图 7c), 指示了始新世早期的成矿作用。

与此同时, 林效宾等 (2020) 认为可以进一步利用 $n(^{238}\text{U})-n(^{206}\text{Pb})$ 和 $n(^{235}\text{U})-n(^{207}\text{Pb})$ 等时线年龄、 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 、 $n(^{207}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 图解及初始铅同位素组成等指标对成矿年龄地质意义进行

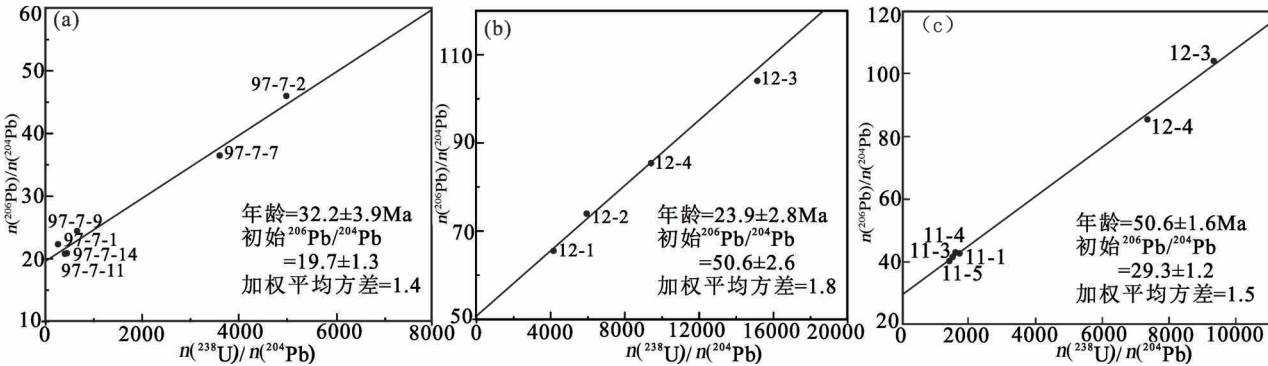


图 7 松辽盆地西南部钱家店凹陷 DL 铀矿带上白垩统青山口组砂岩铀成矿等时线年龄

Fig. 7 Isochron ages of sandstone ores for the Upper Cretaceous Qingshankou Formation in the DL uranium mineralized belt of the Qianjiadian Sag, southwestern Songliao Basin

表 2 松辽盆地西南部钱家店凹陷 DL 铀矿带上白垩统青山口组矿石全岩 U-Pb 同位素测试结果

Table 2 U-Pb isotopic results of whole ores from the Upper Cretaceous Qingshankou Formation in the DL uranium mineralized belt of the Qianjiadian Sag, southwestern Songliao Basin

钻孔	岩性	深度 (m)	序号	样号	U ($\times 10^{-6}$)	Pb ($\times 10^{-6}$)	Ra (Bq/g)	$\frac{n(^{238}\text{U})}{n(^{204}\text{Pb})}$	$\frac{n(^{208}\text{Pb})}{n(^{204}\text{Pb})}$	$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{204}\text{Pb})}$	$\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{204}\text{Pb})}$
ZK 兴 97-7	灰白色中砂岩	495.4	1	97-7-1	62.9	16.7	1.59	253.786	38.74	15.736	22.325
	灰白色中砂岩	494.7	2	97-7-2	1318	23.4	9.63	4986.509	38.68	17.056	46.017
	灰色含砾粗砂岩	493.9	3	97-7-4	793	16.8	8.25	4307.89	38.772	17.112	48.607
	灰色粗砂岩	492.8	4	97-7-6	5088	35.4	43.9	14598.48	38.722	17.692	60.201
	灰色泥砾岩	492.7	5	97-7-7	1660	36.8	18.4	3607.261	38.752	16.432	36.573
	灰白色粗砂岩	492.1	6	97-7-9	199	21.1	2.11	652.237	38.72	15.913	24.438
	灰白色粗砂岩	491.1	7	97-7-11	81.1	13.1	0.983	408.436	38.799	15.787	20.844
	灰白色粗砂岩	490.3	8	97-7-14	115	17.2	1.43	442.365	38.806	15.801	20.899
ZK 兴 125-9-11	灰白色粗砂岩	576~577	9	11-1	523	17.5	4.41	2556.61	38.695	17.012	42.655
			10	11-2	412	20.6	4.56	1680.521	38.687	16.939	40.762
			11	11-3	535	18.9	4.22	2398.204	38.708	17.055	41.525
			12	11-4	492	19.5	4.55	2175.173	38.7	17.098	42.968
			13	11-5	573	19.7	4.2	2435.111	38.708	17.078	40.239
ZK 兴 125-9-12	灰黑色细砂岩	622~624	14	12-1	2935	75.3	25.9	4152.864	38.716	18.424	65.5
			15	12-2	3755	72.1	32.6	5938.708	38.73	18.627	73.966
			16	12-3	6186	57.9	47.4	15115.86	38.723	20.399	104.031
			17	12-4	3527	46.7	34.2	9407.535	38.754	19.317	85.399
			18	12-5	5751	50.3	49.9	13239.09	38.737	18.516	75.924

注:铀镭校正公式 $K_p = Ra / (U \times 3.4 \times 10^{-7})$ 。

综合判定,之后利用“平行”等时线方法理论上可计算出更准确的砂岩成矿年龄。本次通过该处理方法重新对钻孔 ZK 兴 97-7 的 6、11、14 号样品进行 Ra 校正后拟合得出了 $n(^{238}\text{U})-n(^{206}\text{Pb})$ 和 $n(^{235}\text{U})-n(^{207}\text{Pb})$ 等时线年龄为 $26.0 \pm 2.7\text{ Ma}$ 、 $27.0 \pm 4.0\text{ Ma}$ (表 3,图 8);对 125-9-11-3 号和 125-9-12-5 号样品进行 Ra 校正后拟合得出了 $n(^{238}\text{U})-n(^{206}\text{Pb})$ 和 $n(^{235}\text{U})-n(^{207}\text{Pb})$ 等时线年龄为 $28.7 \pm 3.5\text{ Ma}$ 、 $26.2 \pm 5.3\text{ Ma}$ (表 3,图 8)。以上所有的 $n(^{238}\text{U})-n(^{206}\text{Pb})$ 和 $n(^{235}\text{U})-n(^{207}\text{Pb})$ 年龄基本一致,可靠性较好,均代表了始新世中晚期的成矿。

4 讨论

4.1 多元流体铀富集机制

砂泥岩矿石铀的赋存状态研究表明,DL 矿带青山口组地质历史中存在不同性质的多元流体叠加铀富集成矿作用。泥岩通常在压实固结成岩后胶结致密(图 3c),不透水,后期流体改造弱,更能代表目的层沉积—成岩阶段的铀沉淀富集机制(秦明宽等,2017)。本次泥岩矿石中的铀大多呈细分散状分布在蚀变钾长石和火山岩屑表面或孔洞(孔隙)中(图 4a,b),可见书页状高岭石发育且局部吸附含铀(图 4c),且沥青铀矿与矿期黄铁矿密切共(伴)生(图 4d);以上这些均指示了青山口组灰色泥岩在沉积—成岩过程中发生了弱酸性还原孔隙流体控制的铀吸附还原沉淀作用(图 9),即沉积碳屑有机质在

表 3 松辽盆地西南部钱家店凹陷 DL 铀矿带上白垩统青山口组成矿年龄统计表

Table 3 Metallogenic ages for the Upper Cretaceous Qingshankou Formation of the DL uranium mineralized belt of the Qianjiadian Sag, southwestern Songliao Basin

序号	样品	$n(^{238}\text{U})/n(^{204}\text{Pb})-n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 等时线		$n(^{235}\text{U})/n(^{204}\text{Pb})-n(^{207}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 等时线	
		年龄 (Ma)	$\left[\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{204}\text{Pb})}\right]_m$	年龄 (Ma)	$\left[\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{204}\text{Pb})}\right]_m$
I	97-7-6、97-7-11、97-7-14	26.0 ± 2.7	19.17 ± 0.26	27.0 ± 4.0	15.7 ± 0.11
II	11-3、12-5	28.7 ± 3.5	34.7 ± 1.2	26.2 ± 5.3	16.77 ± 0.21

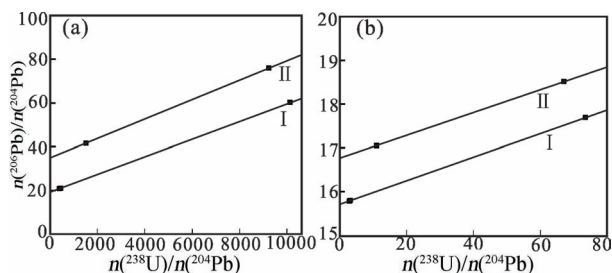


图8 松辽盆地西南部钱家店凹陷 DL 铀矿带上白垩统青山口组 $n(^{238}\text{U})-n(^{206}\text{Pb})$ (a) 和 $n(^{235}\text{U})-n(^{207}\text{Pb})$ (b) 年龄图解

Fig. 8 $n(^{238}\text{U})-n(^{206}\text{Pb})$ (a) and $n(^{235}\text{U})-n(^{207}\text{Pb})$ (b) ages for the Upper Cretaceous Qingshankou Formation in the DL uranium mineralized belt of the Qianjiadian Sag, southwestern Songliao Basin

此埋藏压实过程中发生了厌氧菌硫酸盐还原作用 (BSR), 生成了有机酸、 CH_4 、 H_2S 等酸性还原流体, 导致了长石、岩屑等碎屑酸性溶蚀 (张宾等, 2020), 高岭石生成以及黄铁矿和铀矿的先后还原沉淀 (Goswami et al., 2017)。相应的, 这一铀预富集作用也会在青山口组灰色含碳屑砂体中发生。

砂岩矿石镜下可见书页状高岭石普遍发育 (图 5h), 其中大量沥青铀矿多赋存在长石、岩屑溶蚀孔隙或孔隙中 (图 5a), 有的与碳屑有机质 (图 5a—e)、书页状高岭石 (图 5f、g)、胶状细粒黄铁矿 (图 6a) 共 (伴) 生关系密切; 尽管很难获取它们的具体成矿时间, 但以上现象表明砂岩中至少发生过一期与弱酸性还原流体有关的铀沉淀富集作用 (李建国等, 2020)。根据区内构造—沉积演化特征, 推测砂岩中酸性还原流体具有两种来源: ①同沉积—成岩阶段和晚期成矿阶段本身碳屑有机质微生物降解生成的有机酸; ②嫩江期末和明水期末两期强构造挤压作用导致深部酸性烃类流体逸散渗出 (Zhao Long et al., 2018), 这也是区内矿带主要发育在高岭石含量变化梯度带上的重要原因之一。

扫描电镜结果表明, 砂岩矿石和含砂泥岩矿石中均存在一期明显的碱性还原热液流体叠加改造成矿作用 (Ding Bo et al., 2020), 时间晚于酸性还原流体成矿; 其证据主要有: 可见亮白色沥青铀矿大量富集在热液成因铁白云石边缘 (图 4f, 6b), 有的形成了自形含铀碳酸盐矿物 (图 6c), 并与早期形成的高岭石—沥青铀矿组合共 (伴) 生 (图 6c); 周边钾长石常发生了蒙脱石化或伊利石化, 且可见细粒自

生石英颗粒及次生蒙脱石表面富铀 (图 5h、i, 6c); 热液成因胶状黄铁矿包裹早期富集在钾长石孔隙的沥青铀矿 (图 4e); 吸附沉淀在书页状高岭石的早期铀矿物被碱性热液改造形成港湾状分布的含铀、锆、硅、钛的混合物 (图 5g); 电子探针分析结果也显示 (表 1), 沥青铀矿均含一定量的 ZrO_2 。该期富集成矿作用主要与区内古近纪期间基性岩浆岩侵入形成辉绿岩事件有关 (刘汉彬等, 2021)。其机制主要为岩浆期后富 CO_2 碱性还原流体渗出至青山口组含矿砂体中, 对其中的石英、黑云母、钾长石、锆石、磷灰石、含钛矿物等各类碎屑发生了压熔作用, 致使大量 Fe、Mg、Mn、P、Zr、Ti、Si 等离子进入热液流体中 (Pointer et al., 1989; René, 2008; Ming et al., 2016; Ma Pengjie et al., 2021; 丁波等, 2021), 并导致早期铀矿溶解度增强, 重新溶解形成碳酸铀酰离子; 随着温度、碱度和 CO_2 逸度的逐渐降低, 自生石英细粒、次生成因蒙脱石或伊利石、铁白云石、富铀碳酸盐矿物、沥青铀矿、U—Zr—Si—Ti 混合物 (René, 2008)、矿后黄铁矿等相继生成 (Rong Hui et al., 2021)、沉淀共 (伴) 生富集 (图 9)。此外, 热事件还会导致砂体中原生碳屑的热降解排烃, 生成暗黑色沥青质 (图 5a、b) 和还原性气体 (刘章月等, 2016), 进一步促进铀的就地沉淀富集。

4.2 青山口组多阶段铀成矿过程

基于本次砂泥岩矿石铀的赋存形式和成矿时代研究结果, 结合区内中新世构造—沉积—古气候演化过程, 初步构建了 DL 铀矿带多元流体多阶段耦合叠加铀成矿过程。

(1) 沉积—成岩预富集阶段: 青山口组沉积时期, 自盆地南缘蚀源区发育了一条北东向的辫状河纵向河道, 受东北侧架玛吐隆起的围限、堵水作用 (图 1b), 多物源和各水流汇聚在隆起的西南侧一带 (Liu Jialin et al., 2020), 导致研究区存在南部山脉提供的辫状河道相外部物源和架玛吐隆起提供的冲积扇相内部物源双源供给, 沉积层部分地段直接超覆在架玛吐隆起之上; 且这些部位水体明显更深, 发育了原生含碳屑和少量黄铁矿的灰色河道砂体和河道间湾泥岩 (图 3)。随后, 这些灰色体在姚家期—嫩江期的埋藏压实成岩过程中发生了有机质的成熟演化作用 (Bonnetti et al., 2017), 导致了地层中弱酸性后生蚀变及铀的预富集作用 (图 4、图 5)。

(2) 构造反转初始成矿阶段: 嫩江期末, 受东部太平洋板块的俯冲作用, 松辽盆地发生拗陷沉积以来的首次较弱的构造挤压反转 (王伟等, 2017); 研

石化、黄铁矿化等碱性热液蚀变改造。

(3)厘定出区内青山口组 $50.6\pm1.6\text{ Ma}$ 、 $32.2\pm3.9\text{ Ma}$ 、 $27\pm4\text{ Ma}$ 、 $26\pm2.7\text{ Ma}$ 、 $23.9\pm2.8\text{ Ma}$ 等一系列新的成矿等时线年龄,代表了区内古近纪的主成矿事件;进而构建了多元流体四阶段的板状铀成矿模式:①晚白垩世青山口期—嫩江期的沉积—成岩预富集阶段;②晚白垩世嫩江期末—明水期末的多幕式构造反转—烃类流体渗出耦合初始成矿阶段;③古近纪期间的深部热液流体改造成矿阶段;④古近纪末以来的表生流体叠加改造阶段。

致谢:感谢核工业二四三大队在野外矿石样品采集、资料提供方面给予的帮助和支持以及林效宾高工在成矿年龄数据处理方面给予的指导!同时,衷心感谢审稿专家对本文提出的建设性意见!

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

邓刘敏,葛祥坤,刘章月,蔡建芳,宁君,黄少华,于阿朋. 2021. 松辽盆地西南部 DL 铀矿带铀赋存状态及矿物组成特征. 铀矿地质, 37 (2): 192~204.

丁波,刘红旭,刘章月,邱林飞,贾立城,章展铭,黄少华. 2021. 松辽盆地宝龙山铀矿床中铀酰碳酸盐矿物的发现与砂岩型铀矿成矿的新途径. 中国地质, 48 (3): 966~967.

丁波,刘红旭,张宾,李平,易超,王贵. 2020. 鄂尔多斯盆地北缘砂岩型铀矿含矿砂岩中钛铁矿蚀变及其聚铀过程探讨. 地质论评, 66 (2): 467~474.

黄少华,秦明宽,周文博,刘章月,刘彤,赵志伟,东艳. 2020. 内蒙古克鲁伦凹陷伊敏组下段砂岩铀成矿条件、特征及成因. 地球科学与环境学报, 42 (2): 199~214.

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. 铀矿地质, 34 (5): 264~273.

李建国,张博,金若时,司庆红,苗培森,里宏亮,曹民强,魏佳林,陈印. 2020. 钱家店铀矿床表生含氧含铀流体与深层酸性含烃流体的耦合成矿作用——来自岩心蚀变矿物填图的证据. 大地构造与成矿学, 44 (4): 576~589.

林效宾,刘红旭,李西得,郝伟林,王志明. 2020. 砂岩型铀矿床成矿年代学研究. 地质学报, 94 (12): 3712~3725.

刘汉彬,金贵善,韩娟,张建锋,李军杰,张佳,石晓. 2021. 钱家店铀矿床辉绿岩元素及同位素地球化学特征. 世界核地质科学, 38 (2): 135~143.

刘章月,秦明宽,刘红旭,蔡根庆,何中波,郭强,许强,宋继叶. 2016. 南天山中、新生代造山作用与萨瓦甫齐铀矿床叠加富集效应. 地质学报, 90 (12): 3310~3323.

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. 矿床地质, 31(2): 391~400.

秦明宽,何中波,刘章月,郭强,宋继叶,许强. 2017. 准噶尔盆地砂岩型铀矿成矿环境与找矿方向研究. 地质论评, 63 (5): 1255~1269.

万军,陈振岩,李清春,邵建欣,曹民强,肖程,王衡. 2020. 钱家店地区油铀成矿(藏)条件对比及综合勘探意义. 中国石油勘

探, 25 (6): 13~25.

王伟,何登发,桂宝玲. 2017. 松辽盆地南部茫汉断陷结构特征及成因机制分析. 非常规油气, 4(6): 19~25.

夏毓亮,林锦荣,刘汉彬,范光,侯艳先. 2003. 中国北方主要产铀盆地砂岩型铀矿成矿年代学研究. 铀矿地质, 19 (3): 129~136.

谢惠丽,焦养泉,刘章月,李西得,易超,荣辉,万璐璐. 2020. 鄂尔多斯盆地北部铀矿床铀矿物赋存状态及富集机理. 地球科学, 45 (5): 1531~1543.

杨松林. 2020. 松辽盆地钱家店铀矿床层间氧化带地球化学特征. 古地理论, 22 (2): 321~332.

禹宝利,张庆新,翁海蛟,杨文达,张韶华. 2020. 松辽盆地西南部盖层水文地质特征及与铀矿化的关系研究. 环境科学与管理, 45 (11): 100~105.

张宾,刘红旭,丁波,易超,张艳. 2020. 鄂尔多斯盆地纳岭沟铀矿床岩石学、矿物学特征及其对铀成矿作用的指示意义. 地质论评, 66 (2): 410~424.

张明瑜,郑纪伟,田时丰,夏毓亮,刘汉彬. 2005. 开鲁拗陷钱家店铀矿床铀的赋存状态及铀矿形成时代研究. 铀矿地质, 21(4): 213~218.

张晓,宋继叶,倪仕琪,李真真. 2020. 伊犁盆地南缘砂岩型铀成矿年龄及其表征意义. 世界核地质科学, 37 (2): 84~96.

Bonnetti C, Liu Xiaodong, Yan Zhaobin, Cunney M, Michels R, Malratre F, Mercadier J, Cai Jianfang. 2017. Coupled uranium mineralization and bacterial sulphate reduction for the genesis of the Baixingtu sandstone-hosted U deposit, SW Songliao Basin, NE China. Ore Geology Reviews, 82: 108~129.

Chen Zhenyan, Li Qingchun, Liu Mingyi, Song Bairong, Cao Minqiang, Wang Miao. 2021. Uranium mineralization formed through multi-stage superposition: Case of the Qianjiadian deposit in Songliao Basin, China. Energy Geoscience, 2(1): 32~40.

Corcoran L, Simonetti A. 2020. Geochronology of Uraninite Revisited. Minerals, 10(3): 205.

Ding Bo, Liu Hongxu, Zhang Chuang, Liu Hongjun, Li Ping, Zhang Bin. 2020. Mineralogy, Fluid Inclusion and H-O-C-S Stable Isotopes of Mengqiguer Uranium Deposit in the Southern Yili Basin, Xinjiang: Implication for Ore Formation. Acta Geologica Sinica (English Edition), 94(5): 1488~1503.

Deng Liumin, Ge Xiangkun, Liu Zhangyue, Cai Jianfang, Ning Jun, Huang Shaohua, Yu Apeng. 2021&. The occurrence and mineral composition of uranium ore of DL mineralized zone in southwestern Songliao basin. Uranium Geology, 37(2): 192~204.

Ding Bo, Liu Hongxu, Liu Zhangyue, Qiu Linfei, Jia Licheng, Zhang Zhanming, Huang Shaohua. 2021&. Discovery of uranyl carbonate mineral in the Baolongshan uranium deposit in Songliao Basin and mineralization of sandstone-hosted uranium deposits. Geology in China, 48(3): 966~967.

Ding Bo, Liu Hongxu, Zhang Bin, Li Ping, Yi Chao, Wang Gui. 2020&. Study on ilmenite alteration and its process of uranium enrichment in sandstone-type uranium deposits in northern Ordos Basin. Geological Review, 66(2): 467~474.

Golubev V N, Chernyshev I V, Chugaev A V, Eremina A V, Baranova A N, and Krupskaya V V. 2013. U-Pb systems and U isotopic composition of the sandstone-hosted paleovalley Dybryn uranium deposit, Vitim uranium district, Russia. Geology of Ore Deposits, 55(6): 399~410.

Goswami S, Bhagat S, Zakaulla S, Kumar S, Rai A. 2017. Role of organic matter in uranium mineralisation in Vempalle dolostone;

Cuddapah basin, India. *Journal of the Geological Society of India*, 89(2): 145~154.

Huang Shaohua, Qin Mingkuan, Zhou Wenbo, Liu Zhangyue, Liu Tong, Zhao Zhiwei, Dong Yan. 2020&. Metallogenic conditions, characteristics and genesis of sandstone-type uranium deposit of the Lower Member of Yimin Formation in Kelulun sag of Inner Mongolia, China. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 42(2): 199~214.

Jia Licheng, Cai Jianfang, Huang Xiao, Zhang Kang, Zhang Liangliang, and Sun Chen. 2018&. Petrological characteristics and diagenesis of sandstone of the Lower Yaojia Formation in Baolongshan uranium deposit, south of Songliao basin. *Uranium Geology*, 34(5): 264~273.

Kochkin B T. 2020. Reduced-type alterations at exogenic infiltration uranium deposits and their relation to rising groundwater. *Geology of Ore Deposits*, 62(1): 19~30.

Liu Jialin, Qin Mingkuan, Cai Yuqi, Liu Zhangyue, Zhang Zhanming, and Yao Lei. 2020. Late Mesozoic tectonic evolution of the southern Great Xing'an Range, northeastern China: Constraints from detrital zircon U - Pb and Hf isotopes of Late Cretaceous sandstones in the southwestern Songliao Basin. *Geological Journal*, 55(6): 4415~4425.

Li Jianguo, Zhang Bo, Jin Ruoshi, Si Qinghong, Miao Peisen, Li Hongliang, Cao Minqiang, Wei Jialin, Chen Yin. 2020& Uranium mineralization of coupled supergene oxygen-uranium bearing fluids and deep acidic hydrocarbon bearing fluids in the Qianjiadian uranium deposit, Kailu Basin. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(4): 576~589.

Lin Xiaobin, Liu Hongxu, Li Xide, Hao Weilin, Wang Zhiming. 2020&. Study of metallogenic chronology of sandstone type uranium deposit. *Acta Geologica Sinica*, 94(12): 3712~3725.

Liu Hanbin, Jin Guishan, Han Juan, Zhang Jianfeng, Li Junjie, Zhang Jia, Shi Xiao. 2021&. Element and isotope geochemical characteristics of diabase in Qianjiadian uranium deposit. *World Nuclear Geoscience*, 38(2): 135~143.

Liu Zhangyue, Qin Mingkuan, Liu Hongxu, Cai Genqing, He Zhongbo, Guo Qiang, Xu Qiang, Song Jiye. 2016&. Meso-Cenozoic orogeny in south Tianshan and the resultant superimposed enrichment effect on the Sawafuqi uranium deposit. *Acta Geologica Sinica*, 90(12): 3310~3323.

Luo Yi, He Zhongbo, Ma Hanfeng, Sun Xiang. 2012&. Metallogenic characteristics of Qianjiadian sandstone uranium deposit in Songliao basin. *Mineral Deposits*, 31(2): 391~400.

Ma Pengjie, Lin Chengyan, Jahren J, Dong Chunmei, Ren Lihua, Hellevang H. 2021. Cyclic zoning in authigenic saddle dolomite-ankerite; Indications of a complex interplay between fault-rupturing and diagenetic alteration. *Chemical Geology*, 559: 119831.

Ming X R, Liu L, Yu M, Bai H G, Yu L, Peng X L, and Yang T H. 2016. Bleached mudstone, iron concretions, and calcite veins: a natural analogue for the effects of reducing CO₂-bearing fluids on migration and mineralization of iron, sealing properties, and composition of mudstone cap rocks. *Geofluids*, 16(5): 1017~1042.

Pointer C M, Achworth J P. 1989. Genesis of coffinite and the U-Ti association in Lower Old Red Sandstone sediments, Ousdale, Caithness, Scotland. *Mineralium Deposita*, 24(2): 117~123.

Qin Mingkuan, He Zhongbo, Liu Zhangyue, Guo Qiang, Song Jiye, Xu Qiang. 2017&. Study on metallogenic environments and prospective direction of sandstone type uranium deposits in Junggar Basin. *Geological Review*, 63(5): 1255~1269.

René M. 2008. Anomalous rare earth element, yttrium and zirconium mobility associated with uranium mineralization. *Terra Nova*, 20(1): 52~58.

Rong Hui, Jiao Yangquan, Wu Liquan, Zhao Xinfu, Cao Minqiang, Liu Weihong. 2021. Effects of igneous intrusions on diagenesis and reservoir quality of sandstone in the Songliao Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 127: 104980.

Wan Jun, Chen Zhenyan, Li Qingchun, Shao Jianxin, Cao Minqiang, Xiao Cheng, Wang Heng. 2020&. Comparative study on metallogenic conditions of uranium deposits and hydrocarbon accumulation conditions of oil reservoirs in the Qianjiadian area and its significance on comprehensive exploration. *China Petroleum Exploration*, 25(6): 13~25.

Wang Wei, He Dengfa, Gui Baoling. 2017&. Analysis of the structure feature and genetic mechanism of Manghan fault depression in south Songliao basin. *Unconventional Oil & Gas*, 4(6): 19~25.

Xia Yuliang, Lin Jinrong, Liu Hanbin, Fan Guang, Hou Yanxian. 2003&. Research on geochronology of sandstone-hosted uranium ore-formation in major uranium-productive basins, northern China. *Uranium Geology*, 19(3): 129~136.

Xie Huili, Jiao Yangquan, Liu Zhangyue, Li Xide, Yi Chao, Rong Hui, Wan Lulu. 2020&. Occurrence and Enrichment Mechanism of Uranium Ore Minerals from Sandstone-Type Uranium Deposit, Northern Ordos Basin. *Earth Science*, 45(5): 1531~1543.

Yang Songlin. 2020&. Geochemical characteristics of interlayer oxidation zone in Qianjiadian sandstone-type uranium deposits, Songliao Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 22(2): 321~332.

Yu Baoli, Zhang Qingxin, Weng Haijiao, Yang Wenda, Zhang Shaohua. 2020&. Relation between hydrogeological characteristics and uranium mineralization in southwest of Songliao Basin. *Environment Science and Management*, 45(11): 100~105.

Zhang Bin, Liu Hongxu, Ding Bo, Yi Chao, Zhang Yan. 2020&. Petrological and mineralogical characteristics of Nalinggou uranium deposit in Ordos Basin and its indicative significance for uranium mineralization. *Geological Review*, 66(2): 410~424.

Zhang Mingyu, Zheng Jiwei, Tian Shifeng, Xia Yuliang, Liu Hanbin. 2005&. Research on existing state of uranium and uranium ore-formation age at Qianjiadian uranium deposit in Kailu depression. *Uranium Geology*, 21(4): 213~218.

Zhang Xiao, Song Jiye, Ni Shiqi, Li Zhenzhen. 2020&. Metallogenic age and its significance of sandstone-type uranium deposit at the southern margin of Yili basin. *World Nuclear Geoscience*, 37(2): 84~96.

Zhao Long, Cai Chunfang, Jin Ruoshi, Li Jianguo, Li Hongliang, Wei Jialin, Guo Hu, Zhang Bo, 2018. Mineralogical and geochemical evidence for biogenic and petroleum-related uranium mineralization in the Qianjiadian deposit, NE China. *Ore Geology Reviews*, 101: 273~292.

Uranium occurrence and metallogenic age for the DL uranium mineralized belt in Qianjiadian Sag, southwestern Songliao Basin

HUANG Shaohua¹⁾, QIN Mingkuan¹⁾, LIU Zhangyue¹⁾, ZHANG Liangliang²⁾, GUO Qiang¹⁾, JIA Licheng¹⁾, JIANG Wenjian¹⁾, LIU Jialin¹⁾, DONG Yan¹⁾

1) *CNNC Key Laboratory of Uranium Resource Exploration and Evaluation Technology, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing, 100029;*

2) *Geological Survey No. 243, China National Nuclear Corporation, Chifeng, Inner Mongolia, 024000*

Objectives: The sandstone and mudstone ores from the Upper Cretaceous Qingshankou Formation in DL uranium mineralized belt of Qianjiadian Sag, southwestern Songliao Basin were investigated to understand the uranium occurrence, enrichment mechanism and metallogenic process. This research provided important guidance for further uranium prospecting and in-situ leaching both in this basin and other similar area.

Methods: The rock and mineral identification, SEM observation, energy spectrum and electron probe analysis, whole rock U-Pb isotopic dating have been carried out in this paper.

Results: The ores with the low maturity of the composition and structure, were deposited in braided fluvial that have multiple sources. Uranium in the all ores were composed of pitchblende, followed by some uranium bearing titanium minerals, and a little uranium bearing carbonate minerals, the mixtures bearing uranium, zirconium and silicon, and adsorbed uranium substance. The pitchblende, characterized by colloidal, lumpy and particulate, mainly occurred within the local sorptive and reductive position, such as the matrix, dissolution pores or edges of various clastic minerals. Also, they are closely associated with carbonaceous organic matter, pyrite, kaolinite, montmorillonite, ankerite and titanium bearing minerals. A number of isochron ages of 50.6 ± 1.6 Ma, 32.2 ± 3.9 Ma, 27 ± 4 Ma, 26.0 ± 2.7 Ma and 23.9 ± 2.8 Ma were obtained, indicating the main metallogenic events took place during Paleogene.

Conclusions: Two kind fluids including weak acidic reducing fluid and alkaline reducing hydrothermal fluid were contributed to the uranium enrichment and mineralization within the target layer. On the basis of tectonic-sedimentary evolution process, the four stages multi-fluids coupling and superimposed uranium metallogenic model for the Upper Cretaceous Qingshankou Formation of DL uranium mineralized belt in Qianjiadian Sag, southwestern Songliao Basin are preliminarily constructed: ① uranium preconcentration stage during sedimentary and diagenetic era; ② initial metallogenic stage by tectonic inversion since the end of Nenjiang era; ③ main metallogenic stage of hydrothermal fluid during Paleogene; ④ superimposed uranium enrichment stage during Neogene.

Keywords: Qingshankou Formation; sandstone and mudstone ores; uranium occurrence; metallogenic age; Songliao basin; Qianjiadian sag; DL uranium mineralized belt

Acknowledgements: This study was supported by the Fourth Talent Project from China National Nuclear Corporation (CNNC) (No. QNYC2102), the Development of Nuclear Research Project (No. 2017-1403), and the China National Nuclear Corporation (No. 201910-1). The authors thank geology party No. 243 of CNNC for providing the ore samples and many useful data. We could also like to thank Lin Xiaobing for the U-Pb isotopic age, and the anonymous reviews for their constructive comments and suggestions on the manuscript.

First author: HUANG Shaohua, male, born in 1989, doctor degree, senior engineer, mainly engaged in mineralization mechanism of sandstone-hosted uranium deposit; Email: huangshaohua20@126.com

Corresponding author: QIN Mingkuan, male, born in 1968, professor, mainly engaged in prospecting and exploration for the sandstone-hosted uranium deposit; Email: qinmk9818@163.com

Manuscript received on: 2021-09-14; Accepted on: 2022-02-18; Network published on: 2022-03-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2022.03.055

Edited by: ZHANG Yuxu