

松辽盆地开鲁拗陷西部四方台组铀成矿条件 及找矿方向*

佟术敏¹, 封志兵^{2**}, 张婷婷³, 宁君¹, 姜山¹, 杨文达¹, 柳东良¹, 臧亚辉¹
(1 核工业二四三大队, 内蒙古赤峰 024006; 2 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西南昌 330013;
3 赤峰市红山区教育教学指导中心, 内蒙古赤峰 024006)

摘要 开鲁拗陷位于松辽盆地西南部, 通过系统地分析开鲁拗陷西部铀源、构造、岩性-岩相、砂体氧化-还原、水文地质和铀矿化特征, 笔者认为区内四方台组具备砂岩型铀矿成矿的基本地质条件。经统计蚀源区和地层本身砂体铀含量, 数据显示该区具备丰富的内外双重铀源。深部还原流体可沿主干断层直接进入四方台组, 这些断层也为地下水排泄提供通道。四方台组发育冲积扇、辫状河沉积体系, 泥-砂-泥结构稳定, 具备良好的地下水补径-排和水中铀水文地质条件。文章从氧化带、砂体 Th/U 值变化规律、Fe²⁺/Fe³⁺ 值及有机碳含量分布特征等方面阐述其与铀成矿的关系。铀成矿主要受铀源、构造、岩性岩相及砂体氧化-还原等关键因素控制, 各种成矿要素匹配良好, 具备形成中型及以上砂岩型铀成矿潜力。

关键词 砂岩型铀矿; 成矿条件; 找矿方向; 成矿潜力; 开鲁拗陷

中图分类号: P619.14

文献标志码: A

Conditions and prospecting direction of uranium metallization in Sifangtai Formation in West of Kailu Depression, Songliao Basin

TONG ShuMin¹, FENG ZhiBing², ZHANG TingTing³, NING Jun¹, JIANG Shan¹, YANG WenDa¹,
LIU DongLiang¹ and ZANG YaHui¹

(1 Geological Party No.243, CNNC, Chifeng 024006, Inner Mongolia, China; 2 Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, Ministry of Education, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 3 Education Teaching Direction Center in Hongshan District of Chifeng City, Chifeng 024006, Inner Mongolia, China)

Abstract

Kailu depression is located in Southwest Songliao Basin. Based on the systematic analysis of uranium source, structure, lithology-lithofacies, sand body oxidation-reduction, hydrogeology and uranium mineralization characteristics in the western Kailu depression, the author believes that the Sifangtai Formation has the basic geological conditions for sandstone type uranium mineralization. The statistical analysis of uranium content in the erosion source area and the sand body of the Formation indicates that there are abundant internal and external dual uranium sources in the area. Deep reduction fluids can enter the Sifangtai Formation directly along the main faults, which also provide channels for groundwater discharge. The Sifangtai Formation has developed alluvial fan and braided river sedimentary system with stable mud-sand-mud structure, good groundwater recharge, diameter and drainage and hydrogeological conditions of uranium in water. In this paper, the relationship between oxi-

* 本文得到中国核工业地质局项目(编号:202212)和核工业二四三大队自主科研项目联合资助

第一作者简介 佟术敏,男,1985年生,高级工程师,长期从事砂岩型铀矿找矿工作。Email:tongshumin243@163.com

** 通讯作者 封志兵,男,1989年生,副教授,从事铀矿地质与沉积学的教学与科研工作。Email:zbfengjl@163.com

收稿日期 2022-05-13;改回日期 2023-11-15。孟秋熠编辑。

ation zone, Th/U value of sand body, Fe^{2+}/Fe^{3+} value and organic carbon content distribution are discussed. Uranium mineralization is mainly controlled by key factors such as uranium source, structure, lithology & lithofacies and oxidation and reduction of sand body, etc. All metallogenic elements are well matched in the Sifangtai Formation of the West Kailu Depression, where there is mineralization potential for forming of medium-size and above sandstone-type uranium deposits.

Keywords: Sandstone-type uranium deposits, metallogenic conditions, prospecting direction, potential, Kailu depression

松辽盆地是在前中生代海西褶皱带基础上发展起来的中新生代内陆断、拗陷盆地(罗梅等, 2002; 夏毓亮等, 2010; 赵忠华等, 2012), 是中国石油、煤炭等能源矿产的重要产地(葛荣峰等, 2010; 罗毅等, 2012; 于洋等, 2020)。前人对盆地中煤、石油和天然气的研究程度较高, 而对砂岩型铀矿成矿条件与成矿潜力的研究程度比较低。目前, 盆地铀矿找矿工作主要集中在钱家店和宝龙山等地(蔡煜琦等 2008; 荣辉等, 2010; 张金带等, 2010; 蔡建芳等, 2018; 焦养泉等, 2018; 丁波等, 2021; 赵龙等, 2022), 目标层以晚白垩世姚家组为主(佟术敏等, 2019; 单芝波等, 2022)。而对于盆地其他区域和层位的铀成矿环境与成矿潜力研究相对较少, 主要集中在中部, 目标层以晚白垩世四方台组、姚家组及泉头组为主(刘阳等, 2020; 郭强等, 2021; 李研等, 2021; 刑作昌等, 2021; 陈路路等, 2022; 张航等, 2023)。

早期, 石油和煤炭部门在陆家堡凹陷发现了一批铀矿化异常钻孔(魏达, 2018; 吴兆剑等, 2018)。随着近年核工业系统对开鲁拗陷西部铀矿找矿工作的持续投入, 在晚白垩世四方台组和明水组等层位发现了多个工业孔和矿化孔(佟术敏等, 2022), 这表明该区具有良好的找矿前景。本文以陆家堡凹陷晚白垩世四方台组为重点研究层位, 大致查明区内铀源、构造、岩性-岩相、砂体氧化-还原、水文地质及铀矿化等成矿条件, 系统地分析该区铀成矿环境, 初步理清铀成矿类型和找矿方向, 以期对研究区乃至整个松辽盆地新地区、新层位铀矿找矿突破及勘探部署提供科学依据。

1 研究区地质概况

研究区行政区划隶属于内蒙古赤峰市和通辽市境内, 面积约为 4600 km², 位于松辽盆地西南部, 是

在晚古生代褶皱基底上发育起来的中、新生代断拗型凹陷, 基底构造由近 EW 向、NE 向及 NW 向三组构造构成(图 1), 其中 EW 向构造发育时期最早, NW 向构造发育时期最晚。基底为晚古生界石炭系、二叠系变质岩及同期岩浆岩(裴家学等, 2015; 冷庆磊等, 2020), 出露的岩浆岩以二叠纪和侏罗纪的酸性、中酸性侵入岩和火山岩为主, 其次为侏罗纪中性火山岩以及古近纪基性超基性侵入岩及新近纪玄武岩等。

研究区属于辽河水文地质单元, 水系以西辽河为主, 西拉木伦河、老哈河、教来河和新开河为主要河流。含水层主要包括第四系潜水含水层、新近系承压水含水层、白垩系承压水含水层及基岩裂隙水。区域隔水层为嫩江组、姚家组、四方台组及明水组中不透水岩层为局部隔水层。地下水主要接受大气降水垂直渗入补给, 盆地周边基岩裂隙水向盆地内的侧向径流、地表水下渗、相邻含水层承压水之间的越流等也构成了地下水的补给来源。地下水径流主要表现为大范围的由盆地周边蚀源区向盆地中心径流, 即由北西向南东、由南西向北东两个方向的径流。蒸发作用是地下水的主要排泄方式。另外, 还存在河流排泄, 相邻含水层之间地下水垂向越流补给以及人工开采地下水等排泄方式。地层主要由前中生代基底和中、新生代沉积盖层组成。其中, 早白垩世为断陷阶段, 该时期发育义县组、九佛堂组、沙海组及阜新组等, 属含油、含煤火山碎屑岩建造, 富含还原性流体(雷安贵等, 2016; 魏达, 2018); 晚白垩世为拗陷盆地发育期, 该时期发育姚家组、嫩江组、四方台组及明水组等。此外, 第四系覆盖整个研究区, 第四系下伏主要为新近系泰康组, 其次为明水组和四方台组。垂向上, 区内盖层包括断陷和拗陷沉积, 表现出“下断、上拗”的沉积特征。目标层四方台组砂体厚度一般为 30~60 m, 岩性主要为褐红色、灰色、浅灰色及灰绿色中砂岩、粗砂岩和砂质砾岩、紫红

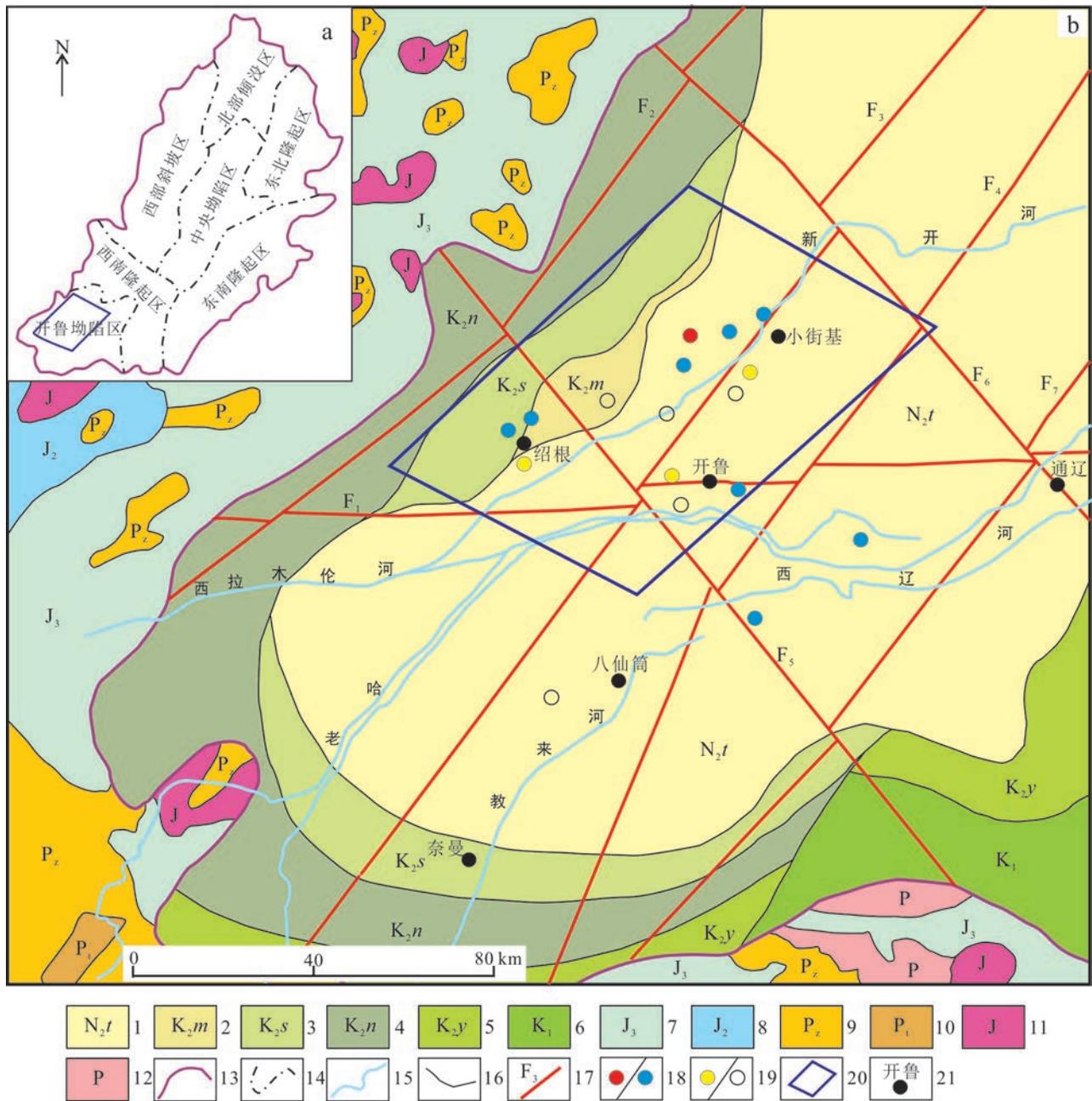


图 1 松辽盆地构造单元简图(a)及区域地质简图(b, 修自佟术敏, 2022)

1—新近系泰康组; 2—上白垩统明水组; 3—上白垩统四方台组; 4—上白垩统嫩江组; 5—上白垩统姚家组;
 6—下白垩统; 7—上侏罗统; 8—中侏罗统; 9—古生界; 10—元古界; 11—侏罗纪花岗岩; 12—二叠纪花岗岩; 13—盆地界线; 14—构造单元界线; 15—河流; 16—地层界线; 17—断裂及编号; 18—铀工业孔/铀矿化孔; 19—铀异常孔/无矿孔; 20—研究区; 21—城镇

Fig. 1 Brief map showing the tectonic units of the Songliao Basin(a) and regional geology(b, modified from Tong, 2022)

1—Neogene Taikang Formation; 2—Late Cretaceous Mingshui Formation; 3—Late Cretaceous Sifangtai Formation; 4—Late Cretaceous Nenjiang Formation; 5—Late Cretaceous Yaojia Formation; 6—Early Cretaceous; 7—Late Jurassic; 8—Middle Jurassic; 9—Paleozoic; 10—Proterozoic; 11—Jurassic granite; 12—Permian granite; 13—Basin boundary; 14—Tectonic unit boundary; 15—River; 16—Stratigraphic boundary; 17—Fault and numbering; 18—Drill hole having uranium industrial grade interception/drill hole with low grade uranium mineralization; 19—Uranium anomaly hole/barren hole; 20—Research area; 21—Town

色泥岩; 其具有稳定的泥-砂-泥结构和完善的补径-排体系, 有利于蚀源区含氧含铀水的渗入改造,

是层间氧化带型铀矿化形成的有利条件(佟术敏等, 2022)。

2 铀成矿条件分析

2.1 铀源条件

一般而言,沉积盆地中铀成矿所需铀源主要来自2个方面,一方面是盆地周缘的蚀源区,另一方面是盆地富(含)铀的盖层和含矿地层自身(陈祖伊等,2011;黄世杰,2018)。开鲁拗陷铀成矿同样受外部铀源和内部铀源的双重影响。

研究区周边海西期、燕山期的酸性、中酸性侵入岩可提供丰富的铀源,是形成砂岩型铀矿床的基础保障。西部出露的燕山期花岗岩,分布范围较广,呈串珠带状分布,各条花岗岩带长100~150 km,累计出露面积超过1000 km²。南部出露的侵入岩体主要为海西期花岗岩,其次为燕山期花岗岩。海西期花岗岩分布较为集中,出露面积近1500 km²。

研究发现,研究区周边花岗岩 $w(U)$ 平均值为 3.77×10^{-6} ,最大值达到 14.85×10^{-6} ,铀的析出率高达64%。具有较高的铀含量和析出率(魏达,2018),广泛分布的富铀岩体可以为开鲁拗陷提供较为充足的铀源。研究区西部大兴安岭蚀源区的酸性火山碎屑岩 $w(U)$ 最大值达到 13.85×10^{-6} ,析出率在40%~45%(雷安贵等,2016),但是分布范围较岩浆岩少,可以作为潜在的铀源岩为开鲁拗陷提供铀源。

沉积地层本身铀含量是铀富集成矿最直接的证据之一(郑纪伟,2010;赵岳等,2018;俞弼安等,2019),对于寻找铀矿床意义重大。众所周知,砂岩型铀矿均产于灰色砂体中,故地层中微量铀背景值的统计可以揭示原生铀富集的直接证据(夏毓亮等,2005;佟术敏等,2019)。本研究选取四方台组灰色砂体(非含矿段)进行铀含量分析(表1)。依据其背景值、偏高值、增高值及异常值的分布特征,为预测有利成矿区域提供依据。

本文利用迭代法计算出微量铀的自然底数为 3.81×10^{-6} ,参考铀矿水化学找矿规范(EJ/T276-1998)水中铀含量划分标准,将自然底数加一倍、二倍、三倍均方差(S)的含量值确定被统计元素的偏高值、增高值和异常值。经计算得出偏高值的区间为6.36~8.91 mg/L,增高值区间为8.91~11.46 mg/L,异常值>11.46 mg/L。研究区微量铀最高值为41.70 mg/L,取自建华地区的T1-5孔灰色砂质砾岩中,附近钻探揭露了一批铀矿化异常孔。笔者将铀含量大于偏高值的区域划为高值区,在研究区圈出3片高值区,依据铀

表1 四方台组铀含量分析结果一览表

Table 1 Uranium content analysis results of sedimentary rocks in Sifangtai Formation

| 序号 | 孔号 | 深度/m | 岩性 | $w(U)/10^{-6}$ |
|----|------|--------|--------|----------------|
| 1 | T3-1 | 359.40 | 灰色细砂岩 | 1.77 |
| 2 | T6-2 | 252.10 | 灰色细砂岩 | 1.02 |
| 3 | T1-1 | 315.20 | 灰色中砂岩 | 2.55 |
| 4 | T4-1 | 419.7 | 灰色中砂岩 | 4.70 |
| 5 | T4-3 | 206.60 | 灰色细砂岩 | 1.46 |
| 6 | T6-3 | 184.00 | 灰色细砂岩 | 9.45 |
| 7 | T5-1 | 271.50 | 灰绿色细砂岩 | 1.97 |
| 8 | T3-3 | 427.50 | 灰色中砂岩 | 1.88 |
| 9 | T5-3 | 481.70 | 灰绿色细砂岩 | 5.27 |
| 10 | T9-1 | 424.80 | 灰色细砂岩 | 2.81 |
| 11 | T3-4 | 398.10 | 灰色细砂岩 | 1.81 |
| 12 | T3-2 | 394.2 | 浅灰色中砂岩 | 3.01 |
| 13 | T7-1 | 474.5 | 灰色细砂岩 | 4.59 |
| 14 | T7-2 | 407.9 | 灰色中砂岩 | 4.07 |
| 15 | T3-9 | 367.8 | 浅灰色细砂岩 | 7.46 |
| 16 | T9-6 | 321.7 | 灰绿色细砂岩 | 2.60 |
| 17 | T7-7 | 378.40 | 灰色细砂岩 | 1.20 |
| 18 | T1-5 | 315.15 | 灰色砂质砾岩 | 41.70 |
| 19 | T6-4 | 346.20 | 灰色中砂岩 | 7.58 |
| 20 | T8-1 | 348.70 | 灰色细砂岩 | 8.68 |
| 21 | T1-1 | 279.75 | 灰色细砂岩 | 2.40 |
| 平均 | | | | 5.62 |

注:测试工作由核工业二四三大队化验室完成,微量U、Th测试仪器为MAU型铀分析仪。

含量平均值由大到小依次命名为高值Ⅰ区、Ⅱ区和Ⅲ区。铀的富集受构造控制明显(图2)。

高值Ⅰ区位于建华北部,沿断裂 F_{1-2} 和 F_3 分布,区内有T1-5工业矿孔和多个矿化孔,铀成矿潜力巨大;高值Ⅱ区位于绍根地区,夹持于断裂 F_1 和 F_5 之间,受断裂 F_{2-1} 和 F_{2-2} 控制明显,区内已发现多个矿化异常孔,属于铀成矿潜力较大的区域;高值Ⅲ区位于开鲁地区,有断裂 F_1 穿过,且与断裂 F_3 和 F_5 相邻。区内已发现铀矿化孔T3-9及多个铀异常孔,被视为铀成矿的有利部位。由此可见,地层中铀含量与该区水中铀含量相关性密切,铀含量高值区往往位于铀矿产区。

研究表明,钍铀比低值区可作为判断富铀区的重要标志(徐浩等,2011;付锦等2013)。地壳不同类型岩石中铀、钍绝对含量可能差异很大;但钍铀比值比较恒定,大约在3~4之间(张祖还等,1991),与地壳($Th/U \approx 3.4$,黎彤,1976)接近,显示岩浆作用过程中钍、铀元素具有相似的地球化学行为。然而,铀、

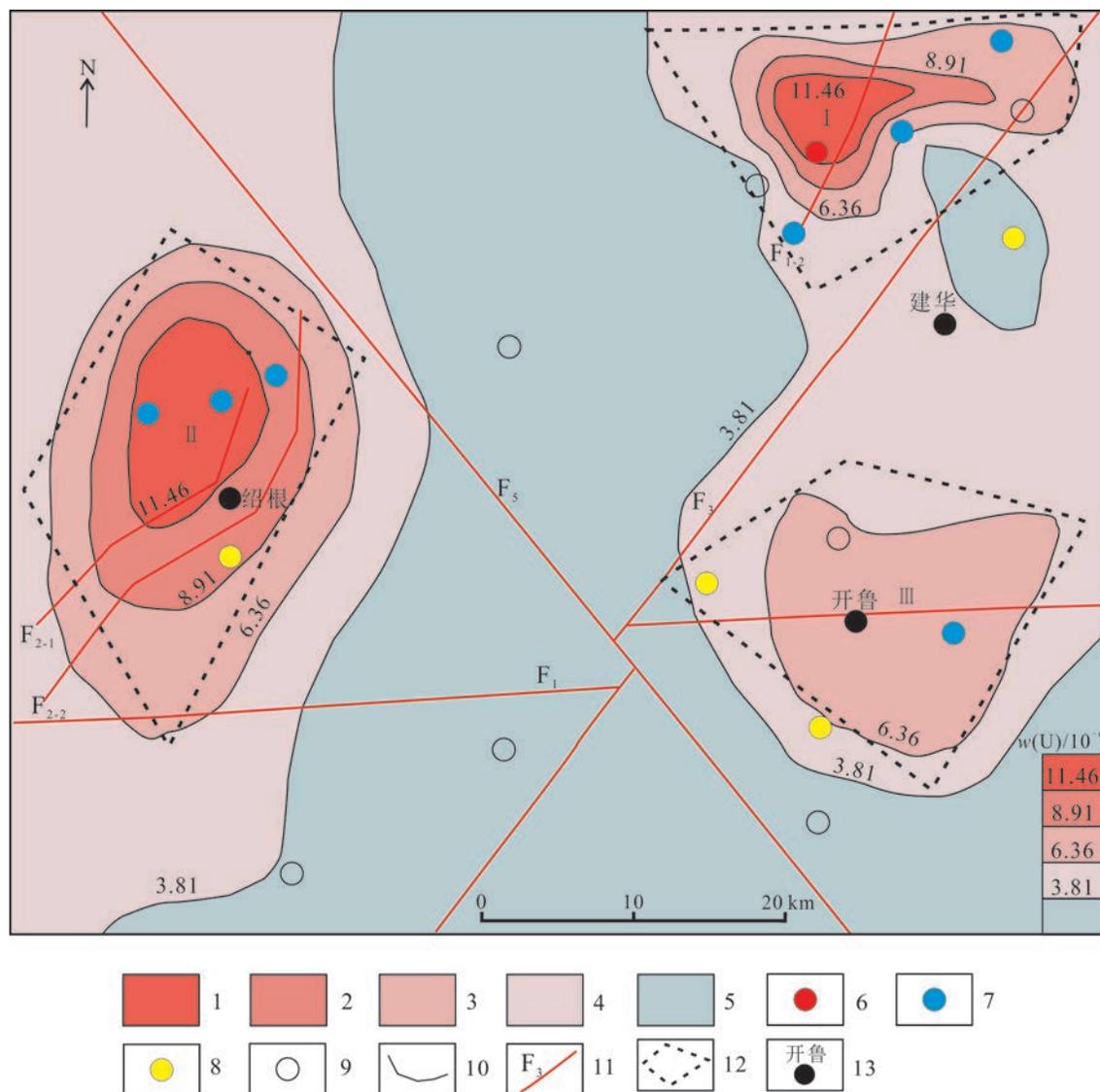


图2 四方台组铀含量分布图

1—铀异常区;2—铀增高区;3—铀偏高区;4—铀含量介于背景区与偏高区之间;5—铀含量低于背景区;6—铀工业孔;7—铀矿化孔;
8—铀异常孔;9—无矿孔;10—铀含量分区界线;11—断裂及编号;12—成矿有利区;13—城镇

Fig. 2 Contour map showing uranium content of sedimentary rocks in Sifangtai Formation

1—Uranium anomaly; 2—Uranium elevation region; 3—Uranium enrichment region; 4—The uranium content is between the background region and the high region; 5—Uranium content is lower than the background area; 6—Drill hole having uranium industrial grade interception; 7—Drill hole with low grade uranium mineralization; 8—Uranium anomaly hole; 9—Barren hole; 10—Uranium content contour; 11—Fault and numbering; 12—Favorable metallogenic area; 13—Town

钍元素的地球化学性质却差异大。铀易受后期环境影响而发生活化、迁移流失,但钍则较稳定而保存于原地。局部钍铀比值的变化是后期构造或者热液活动中钍、铀分离的结果。低钍铀比值预示后期有二次铀的富集,是成矿有利指示因素;高钍铀比值则预示铀有迁移流失,不利于铀富集成矿。因而,钍铀比值可作为反映铀成矿地质特征的重要指标参数,能反映铀的迁入、迁出状态,快速判断铀成矿有利地段

(赵磊等 2017; 胡鹏等, 2020)。当然,由于断裂构造引起的后生还原改造、热液活动的影响,不同氧化、还原环境中的钍铀比值就变得尤为复杂。

通过对研究区四方台组砂体钍、铀含量进行分析(表 2),完全氧化带环境中 $w(\text{Th})$ 为 $4.66 \times 10^{-6} \sim 8.82 \times 10^{-6}$, 平均值为 5.86×10^{-6} , $w(\text{U})$ 为 $0.63 \times 10^{-6} \sim 1.46 \times 10^{-6}$, 平均值为 1.01×10^{-6} 。原生环境中 $w(\text{Th})$ 为 $3.22 \times 10^{-6} \sim 6.98 \times 10^{-6}$, 平均值为 5.92×10^{-6} , $w(\text{U})$ 为

表2 四方台组砂体Th/U值一览表

Table 2 The Th/U ratio of sand body in Sifangtai Formation

| 序号 | 孔号 | 地化环境 | 岩性 | 微量铀 $w(U)/10^{-6}$ | 微量钍 $w(Th)/10^{-6}$ | Th/U值 |
|-----|--------|-------|--------|--------------------|---------------------|-------|
| 1 | T5-2 | | 砖红色细砂岩 | 1.18 | 4.95 | 4.19 |
| 2 | T4-2 | | 砖红色中砂岩 | 0.63 | 4.77 | 7.58 |
| 3 | T4-3 | | 褐黄色细砂岩 | 1.15 | 8.82 | 7.67 |
| 4 | T4-3-2 | 完全氧化带 | 砖红色细砂岩 | 1.46 | 7.85 | 5.38 |
| 5 | T6-2 | | 砖红色细砂岩 | 0.93 | 5.23 | 5.62 |
| 6 | T1-1 | | 砖红色中砂岩 | 0.86 | 4.72 | 5.49 |
| 7 | T5-3 | | 砖红色中砂岩 | 0.87 | 4.66 | 5.35 |
| 平均值 | | | | 1.01 | 5.86 | 5.90 |
| 1 | T3-1 | | 灰色细砂岩 | 1.77 | 6.78 | 3.83 |
| 2 | T6-2 | | 灰色细砂岩 | 1.02 | 3.22 | 3.16 |
| 3 | T5-1 | 原生环境 | 灰绿色细砂岩 | 1.97 | 6.98 | 3.54 |
| 4 | T4-1 | | 灰色中砂岩 | 1.66 | 5.63 | 3.39 |
| 5 | T3-3 | | 灰色中砂岩 | 1.88 | 6.97 | 3.71 |
| 平均值 | | | | 1.66 | 5.92 | 3.53 |
| 1 | T6-3 | | 灰色细砂岩 | 9.45 | 6.47 | 0.68 |
| 2 | T4-1 | | 灰色中砂岩 | 4.70 | 8.11 | 1.73 |
| 3 | K3-9 | | 灰色砂质砾岩 | 41.71 | 9.88 | 0.24 |
| 4 | T1-5 | | 浅灰色细砂岩 | 7.46 | 6.46 | 0.87 |
| 5 | T5-3 | | 浅灰色细砂岩 | 5.27 | 6.56 | 1.24 |
| 6 | T7-1 | 过渡带 | 灰色细砂岩 | 4.59 | 6.43 | 1.40 |
| 7 | T7-2 | | 灰色中砂岩 | 4.07 | 9.03 | 2.22 |
| 8 | T6-4 | | 灰色中砂岩 | 7.58 | 4.09 | 0.54 |
| 9 | T8-1 | | 灰色细砂岩 | 8.68 | 5.44 | 0.63 |
| 10 | T1-1-2 | | 灰色细砂岩 | 2.40 | 2.88 | 1.20 |
| 平均值 | | | | 9.59 | 6.54 | 1.07 |

$1.02 \times 10^{-6} \sim 1.97 \times 10^{-6}$, 平均值为 1.66×10^{-6} 。过渡带环境中 $w(Th)$ 为 $2.88 \times 10^{-6} \sim 9.88 \times 10^{-6}$, 平均值为 6.54×10^{-6} , $w(U)$ 为 $2.40 \times 10^{-6} \sim 41.71 \times 10^{-6}$, 平均值为 9.59×10^{-6} 。铀含量在不同的地化环境中变化较明显, 而钍含量基本保持不变。

大部分砖红色和褐黄色氧化砂岩的 Th/U 平均值为 5.90, 氧化砂体中铀被溶解、迁移, 说明研究区氧化砂体基本经历了后生氧化作用; 远离矿化带内的灰色和灰绿色砂岩的 Th/U 平均值为 3.53, 砂体处于原生环境, 钍、铀动态平衡系统未被破坏; 矿化带内灰色砂岩和少量浅灰色砂岩的 Th/U 平均值为 1.07, 还原砂体发生了铀迁移、富集。铀矿体均赋存于此类砂体中, 其顶部和底部大多为后生氧化砂体。

铀矿化相对集中在 Th/U 值小于 1.40 的氧化-还原过渡带内。铀元素明显从后生氧化砂岩中迁出, 在过渡带砂岩中富集, 表明后生氧化作用为成矿提供铀源和氧化-还原障, 因此, Th/U 值是寻找铀矿的

有利指标, 区内铀源丰富, 既有盆地基底及侵入岩的输入, 也有地层本身砂体微量铀的贡献。

2.2 岩性岩相条件

砂岩型铀矿的成矿过程和矿体的分布受到目的层砂体物性特征和分布规律的控制, 矿床的形成与沉积特征关系密切 (Jaireth et al., 2015; Haoll et al., 2017)。综合岩性岩相、砂体特征以及砂泥的空间配置关系等, 总结出有利成矿砂体的识别标志, 包括有利的沉积环境、一定的规模和稳定性、稳定的顶底板隔水层及产状具有一定的倾角等: ① 产出于有利的沉积环境: 河流、三角洲以及冲积扇均为铀成矿的有利相带 (邱余波等, 2015; 刘杰等, 2017; 吴斌等, 2018)。研究区四方台组主要发育冲积扇和河流相砂体。研究区西缘和西南缘抬升强烈, 盆地可容空间增加, 物源补给能力增强, 扇上河道在扇前溢散成的大规模辫状河向建华—莫力庙一线汇聚。辫状河道形成稳定厚层的砂体, 是有利容矿砂体; ② 具有

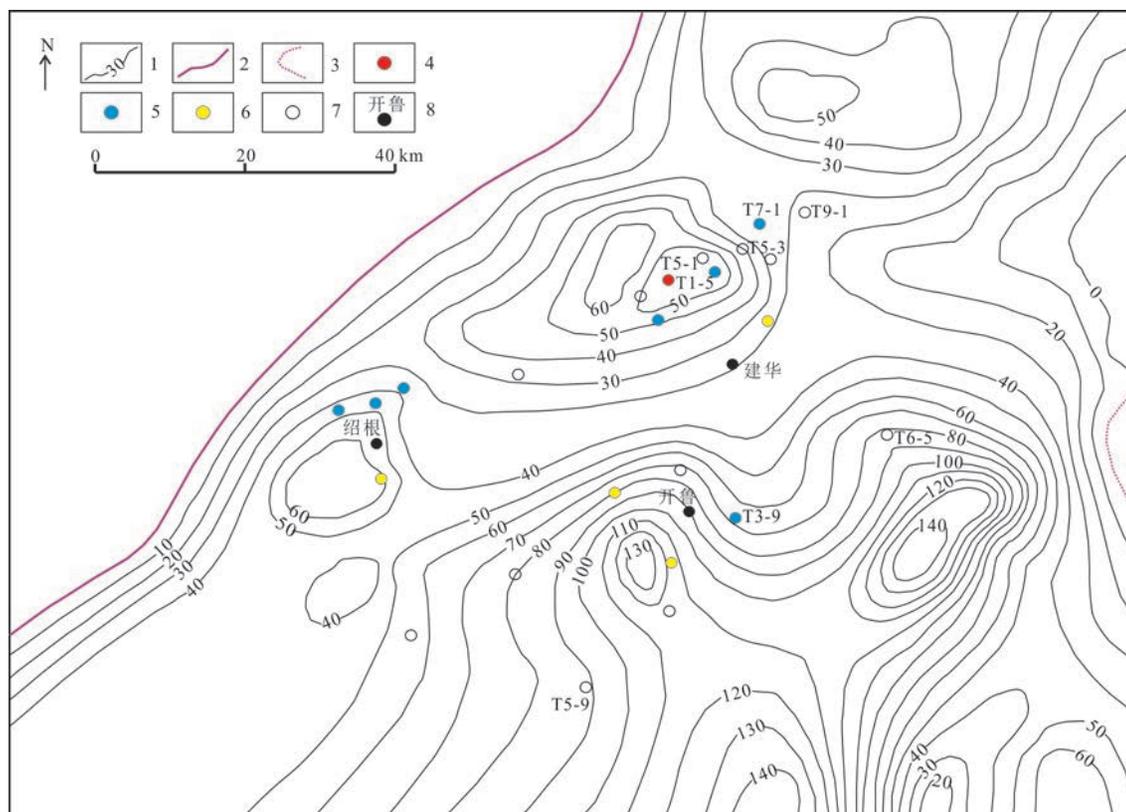


图3 四方台组砂体厚度与铀成矿关系图

1—四方台组砂体厚度;2—盆地边界线;3—剥蚀界线;4—铀工业孔;5—铀矿化孔;6—铀异常孔;7—无矿孔;8—城镇

Fig. 3 Relationship between sand body thickness and uranium mineralization in Sifangtai Formation

1—Sand body thickness of Sifangtai Formation; 2—Basin boundary; 3—Denudation boundary; 4—Drill hole having uranium industrial grade interception; 5—Drill hole with low grade uranium mineralization; 6—Uranium anomaly hole; 7—Barren hole; 8—Town

一定的规模和稳定性:砂体厚度与铀的富集成矿密切相关,研究表明二连盆地芒来矿床铀矿化多出现在砂体厚度45~65 m(刘国安等,2020),鄂尔多斯盆地东胜地区西部成矿砂体最佳厚度为60~70 m(易超等,2013)。笔者统计了近10年钻孔资料,绘制了四方台组砂体厚度等值线图,发现绍根-建华一带发育冲积扇砂体,大多铀矿化位于砂体厚度40~60 m。开鲁地区发育辫状河相砂体,砂体厚度60~80 m更利于铀的富集成矿(图3);③稳定的顶底板隔水层、沉积砂体在后期构造改造下形成一定的构造斜坡,统计表明坡度5°~10°对铀矿化的形成有利,倾角大于20°的砂体一般不利于铀成矿作用的发生(易超等,2020)。

T1-5~T9-1 钻孔剖面显示(图4),四方台组含矿层下伏为嫩江组的滨浅湖相沉积,岩性为深灰-灰黑色泥岩,为区域稳定泥岩隔水层。顶部沉积一层连续的薄层泥岩隔水层,岩性一般为紫红色泥岩和粉

砂质泥岩,隔水效果良好,可作为含矿层隔水顶板。

此外,T1-5孔工业矿体位于地层缓坡带上,T7-1孔矿化位于局部隆起部位,可见,地层具有一定的坡度和局部隆起有利于铀的富集成矿(封志兵等,2021;2022)。

2.3 砂体氧化-还原条件

岩石颜色对氧化-还原特征反应最明显(刘健等,2003;李盛富等,2004),研究区氧化砂体一般呈砖红色和褐红色,还原砂体一般呈灰色和浅灰色。铀矿化一般产于氧化砂体与还原砂岩接触界面。笔者认为砂体的氧化-还原控矿,宏观体现在完全氧化带控制铀矿化的展布,微观上由砂体的 Fe^{2+}/Fe^{3+} 比值和有机碳含量决定,因为它们是衡量砂体氧化还原性的重要指标(佟术敏等,2019)。本文从完全氧化带、 Fe^{2+}/Fe^{3+} 比值及有机碳含量等方面阐述其与铀成矿的关系。

由于四方台组末期西部抬升明显,在陆家堡凹陷西缘接受含铀含氧水的持续补给,因此,整体上四

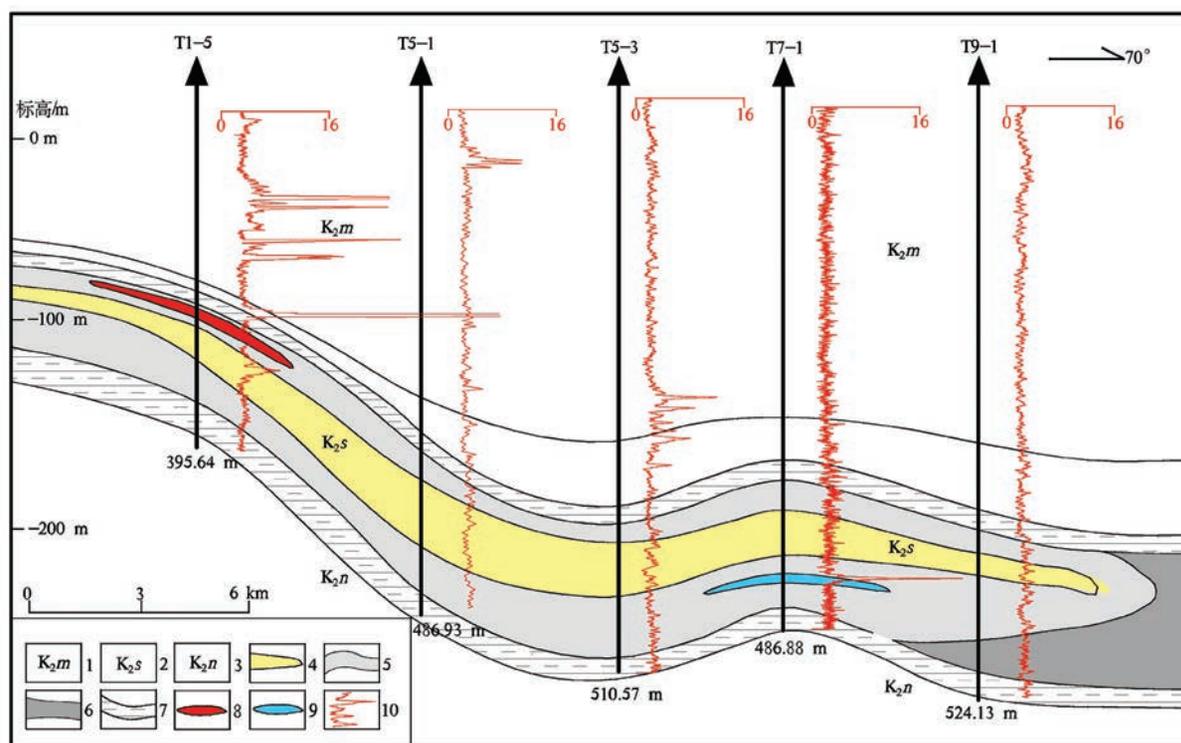


图4 T1-5~T9-1孔剖面图(修自佟术敏,2022)

1—明水组;2—四方台组;3—嫩江组;4—完全氧化带;5—过渡带;6—还原带;7—隔水层;8—工业矿体;9—矿化体;10— γ 测井曲线/ $nC \cdot (kg \cdot h)^{-1}$

Fig. 4 Drill hole logging of T5-1~T9-1 section (modified from Tong, 2022)

1—Mingshui Formation; 2—Sifangtai Formation; 3—Nenjiang Formation; 4—Completely oxidized zone; 5—Transition zone; 6—Reducing zone;

7—Aquiclude; 8—Industrial ore body; 9—Low grade mineralized body; 10—Logging curve for $\gamma \log nC \cdot (kg \cdot h)^{-1}$

方台组由剥蚀边缘的完全氧化环境过渡到盆地内部的还原环境。

钻孔揭露铀矿化多位于完全氧化带上方、下方或前锋线附近的灰色砂体中,此灰色砂体被称为过渡带砂体,即铀矿化大多产于完全氧化带附近的过渡带砂体中。T1-5工业铀矿化产于四方台组上部灰色砂质砾岩中,矿体呈板状产出,受其下部氧化砂体控制明显。T7-1孔铀矿化位于四方台组底部灰色粗砂岩中,受其上部氧化带控制明显。T3-9孔铀矿化位于氧化带前锋线位置(图5)。无论何种情形,铀矿化受氧化带控制明显。

Fe^{2+}/Fe^{3+} 值和有机碳含量在一定程度上可以反映砂体还原容量,有学者甚至指出:还原作用是唯一满足铀成矿条件的因素,其他因素都是辅助性的(赵凤民,2017),也许这种观点有些片面,但足可看出还原作用对铀成矿的巨大贡献。

研究区目的层四方台组 Fe^{2+}/Fe^{3+} 最小值为 0.05, 有机碳 $w(C)$ 最小值为 0.035%, 均位于氧化环境中;

Fe^{2+}/Fe^{3+} 最高值为 3.94, 有机碳 $w(C)$ 最大值为 0.145%, 均位于过渡带(含矿层)环境, 分析结果见表 3。

通过对研究区内四方台组砂体 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 含量及有机碳含量分析, 氧化环境中 $w(Fe^{2+})$ 为 0.09%~0.70%, 平均值为 0.31%; 过渡环境(含矿层)中 $w(Fe^{2+})$ 为 0.27%~1.26%, 平均值为 0.75%; 还原环境(无矿层)中 $w(Fe^{2+})$ 为 0.30%~0.61%, 平均值为 0.50%。 Fe^{2+} 含量在过渡环境中含量明显高于过渡环境和还原环境, 还原环境中 Fe^{2+} 含量略高于氧化环境, 且变化不大(图 6a), 氧化环境中 $w(Fe^{3+})$ 为 0.60%~1.89%, 平均值为 0.98%; 过渡环境(含矿层)中 $w(Fe^{3+})$ 为 0.29%~0.70%, 平均值为 0.49%; 还原环境(无矿层)中 $w(Fe^{3+})$ 为 0.40%~1.17%, 平均值为 0.58%。 Fe^{3+} 含量在氧化环境中含量最高, 且数值变化较大, 而在过渡环境和还原环境中相差不大(图 6b), 氧化环境中 $w(Fe^{2+}/Fe^{3+})$ 为 0.26~1.39, 平均值为 0.36; 过渡环境(含矿层)中 $w(Fe^{2+}/Fe^{3+})$ 为 0.85~3.94, 平均值为 1.61; 还原环境(无矿层)中 $w(Fe^{2+}/Fe^{3+})$ 为

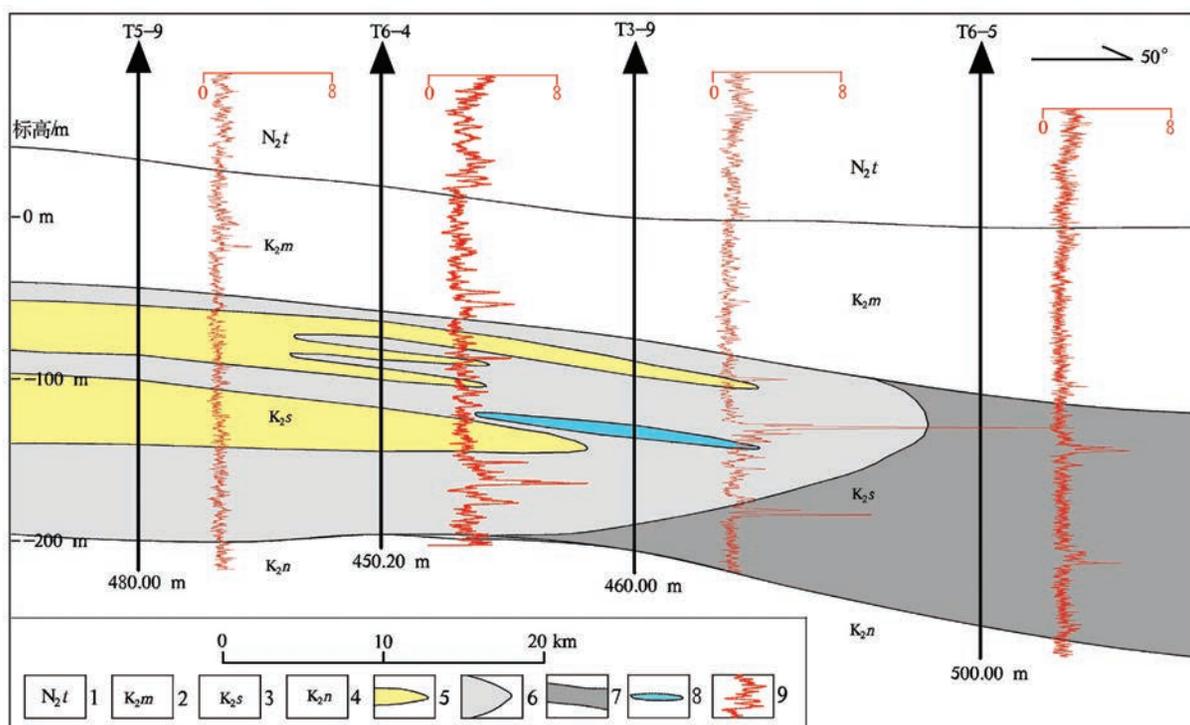


图5 T5-9~T6-5孔剖面图(修自佟术敏,2022)

1—泰康组;2—明水组;3—四方台组;4—嫩江组;5—完全氧化带;6—过渡带;7—还原带;8—矿化体;9— γ 测井曲线/ $nC \cdot (kg \cdot h)^{-1}$

Fig. 5 Drill hole logging of T5-9~T6-5 section(modified from Tong, 2022)

1—Taikang formation; 2—Mingshui Formation; 3—Sifangtai Formation; 4—Nenjiang Formation; 5—Completely oxidized zone; 6—Transition zone; 7—Reducing zone; 8—Low grade mineralized body; 9—Logging curve for γ log/ $nC \cdot (kg \cdot h)^{-1}$

0.29~1.17, 平均值为0.95。 Fe^{2+}/Fe^{3+} 值在过渡环境中普遍高于还原环境,还原环境中又普遍高于氧化环境,但数值相差不大(图6c),氧化环境中有机碳 $w(C)$ 为0.035%~0.088%,平均值为0.061%;过渡环境(含矿层)中有机碳 $w(C)$ 为0.041%~0.145%,平均值为0.078%;还原环境(无矿层)中有机碳 $w(C)$ 为0.048%~0.077%,平均值为0.063%。由于四方台组沉积期为干旱-半干旱气候,植被稀疏,有机碳含量普遍偏低,氧化环境和还原环境(无矿层)含量相差不大(图6d)。

砂体中有机碳 $w(C)$ 含量在0.1%~30%之间有利于层间氧化带型铀矿化的发育(郭庆银等,2005),有机碳含量太高,不利于氧化带的发育,对铀矿化的发育不太有利,因此,有机碳含量过高或者过低的环境并不利于铀矿的形成,而是在一定范围内的氧化-还原过渡环境更利于铀的富集沉淀,这也证实了铀矿化的形成受氧化带控制明显。正如松辽盆地南部通辽-通榆地区铀矿化大多处于 Fe^{2+}/Fe^{3+} 值在1~3之间的氧化-还原区域,有机碳 $w(C)$ 位于0.07%~0.23%的

区域(佟术敏等,2019)。当然,有学者也指出,在炭质物含量极低,甚至岩石中完全没有炭质物的灰色含水层中,发育的区域性层间氧化带受到后生还原作用(如烃储构造,还原热液作用)的改造,也可形成具有相当规模的矿床(王国荣,2002)。总之,研究区内过渡带砂体 Fe^{2+}/Fe^{3+} 值和有机碳含量适中,均有利于铀的富集沉淀。

2.4 构造条件

研究区主要包括西缘斜坡带、陆家堡凹陷及舍伯吐凸起3个二级构造单元(图7),由马北斜坡带、包日温都断裂构造带、中央构造带、交力格洼陷、三十方地洼陷和五十家子庙洼陷6个三级构造单元组成(吴兆剑等,2018)。晚白垩世四方台-明水期处于构造反转褶皱阶段,明水末期再次发生构造反转运动,使盆地进一步抬升剥蚀(黄福林等,1996)。这种持续的掀斜作用对于铀的富集起到3个积极作用:①目标层具有一定的坡度,有利于含铀含氧水从蚀源区向盆地内流动,提供了持续的铀源补给;②早期断陷边界断裂再次活动,油气、油田水等还

表3 四方台组砂体地球化学元素与铀含量分析结果

Table 3 Geochemical and uranium content analysis results of sedimentary rocks in Sifangtai Formation

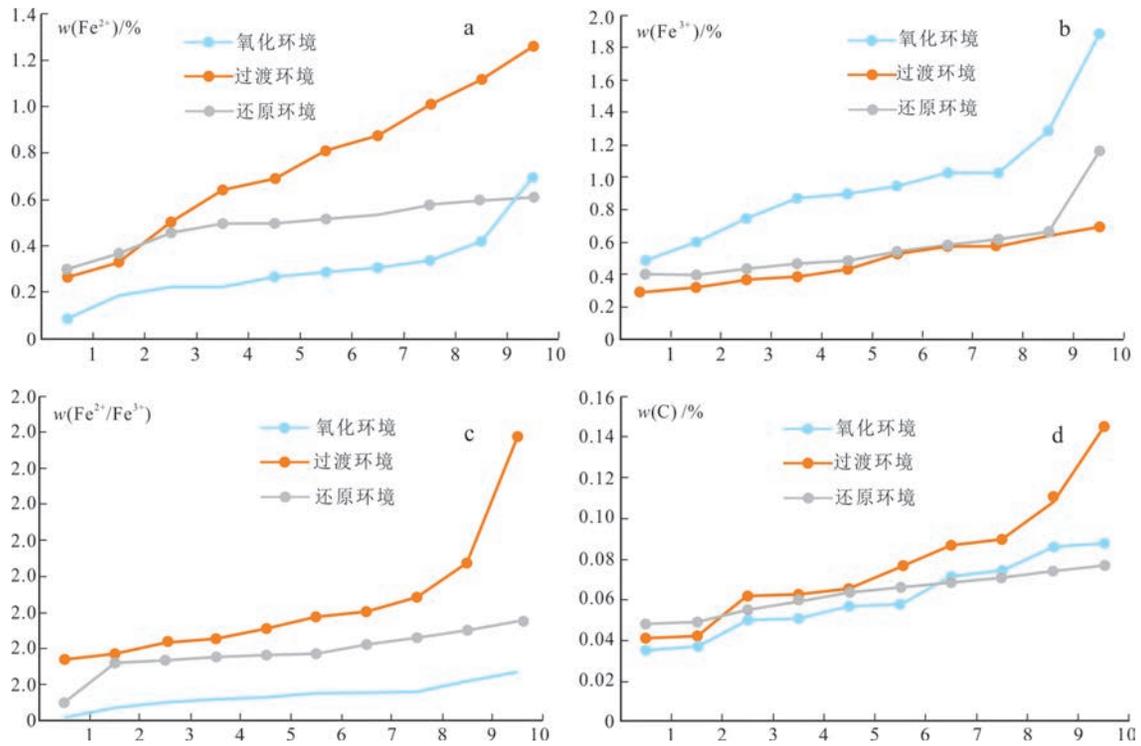
| 孔号 | 地化环境 | 岩性 | $w(\text{Fe}^{2+})/\%$ | $w(\text{Fe}^{3+})/\%$ | $w(\text{Fe}^{2+})/w(\text{Fe}^{3+})$ | $w(\text{C})/\%$ | 微量铀 $w(\text{U})/10^{-6}$ |
|--------|---------------|--------|------------------------|------------------------|---------------------------------------|------------------|---------------------------|
| T6-1 | | 砖红色细砂岩 | 0.23 | 0.60 | 0.39 | 0.050 | 1.47 |
| T6-2 | | 砖红色细砂岩 | 0.27 | 1.03 | 0.27 | 0.074 | 0.93 |
| T4-3 | | 褐黄色细砂岩 | 0.23 | 1.29 | 0.18 | 0.088 | 1.15 |
| T5-2 | | 砖红色细砂岩 | 0.31 | 0.90 | 0.34 | 0.058 | 1.18 |
| T3-2 | 氧化环境 | 砖红色中砂岩 | 0.70 | 1.03 | 0.68 | 0.071 | 3.01 |
| T5-3 | | 砖红色中砂岩 | 0.42 | 0.75 | 0.56 | 0.035 | 0.87 |
| T7-2 | | 砖红色中砂岩 | 0.29 | 0.95 | 0.31 | 0.057 | 2.72 |
| T3-9 | | 褐黄色细砂岩 | 0.09 | 1.89 | 0.05 | 0.086 | 2.46 |
| T9-11 | | 褐黄色细砂岩 | 0.34 | 0.87 | 0.39 | 0.051 | 2.60 |
| T8-1 | | 砖红色细砂岩 | 0.19 | 0.49 | 0.40 | 0.037 | 2.84 |
| | 平均值 | | 0.31 | 0.98 | 0.36 | 0.061 | 1.92 |
| T7-1 | | 灰色细砂岩 | 0.33 | 0.39 | 0.85 | 0.065 | 4.59 |
| T6-3 | | 灰色中砂岩 | 1.01 | 0.70 | 1.44 | 0.090 | 9.45 |
| T3-9 | | 灰色细砂岩 | 0.27 | 0.29 | 0.93 | 0.145 | 7.46 |
| T1-5 | 过渡环境 (含矿层) | 灰色砂质砾岩 | 0.88 | 0.58 | 1.52 | 0.042 | 41.70 |
| T6-4 | | 灰色中砂岩 | 0.50 | 0.44 | 1.14 | 0.041 | 7.58 |
| T8-1 | | 灰色细砂岩 | 1.26 | 0.32 | 3.94 | 0.062 | 8.68 |
| T4-1 | | 灰色中砂岩 | 1.12 | 0.65 | 1.72 | 0.062 | 4.70 |
| T5-3 | | 浅灰色细砂岩 | 0.69 | 0.54 | 1.28 | 0.108 | 5.27 |
| T7-2 | | 灰色中砂岩 | 0.81 | 0.37 | 2.19 | 0.087 | 4.07 |
| T8-1 | | 灰色细砂岩 | 0.64 | 0.59 | 1.08 | 0.076 | 8.68 |
| | 平均值 | | 0.75 | 0.49 | 1.61 | 0.078 | 10.22 |
| T1-1 | | 灰色中砂岩 | 0.58 | 0.55 | 1.05 | 0.071 | 2.55 |
| T3-1 | | 灰色细砂岩 | 0.60 | 0.67 | 0.90 | 0.055 | 1.77 |
| T6-2-2 | | 灰色细砂岩 | 0.52 | 0.41 | 1.27 | 0.060 | 1.02 |
| T5-1 | 还原环境 (无矿层) | 灰绿色细砂岩 | 0.37 | 0.40 | 0.93 | 0.048 | 1.97 |
| T3-3 | | 灰色中砂岩 | 0.61 | 0.44 | 1.39 | 0.077 | 1.88 |
| T4-3-2 | | 灰色细砂岩 | 0.50 | 0.59 | 0.85 | 0.066 | 1.46 |
| T3-4 | | 灰色细砂岩 | 0.46 | 0.49 | 0.94 | 0.064 | 1.81 |
| T5-3 | | 灰色细砂岩 | 0.54 | 0.47 | 1.15 | 0.067 | 5.27 |
| T9-1 | | 灰色细砂岩 | 0.50 | 0.62 | 0.81 | 0.049 | 2.81 |
| T7-2-2 | | 灰色中砂岩 | 0.30 | 1.17 | 0.26 | 0.074 | 4.07 |
| | 平均值 | | 0.50 | 0.58 | 0.95 | 0.063 | 2.46 |

注:测试工作由核工业二四三大队化验室完成,铁元素和有机质测试仪器为高频碳硫分析仪。

原流体沿断裂运移、扩散,为坳陷期铀储层提供还原剂,控制着浅部目的层的还原作用和蚀变带分布(于文斌等,2008);③形成了蚀源区补给—渗透性砂体径流—断裂或向盆内排泄的水动力系统,有利于铀的活化迁移。这也与新疆地区乃至中亚地区中生代砂岩型铀矿成矿规律相吻合(刘红旭等,2012)。

松辽盆地西部斜坡某工业油井,放射性测井资料显示该井在四方台组底部有较大放射性异常。地震

剖面显示该井位于1条NS向断裂附近,断裂从盆地基底上延300 m处被古近系覆盖。携铀水沿四方台组底不整合面运移至断裂处,被油气等有机物还原并聚集,从而在该井四方台组底部出现较大铀异常(封志兵等,2013;陈路路等,2013)。研究区多数断裂止于下白垩统,揭穿目的层的断裂对铀矿化的富集起着至关重要的作用,如陆西凹陷地震剖面D01线穿过2条主要断裂 F_{2-1} 和 F_{2-2} ,断裂距离西部剥蚀区约20 km(图8),同时2条断裂起到了控制凹陷发育,亦可导通早白

图6 不同环境砂体中 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 及有机碳含量分布特征Fig.6 Content distribution characteristics of Fe^{2+} , Fe^{3+} and organic carbon in sand bodies with different environments

至油气及排泄地下水的作用,断裂从盆地基底上延几百米处被古近系覆盖。

根据建华地区D02线地震解释综合剖面图(图9),解译断裂 $F_{1,2}$ 穿过目标层四方台组,与上述断裂 $F_{2,1}$ 和 $F_{2,2}$ 具有相似的作用,既导通早白垩世还原流体又起到排泄地下水的作用,在四方台组氧化砂体中形成一定规模的氧化-还原过渡带,使得铀元素富集成矿。这种成矿与西部斜坡区的铀富集模式十分相似。此外,断裂 $F_{1,2}$ 和 $F_{1,3}$ 使之形成局部隆起区,而放射性异常多产于隆起区和隆起与凹陷过渡部位(赵忠华等,2003)。由此可知,该地区具有成矿有利的补—径—排系统和找矿空间。

2.5 水文地质条件

2.5.1 地下水补、径、排特征

松辽盆地是一个大型的渗入型承压水盆地,存在良好的地下水补—给—排水地质条件,为层间氧化带的形成奠定了基础(刘杰等,2017;吴斌等,2018)。

研究区南部和西部基岩区为主要补给区,以大气降水为主,上部的潜水又通过渗透层下渗弹性补给。由南西向北东、由西向东径流,沿后期复活切割含水层的断裂如 F_2 、 F_3 及 $F_{2,1}$ 等作为局部排泄区,在地表以河流、水泡子等形式排出。

由于晚白垩世末期的反转运动,形成了蚀源区补给—渗透性砂体径流—断裂或向盆内排泄完整的水动力循环系统,有利于铀的迁移成矿。

2.5.2 地下水化学特征

陆家堡凹陷地下水水化学特征在水平方向上呈现一定的规律性。

由径流区上游至下游,沿径流方向,水中氯离子、钠离子含量逐渐增加,矿化度也相应增高。由近补给区到径流区中游,水化学类型以 HCO_3-Ca 型为主,局部见有 $HCO_3-Ca \cdot Mg$ 、 $HCO_3-Na \cdot Ca$ 、 $HCO_3-Na \cdot Mg$ 型,向东径流渐变为 $HCO_3-Ca \cdot Mg$ 、 $HCO_3-Ca \cdot Mg$ 型。地下水矿化度一般介于0.5~1.0g/L, pH值一般在7.50~8.00之间,至排泄区处,水化学类型逐渐转变为 $HCO_3 \cdot Cl-Ca \cdot Na$ 、 $HCO_3 \cdot Cl-Na$ 型,矿化度增大, pH值亦呈现增高趋势。

2.5.3 放射性水化学特征

据研究区开展的水化学调查得知,地下水中铀含量普遍较高,水中 $p(U)$ 一般8.41~25.10 $\mu g/L$,最高为65.10 $\mu g/L$,共发现5片水中铀异常晕。水中氡浓度平均值为6.08 Bq/L,最高为125.12 Bq/L,共发现2片水中氡异常晕。水中氡的分布规律基本与铀分布相同,二者相关性较好。

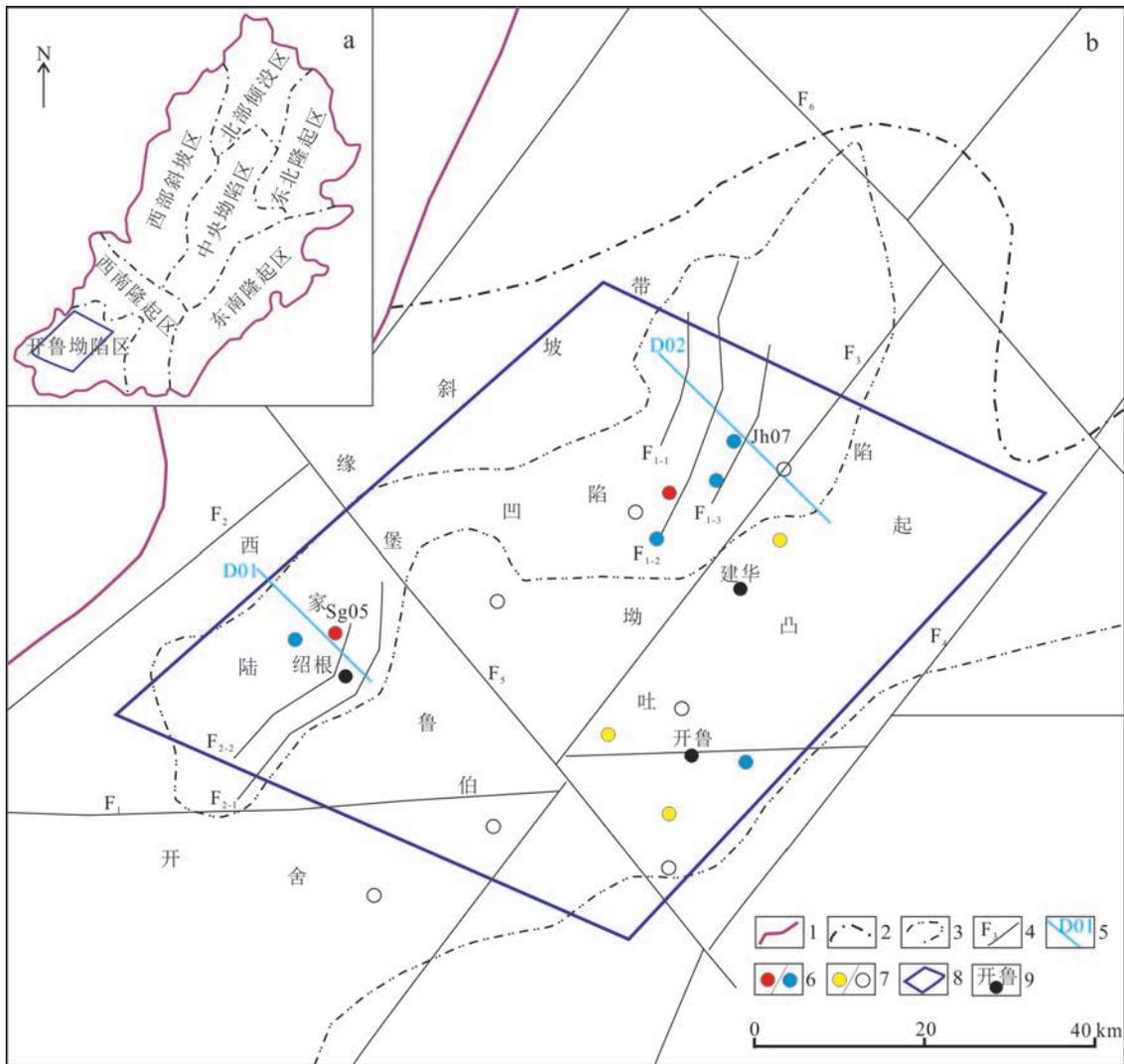


图7 松辽盆地构造单元简图(a)、构造单元示意图(b,修自宋海瑞,2021)

1—盆地界线;2—二级构造单元;3—三级构造单元号;4—断裂及编号;5—地震剖面线;6—铀工业矿孔/铀矿化孔;7—铀异常孔/无矿孔;
8—研究区;9—城镇

Fig. 7 Schematic map showing the tectonic units (a) and regional structure of the Songliao basin (b, modified from Song H R, 2021)

1—Basin boundary; 2—Second-order tectonic unit; 3—third-order tectonic unit; 4—Fault and numbering; 5—Seismic profile line; 6—Drill hole having uranium industrial grade interception/drill hole with low grade uranium mineralization; 7—Uranium anomaly hole/barren hole;
8—Research area; 9—Town

水中铀含量与 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 关系较其他元素更为密切,而陆家堡凹陷的主要水化学类型为 HCO_3^- -Ca型水,这表明了在该区进行水化学找矿具有有利的水文地球化学背景。

3 铀矿化特征、主控因素及找矿标志

3.1 铀矿化发育情况

研究区铀矿化受层间氧化带控制明显。核工业

系统目前在该区钻探查证发现1个工业孔(T1-5)、多个铀矿化孔和异常孔。T1-5孔的铀矿化主要产于氧化-还原过渡带的灰色砂质砾岩中,累计厚度约47.00 m,渗透性良好,埋深310.50~357.50 m。其顶板为浅灰绿色泥岩,底板为黄绿色泥岩,“泥-砂-泥”结构稳定。矿体厚度为1.50 m,品位0.0939%, $w(\text{U})$ 3.03 kg/m^2 ,胶结疏松(佟术敏等,2022)。

煤炭部门在陆家堡凹陷绍根地区发现一定数量的铀矿化井。矿体主要发育于四方台组底板灰绿色

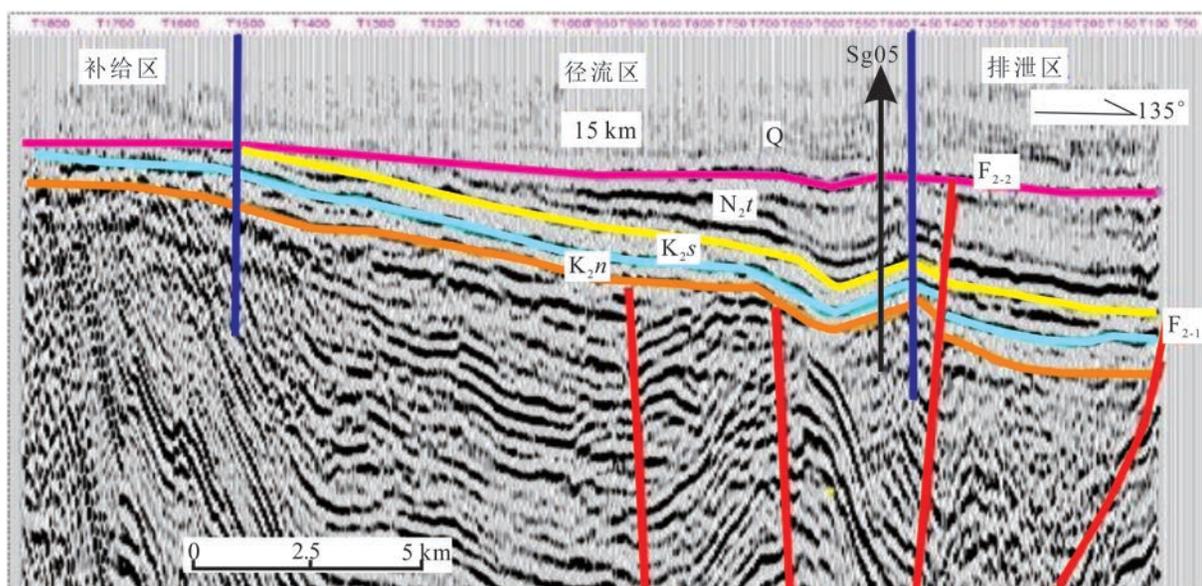


图 8 陆家堡凹陷 F_{2.1} 和 F_{2.2} 断裂垂向分布特征(修自魏达, 2018)

Fig. 8 Vertical distribution characteristics of F_{2.1} and F_{2.2} fractures in Lujiabu depression (modified from Wei, 2018)

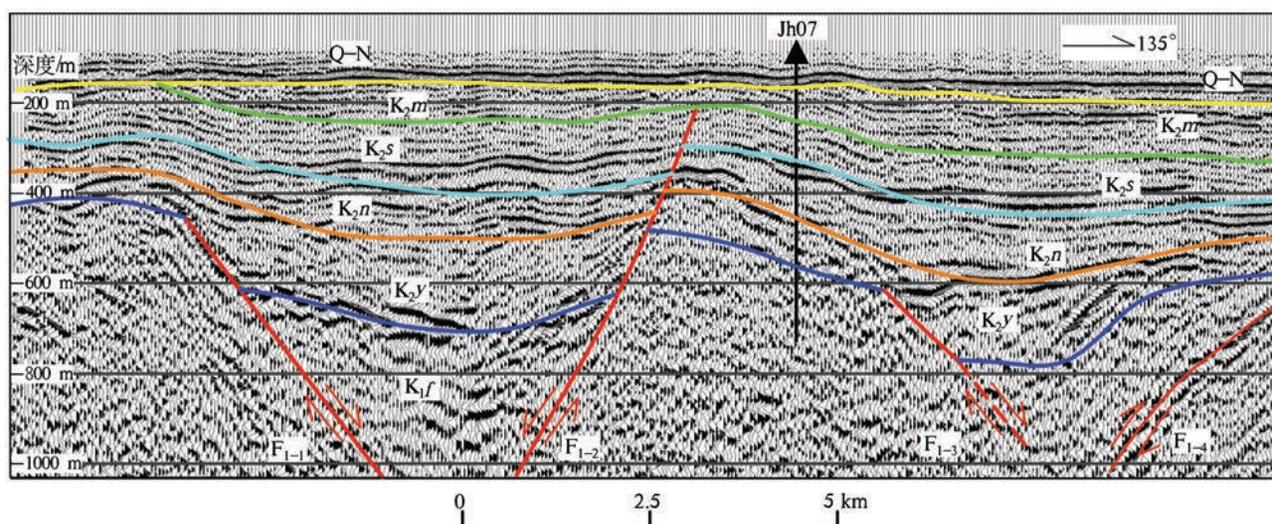


图 9 D02 线地震综合解释

Q-N—第四系—新近系; K_{2m}—明水组; K_{2s}—四方台组; K_{2n}—嫩江组; K_{2y}—姚家组; K_{1f}—阜新组

Fig. 9 Comprehensive interpretation of line D02 seismic profile

Q-N—Quaternary—Neogene; K_{2m}—Mingshui Formation; K_{2s}—Sifangtai Formation; K_{2n}—Nenjiang Formation; K_{2y}—Yaojia Formation; K_{1f}—Fuxin Formation

砂质砾岩中, 矿体形态以板状为主(吴兆剑等, 2018)。通过对绍根地区岩芯观察和测井资料对比可知, 四方台组自下而上发育灰绿色砂质砾岩、褐红色砂质砾岩、褐红色含砾泥岩和紫红色砂质泥岩, 而铀矿化主要赋存于灰绿色砂质砾岩。石油部门在陆家堡凹陷开鲁地区北部发现了 1 个工业铀矿井、在

陆东和陆西凹陷各发现 10 余个铀矿化异常井(魏达, 2018)。同时通过对石油探井和开发井的复查, 发现有 2 个井达到了铀矿化标准(雷安贵等, 2016), 说明研究区铀矿化发育情况良好。

3.2 主控因素

通过对开鲁拗陷铀源、岩性岩相、砂体氧化-还原

及构造特征的综合分析,按照控矿因素重要性排序依次为铀源、岩性岩相、砂体氧化-还原及构造4个方面。

(1) 铀源条件:陆家堡凹陷蚀源区的外部铀源和地层本身砂体的内部铀源,是控制该区砂岩型铀矿化形成的决定因素。

(2) 岩性岩相:扇上河道和辫状河砂体是良好的储矿空间,铀矿化多赋存在具有一定厚度的砂体中,是铀成矿的必要条件。

(3) 砂体氧化-还原:铀矿化异常受层间氧化带控制明显,主要位于层间氧化带的上、下两翼及氧化-还原过渡带前锋线附近,常呈板状或薄层状产出,是铀成矿的关键因素。

(4) 构造特征:部分断裂构造导通深部还原流体,多期次沉降和挤压抬升,导致研究区发育多个地

层产状较为平缓的背斜和向斜构造,成为铀元素富集成矿的助推剂。

3.3 找矿标志

根据铀矿化发育特征和主控因素,初步总结了以下4条找矿标志,以便进一步指导陆家堡凹陷的铀矿找矿工作。

(1) 构造标志

揭穿目标层的断裂附近,导通的深部还原流体与地层氧化砂体形成氧化-还原过渡带,或者构造作用使地层形成局部斜坡或者隆起,均有利于铀元素的富集成矿,也是目前已发现的工业矿体的产出部位。

(2) 岩性岩相标志

四方台组扇上河道和辫状河道沉积的泛连通砂体是主要赋矿层位。四方台组垂向上发育多个沉积

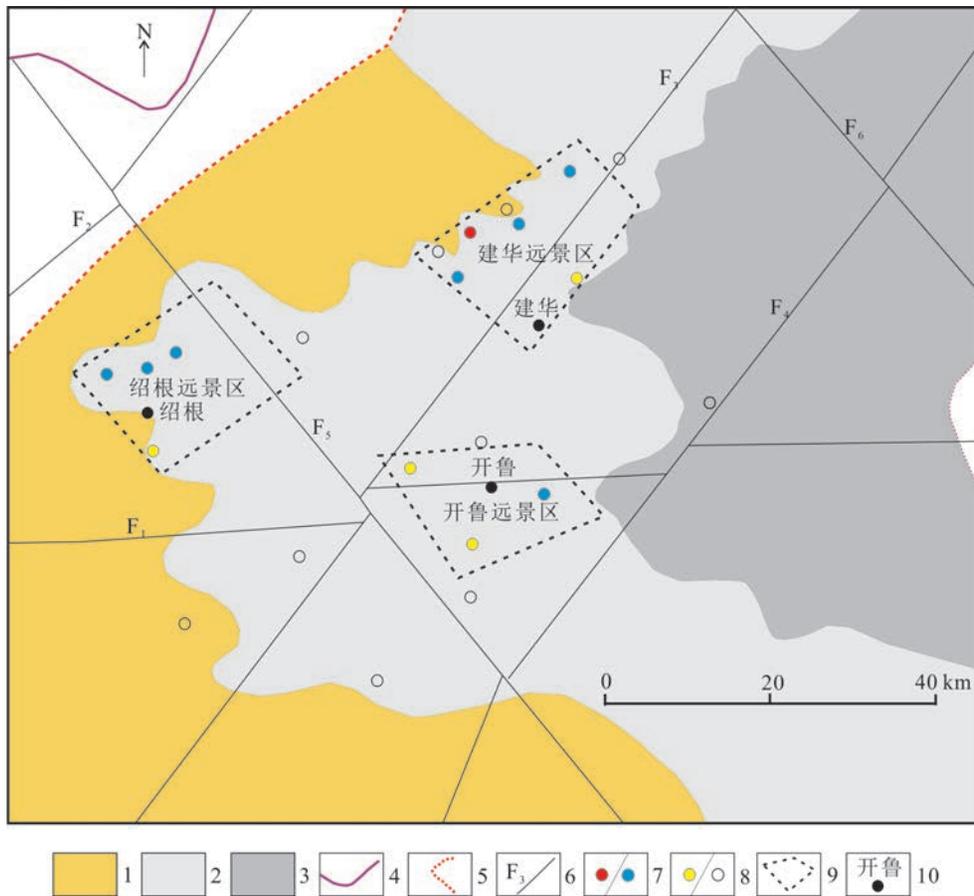


图10 四方台组成矿预测图

1—完全氧化区;2—过渡区;3—还原区;4—盆地边界;5—剥蚀边界;6—断裂及编号;7—铀工业孔/铀矿化孔;8—铀异常孔/无矿孔;9—成矿远景区;10—城镇

Fig.10 Generation of highly prospective areas for uranium mineralization in Sifangtai Formation

1—Complete oxidation zone; 2—Transition zone; 3—Reducing zone; 4—Basin boundary; 5—Denudation boundary; 6—Fault and numbering; 7—Drill hole having uranium industrial grade interception /drill hole with low grade uranium mineralization; 8—Uranium anomaly hole/barren hole; 9—Metallogenic prospective area; 10—Town

旋回,具有稳定的泥-砂-泥结构,统计表明,砂体厚度在50~70 m的范围是找矿的有利部位。

(3) 砂体氧化-还原标志

宏观上铀矿化产于氧化带前锋线或氧化带附近灰色砂体中,是铀成矿的直接控制因素之一,也是铀矿找矿直接的岩石地球化学标志。微观上铀多富集于微量铀高于偏高值的区域, Fe^{2+}/Fe^{3+} 值和有机碳含量适中的过渡带环境中。砂体中铀含量是铀富集成矿最直接的证据。

(4) 水中铀异常晕标志

水中铀异常晕大多沿断裂呈串珠状分布,说明断裂导通了目标层地下水,是区域主要控矿因素。水中铀异常晕及其附近的部位发现了较好的铀矿化异常孔。由此可知,水中铀异常晕是有效的找矿标志之一。

4 铀成矿潜力评价

上白垩统四方台组已成为开鲁拗陷西部重要找矿目标层。通过对核工业、煤田和石油部门的有关资料进行整理和分析,在建华和绍根地区发现工业孔2个,矿化孔10余个,铀矿化均产于四方台组。此外,多条断裂揭穿目标层,形成局部斜坡地带和局部隆起区,导通深部还原流体,形成了一定规模的氧化-还原过渡带砂体。发育扇上河道砂体,砂体厚度30~70 m,发现大面积微量铀和水中铀异常区。开鲁地区发现铀矿化孔1个和多个铀异常孔。这些矿化孔和异常孔位于 F_1 、 F_6 及 F_{10} 断裂夹持部位,形成地层局部缓坡带,形成有利于铀成矿的氧化-还原障。发育辫状河相砂体,砂体厚度50~80 m,发现大面积微量铀增高区和水中铀异常区。

综上所述,研究区各种成矿要素和找矿标志在空间上匹配性良好,具有较好的砂岩型铀矿找矿前景。初步在建华、绍根及开鲁圈定3片成矿远景区(图10),具备形成一定规模铀矿床的潜力,值得进一步开展钻探查证工作。

5 结 论

(1) 研究区具有铀源、构造、岩性岩相、砂体氧化-还原和水文地质等有利铀成矿的地质条件,尤其是较高浸出率的蚀源区和地层砂体中丰富的铀源构

成了内外双重铀源供给的有利条件。

(2) 研究区已发现多个工业、矿化孔,较集中分布在建华、绍根和开鲁地区等地。铀矿化受氧化带和断裂控制,宏观上氧化带控矿体现在氧化砂体分布特征,微观上受控于 Th/U 值、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 及有机碳含量分布等。

(3) 结合铀矿化发育特征和主控因素,梳理了研究区主控因素和找矿标志包括铀源、岩性岩相、砂体氧化-还原、构造及水中铀异常等方面。

(4) 综合成矿要素和找矿标志在空间上的匹配性,初步在建华、绍根和开鲁地区圈定3片成矿远景区,为陆家堡凹陷乃至松辽盆地的新地区、新层位找矿突破提供指示意义。

References

- Cai J F, Yan Z B, Zhang L L, Feng Z B, Huang X, Niu F J and Xia F. 2018. Relationship between grey sandstone and uranium mineralization in Yaojia formation of upper Cretaceous in Tongliao, Inner Mongolia[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 41(4):328-335(in Chinese with English abstract).
- Cai Y Q and Li S X. 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 L L, Nie F J and Yan Z B. 2013. Analysis on uranium metallogenic conditions of Sifangtai Formation in western slope of Songliao Basin[J]. World Nuclear Geoscience, 30(2):36-41(in Chinese with English abstract).
- Chen L L, Li M, Tang C, He J, Chen Y, Zhao H L and Tang L. 2022. Petrology and mineralogy characteristics of the uranium-bearing Sandstone from Sifangtai formation in Sanzhao Depression of Northern Songliao Basin and their geological implications[J]. North China Geology, 45(4): 10-18(in Chinese with English abstract).
- Chen Z Y, Chen D S and Gu K H. 2011. Research and evaluation of uranium deposits in China: sandstone type uranium deposits volume[R]. Beijing:China Nuclear Geology. 39p(in Chinese).
- Ding B, Liu H X, Liu Z Y, Jia L C, Zhang Z M and Huang S H. 2021. Study of the ore-controlling function and metallogenic model of local excretion sources in sandstone-type uranium deposits in the southwestern Songliao basin[J]. Acta Geologica Sinica, 95(12): 3850-3825(in Chinese with English abstract).
- Feng Z B, Nie B F, Nie F J, Jiang L, Xia F, Li M G, Yan Z B, He J F and Cheng R D. 2021. Application progress of geophysical methods in exploration of sandstone-type uranium deposit[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 45(5): 1179-1188(in Chinese with English abstract).

- Feng Z B, Nie F J, Ning Y L, Jiang L, Xia F, He J F and Sheng Z N. 2022. Discussion and design of exploration technology for sandstone-type uranium deposits in the interior of the sedimentary basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(6): 2217-2229(in Chinese with English abstract).
- Feng Z B, Nie F J, Yan Z B, Zhong Y Q, Gu S F and Jiang L. 2013. Mineralizing conditions and metallogenic model of uranium in west slope of Songliao basin[J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 32(4):36-41(in Chinese with English abstract).
- Fu J, Zhao N B, Pei C K and Li X C. 2013. Geochemical indicator element characteristics and anomaly model of granite type uranium deposit in China[J]. *World Nuclear Geoscience*, 30(4):217-223(in Chinese with English abstract).
- Ge R F, Zhang Q L, Wang L S, Xie G A, Xu S Y, Chen J and Wang X Y. 2010. Tectonic evolution of Songliao basin and the prominent tectonic regime transition in eastern China[J]. *Geological Review*, 56(2):180-182(in Chinese with English abstract).
- Guo Q Y, Li Z Y and Wang W G. 2005. Features of organic substances and their relationship to uranium mineralization in Xihulitu basin, Inner Mongolia[J]. *Uranium Geology*, 21(1): 16-22(in Chinese with English abstract).
- Guo Q, Xing Z C, Qin M K, Jia L C, Luo M, Li Y and Zhang H. 2021. Stratigraphic correlation of late Cretaceous uranium-bearing-strata in northeastern Songliao basin and its significance for deep prospecting[J]. *Uranium Geology*, 37(5):797-806(in Chinese with English abstract).
- Haoll S M, Mihalasky M J and Tureck K R. 2017. Genetic and grade and tonnage models for sandstone-hosted roll-type uranium deposits, Texas Coastal Plain, USA [J]. *Ore Geology Reviews*, 80: 716-753.
- Hu P, Yan Q S, Ye S X, Cao H J, Guo X and Wang X M. 2020. Application of the thorium-uranium ratio in identifying uranium metallogenic environment: An example of the Shulouqiu uranium deposit in northern Guangdong Province[J]. *Geology and Exploration*, 56(1):37-45(in Chinese with English abstract).
- Huang F L and Luo C C. 1996. Structural trap series in south Songliao basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 17(4):333-336(in Chinese with English abstract).
- Huang S J. 2018. Discussion on the forming condition of Ultra, large and super large sandstone type uranium deposit[J]. *Uranium Geology*, 34(3):129-137(in Chinese with English abstract).
- Jaireth S, Roach I C, Bastrakov E and Liu S F. 2015. Basin-related uranium mineral systems in Australia: A review of critical features[J]. *Ore Geology Reviews*, 76: 360-394.
- Jiao Y Q, Wu L Q and Rong H. 2018. Model of inner and outer reductive 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).
- Lei A G and Wei D. 2016. Condition and prospecting direction of uranium metallization in Sifangtai Formation in Lujiapu sag[J]. *Energy Technology and Management*, 41(2):29-32(in Chinese).
- Leng Q L, Huang Y L, Ran B, Zhang J M and Wang P J. 2020. Characteristics and controlling factors of dissolution pores in pyroclastic rock reservoirs: A case study of lower cretaceous of Lujiapusag, southern Songliao basin[J]. *Global Geology*, 39(2): 368-370(in Chinese with English abstract).
- Li S F and Zhang Y. 2004. Formation mechanism of uranium minerals at sandstone type uranium deposits[J]. *Uranium Geology*, 20(2): 80-90(in Chinese with English abstract).
- Li T. 1976. Chemical element abundances in the Earth and its major shells[J]. *Geochimica*, 5(3): 167-174(in Chinese with English abstract).
- Li Y, Nie F J and Yan Z B. 2021. Geochemical characteristics, provenance, tectonic settings and their relationships with uranium mineralization of the Yaojia Formation in the northeastern margin of the Songliao basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(11): 3473-3487 (in Chinese with English abstract).
- Liu G A, Qiao P, Kang S H, Peng R Q, Ren X P and Huang Q F. 2020. Study on the relationship of sand-body heterogeneity to uranium mineralization in Manglai deposit, Erlian Basin[J]. *Uranium Geology*, 36(5):373-381(in Chinese with English abstract).
- Liu H X, Liu Z Y, Suo S X, Yu H, Cao Q Y and Zhang X. 2012. A preliminary study on the mesozoic and cenozoic tectonic evolution and sandstone type uranium mineralization in Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 31(Supp.):207-208(in Chinese with English abstract).
- Liu J, Chen Z L, Zhang H X and Hu J M. 2003. Study on the relationship of sand-body heterogeneity to uranium mineralization in Manglai deposit, Erlian Basin[J]. *Journal of Geomechanics*, 9(3): 241-244(in Chinese with English abstract).
- Liu J, Wang M M, Qiu Y B, Zhang Z F and Wang F D. 2017. Sedimentary facies and its control on uranium mineralization of down section of Badaowan Formation in Kujertai uranium mineral deposit[J]. *China Mining Magazine*, 26(Sup)231-236(in Chinese with English abstract).
- Liu Y, Wang J L, Li J G, Tang C, Zhong Y Q, Gu S F, Wei J L and Yang S. 2020. Fine stratigraphic division of the Upper Cretaceous SiFangTai Formation in the DaQing placanticline, northern SongLiao basin and its significance for uranium mineralization[J]. *Journal of Stratigraphy*, 44(2): 181-190(in Chinese with English abstract).
- Luo M and Zhao J. 2020. Ore-forming conditions and distribution in situ leaching sandstone-type uranium ore in Songliao Basin[J]. *Mineral Deposits*, 21(Supp.): 870-873(in Chinese with English abstract).
- Luo Y, He Z B, Ma H F and Sun X. 2012. Metallogenic characteristics of Qianjiadian sandstone uranium deposit in Songliao Basin[J]. *Mineral Deposits*, 31(2): 391-393(in Chinese with English abstract).
- Pei J X. 2015. Discussion on relationship between volcanic activity and hydrocarbon of Lujiapu depression[J]. *Petroleum Geology*

- and Engineering, 29(2):1-4(in Chinese).
- Qui Y B, Yin H S, Zhang Z F, Wang G, Liu J P, Jiang H, Zhang H J, Li Y L and Hao Y Z. 2015. Lithology-lithofacies characteristics and Its relationship to uranium deposit of lower Xishanyao Formation in Kuosijiaer area of Yili Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 33(4):387-696(in Chinese with English abstract).
- Rong H, Jiao Y Q, Wu L Q, Ji D M, Li H L, Zhu Q, Cao M Q, Wang X M, Li Q C and Xie H L. 2016. Epigenetic alteration and Its constraints on uranium mineralization from the Qianjiadian uranium deposit, southern Songliao Basin[J]. Earth Science, 41(1):153-164 (in Chinese with English abstract).
- Shan Z B, Lei A G, Song B R, Ao C, Yang S L and Han H D. 2022. Features of clay minerals in the upper cretaceous Yaojia Formation sandstones of the Qianjiadian area in the Songliao Basin and its relation to uranium mineralization[J]. Geology in China, 49(1): 271-275(in Chinese with English abstract).
- Song H R, Liu D L, Tong S M and Yang W D. 2021. Heterogeneity of sand body in Sifangtai Formation and its relationship with uranium mineralization in Lujiapu Sag[J]. Uranium Geology, 37(5): 879-888(in Chinese with English abstract).
- Tong S M, Ning J, Liu D L, Feng Z B, Cai J F, Song H R, Li J M and Ding H. 2019. Uranium, Iron and Carbn elements in Tongliao-Tongyu area in the South of Songliao basin and its prospecting significance[J]. Uranium Geology, 35(5):282-285(in Chinese with English abstract).
- Tong S M, Liu D L and Song H R. 2022. Report on the results of investigation and evaluation of uranium resources in Futong-Jianhua area, Tongliao City, Inner Mongolia[R]. Chifeng: Geological Party No. 243, CNNC. 98p(in Chinese).
- Wang G R. 2002. Oxidization and migration of organic matier in mineralization of interlayer seeping uranium[J]. Xinjiang Geology, 20(2):241-244(in Chinese with English abstract).
- Wei D. 2018. A study on uranium metallogenic conditions in Lujiapu area[D]. Dating: Northeast Petroleum University. 79p. (in Chinese with English abstract).
- Wu B, Zhu L J, Hou M C, Chao H, Jiang W J, Shi X, Luo H W, Cao H Y and He J W. 2018. Discussion on the sedimentary environment of the Middle Jurassic Xishanyao Formation in the southern Margin of the Yili Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 36(3):456-467(in Chinese with English abstract).
- Wu Z J, Han X Z and Hu H. 2018. Sedimentary tectonic evolution and uranium mineralization of post Late Cretaceous in Shaogen area of Lujiapu Sag, Kailu Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, (36): 20-32(in Chinese with English abstract).
- Xia Y L and Liu H B. 2005. Pre-enrichment and metallogeny of uranium in Zhiluo Formation sand bodies of Dongsheng area, Ordos basin[J]. World Nuclear Geoscience, 22(4): 187-190(in Chinese with English abstract).
- Xia Y L, Zheng J W, Li Z Y, Li L Q and Tian S F. 2010. Metallogenic characteristics and models in Qianjiadian uranium deposit, Songliao Basin[J]. Mineral Deposits, 29(Supp.): 154-155(in Chinese with English abstract).
- Xing Z C, Qin M K, Luo M, Jia L C, Li Y, Guo Q and Zhang H. 2021. Sedimentary facies and uranium prospecting potential of Quantou Formation in the Qing'an area, northeastern margin of Songliao Basin[J]. Geology and Exploration, 57(6): 1327-1336(in Chinese with English abstract).
- Xu H, Cui H M, Cai Y Q and He D B. 2011. Study on geology-geophysical prospecting model of uranium deposit of Taoshan-Zhuguangshan rock[J]. Journal of East China Institute of Technology(Natural Science), 34(4): 315-322. (in Chinese with English abstract).
- Yi C, Zheng Y L and Wang M T. 2013. Heterogeneity of uranium host rocks in Zhiluo Formation in Dongsheng area its relation to uranium mineralization[J]. Uranium Geology, 29(3): 139-145(in Chinese with English abstract).
- Yi C, Liu H X, Cai Y Q, Zhang Y Y, Li L Q, Li X D, Zhang K, Ding B and Li P. 2020. Research progress on metallogenic mechanism and information identification technique of sandstone type uranium deposit[J]. Uranium Geology, 36(2): 73-81(in Chinese with English abstract).
- Yu N A, Si M X Z, Liu X X, Wang S B and Zhu Q. 2019. Tectonic evolution of Songliao Basin and the prominent tectonic regime transition in eastern China[J]. Geological Review, 65(Supp.): 191-192 (in Chinese with English abstract).
- Yu W B, Dong Q S, Zhou L Y, Zhu J F, Zhang Y and Li G P. 2008. Action of reversal fault structure on sandstone type uranium mineralization in the South of Songliao Basin[J]. Uranium Geology, 24 (4):195-200(in Chinese with English abstract).
- Yu Y, Wang Z W, Ning Q Q and Xu F H. 2020. Logging evaluation of in-situ leachable sandstone uranium mineralization in Sifangtai Formation of Daqing Placanticline, Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 50(3):929-937(in Chinese with English abstract).
- Zhang H, Nie F J, Cai J F, Li Y, Luo M and Yan Z B. 2023. Analysis of favorable metallogenic conditions and exploration direction of sandstone-type uranium deposits in northern Songliao Basin in China[J]. World Nuclear Geoscience, 40(2): 174-183(in Chinese with English abstract).
- Zhang J D, Xu G Z, Lin J R, Peng Y B and Wang G. 2010. The implication of six kinds of new sandstone-type uranium deposits to uranium resources potential in North China[J]. Geology in China, 37 (5):1434-1449(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z H and Zhang B T. 1991. Study on uranium-producing granite and related uranium deposits in South China[M]. Beijing: Atomic Energy Press. 82-83(in Chinese).
- Zhao F M. 2017. Recognition on the role of reducing action in uranium metallization[J]. Uranium Geology, 33(4): 193-214(in Chinese with English abstract).
- Zhao L, Hu Z G, Hua B, Mei Z H, Qin F, Wu C W, Wang F W, Zhang Z W, Sun F, Li N and Wang X Y. 2017. Mineralization potential and prospecting direction of sandstone-type uranium deposits in

- the western margin of Junggar basin[J]. *Geology and Exploration*, 63 (Supp.):507-514(in Chinese with English abstract).
- Zhao L, Chen H, Cai C F, Jin R S and Wei J L. 2022. Geochemical characteristics of hydrocarbons in ore-rich sandstones in the Qianjiadian uranium deposit, southwestern Songliao basin[J]. *Geological bulletin of china*, 41(2):498-507(in Chinese with English abstract).
- Zhao Y, Xu Q, Liang Y P, Zhao H S, Tang C M and Zheng C. 2018. Uranium mineralization characteristics of Cretaceous period and prospecting direction of the Hurenbuqi depression in Erlian Basin, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 45(1): 168-176(in Chinese with English abstract).
- Zhao Z H, Fan Y J, Zhang Z Q and Bai J P. 2003. Analysis on metallogenic conditions and prospect prognosis for interlayer oxidation zone sandstone-type uranium deposit at western slope of Songliao Basin[J]. *Uranium Geology*, 19(3):154-159(in Chinese with English abstract).
- Zhao Z H, Zhang Z Q, Yu W B and Dong Q S. 2012. The major controlling factors and prospecting guide of sandstone-type uranium mineralization in southern Songliao Basin[J]. *World Nuclear Geoscience*, 29:200-202(in Chinese with English abstract).
- Zheng J W. 2010. Geological setting and exploration potential of Qianjiadian uranium deposit in Kailu Basin[J]. *Uranium Geology*, 26 (4):193-200(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 蔡建芳, 严兆彬, 张亮亮, 封志兵, 黄笑, 聂逢君, 夏菲. 2018. 内蒙古通辽地区上白垩统姚家组灰色砂岩成因及其与铀成矿关系[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 41(4): 328-335.
- 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.
- 陈路路, 李名, 汤超, 贺赞, 陈印, 赵华雷, 唐力. 2022. 松辽盆地北部三肇凹陷四方台组含铀砂岩岩石学、矿物学特征及其地质意义[J]. *华北地质*, 45(4): 10-18.
- 陈路路, 聂逢君, 严兆彬. 2013. 松辽盆地西部斜坡带四方台组铀成矿条件分析[J]. *世界核地质科学*, 30(2): 36-41.
- 陈祖伊, 陈戴生, 古抗衡. 2011. 中国铀矿床研究评价:砂岩型铀矿床卷[R]. 北京: 中国核工业地质局. 39页.
- 单芝波, 雷安贵, 宋柏荣, 奥琮, 杨松林, 韩洪斗. 2022. 松辽盆地钱家店地区姚家组砂岩黏土矿物特征及其与铀矿化的关系[J]. *中国地质*, 49(1):271-275.
- 丁波, 刘红旭, 刘章月, 贾立城, 章展铭, 黄少华. 2021. 松辽盆地西南部砂岩型铀矿中局部排泄源的控矿作用与成矿模式研究[J]. *地质学报*, 95(12): 3850-3825.
- 封志兵, 聂冰锋, 聂逢君, 江丽, 夏菲, 李满根, 严兆彬, 何剑锋, 程若丹. 2021. 地球物理方法在砂岩型铀矿勘查中的应用进展[J]. *物探与化探*, 45(5): 1179-1188.
- 封志兵, 聂逢君, 宁媛丽, 江丽, 夏菲, 何剑锋, 盛洲宁. 2022. 盆地内部砂岩型铀矿找矿技术的设计与探讨[J]. *地质学报*, 96(6): 2217-2229.
- 封志兵, 聂逢君, 严兆彬, 钟延秋, 谷社峰, 江丽. 2013. 松辽盆地西部斜坡铀成矿条件及聚铀模式[J]. *大庆石油地质与开发*, 32(4): 36-41.
- 付锦, 赵宁博, 裴承凯, 李新春. 2013. 中国花岗岩型铀矿区域地球化学指示元素特征及异常模式[J]. *世界核地质科学*, 30(4): 217-223.
- 葛荣峰, 张庆龙, 王良书, 解国爱, 徐士银, 陈娟, 王锡勇. 2010. 松辽盆地构造演化与中国东部构造体制转换[J]. *地质论评*, 56(2): 180-182.
- 郭强, 邢作昌, 秦明宽, 贾立城, 罗敏, 李研, 张航. 2021. 松辽盆地东北缘晚白垩世含铀地层对比及其深部找矿意义[J]. *铀矿地质*, 37(5): 797-806.
- 郭庆银, 李子颖, 王文广. 2005. 内蒙古西胡里吐盆地有机质特征及其与铀矿化的关系[J]. *铀矿地质*, 21(1): 16-22.
- 胡鹏, 闫秋实, 叶松鑫, 曹豪杰, 郭新文, 王兴明. 2020. 钍铀比值在判别铀成矿环境中的应用研究[J]. *地质与勘探*, 56(1): 37-45.
- 黄福林, 骆传才. 1996. 松辽盆地南部构造圈闭系列[J]. *石油与天然气地质*, 17(4): 333-336.
- 黄世杰. 2018. 中国特大、超大型砂岩型铀矿形成条件探讨[J]. *铀矿地质*, 34(3): 129-137.
- 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.
- 雷安贵, 魏达. 2016. 陆家堡凹陷四方台组铀成矿条件及找矿方向[J]. *能源技术与管理*, 41(2): 29-32.
- 冷庆磊, 黄玉龙, 冉波, 张甲明, 王璞珺. 2020. 火山碎屑岩储层溶蚀孔隙发育特征与控制因素:以松辽盆地南部陆家堡凹陷下白垩统为例[J]. *世界地质*, 39(2): 368-370.
- 黎彤. 1976. 化学元素的地球丰度[J]. *地球化学*, 5(3): 167-174.
- 李盛富, 张蕴. 2004. 砂岩型铀矿床中铀矿物的形成机理[J]. *铀矿地质*, 20(2): 80-90.
- 李研, 聂逢君, 严兆彬. 2021. 松辽盆地东北缘姚家组岩石地球化学特征、物源构造环境及其与铀成矿关系浅析[J]. *地质学报*, 95 (11): 3473-3487.
- 刘国安, 乔鹏, 康世虎, 彭瑞强, 任晓平, 黄镗俯. 2020. 二连盆地芒来矿床砂体的非均质性与铀成矿关系研究[J]. *铀矿地质*, 36(5): 373-381.
- 刘红旭, 刘章月, 所世鑫, 虞航, 曹清艳, 张晓. 2012. 新疆中生代构造演化特征与砂岩型铀成矿作用初探[J]. *矿床地质*, 31(增刊): 207-208.
- 刘健, 陈正乐, 张红喜, 胡健民. 2003. 准噶尔盆地西北部中生代地层铀成矿能力探讨[J]. *地质力学学报*, 9(3): 241-244.
- 刘杰, 王毛毛, 邱余波, 张占峰, 王福东. 2017. 库捷尔太铀矿床八道湾组下段沉积相对铀成矿的控制[J]. *中国矿业*, 26(增刊2): 231-236.
- 刘阳, 王军礼, 李建国, 汤超, 钟延秋, 谷社峰, 魏佳林, 杨帅. 2020. 松辽盆地北部大庆长垣上白垩统四方台组精细地层划分及其铀成矿意义[J]. *地层学杂志*, 44(2): 181-190.
- 罗梅, 赵杰. 2002. 松辽盆地地浸砂岩型铀矿形成条件与分布特征[J]. *矿床地质*, 21(增刊): 870-873.

- 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):391-393.
- 裴家学. 2015. 陆家堡凹陷火山活动与油气关系探讨[J]. 石油地质与工程, 29(2):1-4.
- 邱余波,伊海生,张占峰,王果,刘俊平,蒋宏,张虎军,李彦龙,郝以泽. 2015. 伊犁盆地阔斯加尔地区西山窑组下段岩性岩相特征及与铀成矿关系[J]. 沉积学报, 33(4):387-696.
- 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):153-164.
- 宋海瑞,柳东良,佟术敏,杨文达. 2021. 陆家堡凹陷四方台组砂体非均质性特征与铀成矿关系[J]. 铀矿地质, 37(5): 879-888.
- 佟术敏,宁君,柳东良,封志兵,蔡建芳,宋海瑞,李继木,丁浩. 2019. 松辽盆地南部通辽-通榆地区姚家组铀、铁和有机碳分布及指示意义[J]. 铀矿地质, 35(5): 282-285.
- 佟术敏,柳东良,宋海瑞. 2022. 内蒙古通辽市富通-建华地区铀矿资源调查评价成果报告[R]. 赤峰:核工业二四三大队. 98页.
- 王国荣. 2002. 层间渗入铀成矿中有机质的氧化迁移[J]. 新疆地质, 20(2): 241-244.
- 魏达. 2018. 陆家堡地区铀成矿条件研究[D]. 大庆:东北石油大学. 79页.
- 吴斌,朱莉娟,侯明才,晁晖,江文剑,石鑫,罗宏谓,曹海洋,何佳伟. 2018. 伊犁盆地南缘中侏罗统西山窑组沉积环境讨论[J]. 沉积学报, 36(3): 456-467.
- 吴兆剑,韩效忠,胡航. 2018. 开鲁盆地陆家堡凹陷绍根地区早白垩世裂陷期后沉积构造演化与铀矿化特征[J]. 沉积学报, 36: 20-32.
- 夏毓亮,刘汉彬. 2005. 鄂尔多斯盆地东胜地区直罗组砂体铀的预富集与铀成矿[J]. 世界核地质科学, 22(4): 187-190.
- 夏毓亮,郑纪伟,李子颖,李林强,田时丰. 2010. 松辽盆地钱家店铀矿床成矿特征和成矿模式[J]. 矿床地质, 29(增刊): 154-155.
- 邢作昌,秦明宽,罗敏,贾立城,李研,郭强,张航. 2021. 松辽盆地东北缘庆安地区泉头组沉积相与铀矿找矿潜力[J]. 地质与勘探, 57(6): 1327-1336.
- 徐浩,崔焕敏,蔡煜琦,何德宝. 2011. 桃山-诸广岩体铀矿床地质-地球物理找矿模式探讨[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 34(4): 315-322.
- 易超,郑云龙,王明太. 2013. 东胜地区直罗组铀储层非均质性特征及其与铀成矿的关系[J]. 铀矿地质, 29(3): 139-145.
- 易超,刘红旭,蔡煜琦,张玉燕,李林强,李西得,张康,丁波,李平. 2020. 隐伏砂岩型铀矿成矿机理与成矿地质信息识别研究进展[J]. 铀矿地质, 36(2): 73-81.
- 于文斌,董清水,周连永,朱建峰,张毅,李国鹏. 2008. 松辽盆地南部断裂反转构造对砂岩型铀成矿的作用[J]. 铀矿地质, 24(4): 195-200.
- 于洋,王祝文,宁琴琴,徐方慧. 2020. 松辽盆地大庆长垣四方台组可地浸砂岩铀成矿测井评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 50(3): 929-937.
- 俞初安,司马献章,刘晓雪,王善博,朱强. 2019. 鄂尔多斯盆地煤田区铀成矿地质条件[J]. 地质论评, 65(增刊1): 191-192.
- 张航,聂逢君,蔡建芳,李研,罗敏,严兆彬. 2023. 松辽盆地北部砂岩型铀成矿有利条件分析与找矿方向探讨[J]. 世界核地质科学, 40(2): 174-183.
- 张金带,徐高中,林锦荣,彭云彪,王果. 2010. 中国北方6种新的砂岩型铀矿对铀资源潜力的提示[J]. 中国地质, 37(5): 1434-1449.
- 张祖还,章邦桐. 1991. 华南产铀花岗岩及有关铀矿床研究[M]. 北京:原子能出版社. 82-83. 53页.
- 赵凤民. 2017. 重新认识还原作用在铀成矿中的贡献[J]. 铀矿地质, 33(4): 193-214.
- 赵磊,胡兆国,华北,梅贞华,秦峰,吴春文,王富伟,张之武,孙峰,李宁,王小玉. 2017. 准噶尔盆地西缘车排子地区砂岩型铀成矿潜力及找矿方向[J]. 地质与勘探, 63(增刊): 507-514.
- 赵龙,陈浩,蔡春芳,金若时,魏佳林. 2022. 松辽盆地西南部钱家店铀矿床富矿砂岩中烃类地球化学特征[J]. 地质通报, 41(2): 498-507.
- 赵岳,徐强,梁叶萍,赵红松,唐朝苗,郑翠. 2018. 内蒙古二连盆地呼仁布其凹陷白垩系铀矿化特征与找矿远景[J]. 中国地质, 45(1): 168-176.
- 赵忠华,范玉杰,张振强,白景萍. 2003. 松辽盆地西部斜坡区层间氧化带砂岩型铀成矿条件及远景预测[J]. 铀矿地质, 19(3): 154-159.
- 赵忠华,张振强,于文斌,董清水. 2012. 松辽盆地南部砂岩型铀成矿主控因素及找矿方向[J]. 世界核地质科学, 29: 200-202.
- 郑纪伟. 2010. 开鲁盆地钱家店铀矿床成矿地质条件及勘探潜力分析[J]. 铀矿地质, 26(4):193-200.