

松辽盆地乾安地区四方台组砂岩型铀成矿条件与找矿方向

邢作昌¹, 贾立城¹, 王秀杰², 罗敏³, 吴大坤³, 刘武生¹, 林效宾¹

(1.核工业北京地质研究院, 中核集团铀资源勘查与评价技术重点实验室, 北京 100029; 2.吉林油田川南天然气勘探开发分公司技术研究中心, 四川 自贡 643000; 3.核工业二四〇研究所, 辽宁 沈阳 110032)

摘要:【研究目的】松辽盆地中部腹地乾安地区四方台组砂岩型铀成矿条件研究相对薄弱。【研究方法】本文通过岩心、测井、地震、微量等数据的综合分析, 在构造、建造和改造特征综合分析的基础上, 系统总结乾安地区四方台组砂岩型铀矿的成矿要素。【研究结果】认为盆地中部乾安地区四方台组具备构造天窗、深大断裂、辫状河三角洲河道砂体、良好地层铀源条件与后生改造等基本成矿条件。在此基础上首次从渗入、渗出两个角度对乾安地区四方台组的铀成矿条件分别进行了系统梳理, 认为四方台组同时具备渗入和渗出两种铀成矿条件, 且渗出成矿占优。基于此构建了乾安地区四方台组渗出-渗入耦合铀成矿模式, 认为浅部渗入流体和深部渗出流体的交汇部位是有利成矿区, 提出让字镇—查干花一带四方台组的辫状河-辫状河平原河道砂体具有较大的成矿潜力, 可作为盆地腹部铀矿勘查的优先探索方向。【结论】该研究首次将渗出成矿思路引入松辽盆地四方台组红杂色建造铀成矿条件的系统评价, 改变了以往渗入角度评价目标层的单一思路, 可有效拓展盆地腹地红杂色层的找矿思路, 进而极大拓展盆地的找矿空间。

关键词: 砂岩型铀矿; 铀成矿条件; 四方台组; 盆地腹地找矿; 松辽盆地; 矿产勘查工程

创新点: 首次从渗入、渗出两个角度系统梳理松辽盆地中部乾安地区四方台组砂岩型铀成矿条件与成矿潜力; 构建了松辽盆地腹地乾安地区四方台组渗出-渗入耦合铀成矿模式, 拓宽了松辽盆地腹地红杂色建造的找矿思路。

Metallogenic conditions and prospecting direction of sandstone-type uranium deposit of Sifangtai Formation in Qian'an area, Songliao Basin

XING Zuochang¹, JIA Licheng¹, WANG Xiujie², LUO Min³, WU Dakun³, LIU Wusheng¹, LIN Xiaobin¹

(1. CNNC Key Laboratory of Uranium Resource Exploration and Evaluation Technology, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 2. Technology research center of South Sichuan natural gas exploration and development branch of Jilin Oilfield, CNPC, Sichuan, Zhigong 643000, China; 3. Research Institute No.240, CNNC, Liaoning, Shenyang 110032, China)

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

[Objective] The study of uranium metallogenic conditions of Sifangtai Formation in the hinterland of Songliao basin is relatively weak. **[Methods]** Through comprehensive analysis of core, logging, seismic, trace and other data, the tectonics, stratigraphy and transformation of Sifangtai Formation in Qian'an area has been sorted and it is the first time to systematically summarize the uranium metallogenic elements of sandstone-type uranium deposits in the the hinterland of Songliao Basin. **[Results]** It shows that Sifangtai Formation in Qian'an area has favorable metallogenic conditions such as structural window, deep and large faults, braided river delta channel sand belts, good uranium source conditions and epigenetic transformation. It is considered that Sifangtai formation has both infiltration and exudative uranium metallogenic conditions, and exudative metallogeny is dominant. Based on these facts, the exudation-infiltration coupling Uranium metallogenic model of Sifangtai Formation in Qian'an area, Centrel Songliao Basin, has been constructed. Finally, it is proposed that the braided river to braided

基金项目: 砂岩型铀矿多重耦合地质成矿作用与时空定位技术 (编号 中核科发【2021】143号地 SD01)、核工业北京地质研究院院长青年基金项目 (编号 地 QJ2003) 联合资助。

作者简介: 邢作昌, 男, 1988年生, 博士, 高级工程师, 主要从事砂岩型铀矿地质勘查及沉积学研究工作。Email: xzcxing@163.com。

通讯作者: 贾立城, 男, 1979年生, 高级工程师, 主要从事岩石、矿物和矿床等方面的研究工作。Email: jacala_2126@sohu.com。

river plain channel sand in Rangzhi-Chaganhua Town has great uranium metallogenic potential, which as been predicted to be the most favorable object for further exploration. **[Conclusions]**This study is the first to introduce exudative metallogeny into the systematic evaluation of uranium mineralization conditions in Sifangtai Formations of the Songliao Basin, changing the previous single approach of evaluating the target layer from the perspective of infiltration metallogeny. It can effectively expand the exploration thinking of the red variegated formations in the hinterland of the basin, thereby greatly expanding the prospecting range in the Songliao Basin.

Key words: sandstone-type uranium deposit, metallogenic conditions, Sifangtai Formation, mineral prospecting in the hinterland basin, Songliao Basin, mineral exploration engineering

Highlights: The research is the first time to systematically review the mineralization conditions and potential of Sandstone type Uranium deposit in the Sifangtai Formation of the Qian'an area in the central Songliao Basin from the perspectives of infiltration and infiltration metallogeny. By establishing Uranium metallogenic model coupled with infiltration and exfiltration of the Sifangtai Formation in the Qian'an area, Songliao Basin hinterland, it has expanded the exploration ideas for the red variegated formation in the hinterland of Songliao Basin.

About the first author: XING Zuochang, male, born in 1988, doctor, senior engineer, engages in sedimentology and sandstone-type Uranium deposits; Email: xzcxing@163.com.

About the corresponding author: JIA Licheng, male, born in 1979, senior engineer, mainly engaged in research on rocks, minerals, and mineralogy; Email: jacala_2126@sohu.com .

Fund support: Supported by Multiple coupling geological mineralization and spatiotemporal positioning technology of sandstone-type uranium deposits (No.2021-143-SD01), Dean Youth Science and Technology Innovation Fund of BRIUG (QJ2003).

1 引言

经典的水成铀成矿作用包括层间氧化、潜水氧化等铀成矿作用,强调浅部碱性含铀氧化流体在灰色建造中不断被还原最终在氧化还原界面富集成矿(古勃金等, 1981; 别列里曼, 1995)。该成矿过程主要为浅部成矿流体对深部目标层的渗入改造过程(张金带, 2016), 可归纳为渗入铀成矿作用(李子颖等, 2022)。在该经典模式指导下, 砂岩型铀矿的找矿突破已被国内外多个大中型矿床的找矿实践所证实(王军等, 2009; 唐湘飞等, 2018; 李子颖等, 2020; 曹民强等, 2021)。随着砂岩型铀矿找矿实践的持续深入, 经典的水成渗入成矿理论模式面临挑战, 其很难解释诸如多层板状铀矿化体成因(夏毓亮等, 2003; 丁波等, 2020)、“两黄夹一灰”铀成矿环境(蔡建芳等, 2018)、“孤岛状-蘑菇状”灰砂控制因素(宁君等, 2018)、矿区穿层与多层铀矿化的成因联系等一系列科学问题(李子颖等, 2021)。一些学者从不同角度对这些基础问题进行了尝试性探讨, 如部分学者提出了烃源岩可作为深部铀源(张万良, 2018)、灰砂的产出可能与油气的还原作用有关(蔡建芳等, 2018; 宁君等, 2018)等。在此种背景下, 以核工业北京地质研究院李子颖团队创新性提出砂岩型铀矿的渗出成矿作用, 对深部铀源、成矿流体来源、流体运移通道、成矿机理等渗出成矿关键控矿要素进行了系统总结(李子颖等, 2022)。渗出成矿作用强调深部铀源对砂岩型铀成矿的贡献, 更易从新的角度对目前砂岩型铀矿存在的实际问题做出较为合理的解释, 是对砂岩型铀成矿理论的补充和创新。

松辽盆地作为我国北方砂岩型铀矿勘查的重要盆地之一(荣辉等, 2016; 吏成辉等, 2020; 邢作昌等, 2021), 自 2000 年铀矿勘查突破以来, 已围绕广大盆缘开展了多轮找矿工作, 相继发现了钱家店、宝龙山、海力锦、大林等一大批中大型铀矿床(蔡建芳等, 2018; Rong et al., 2019; 邢作昌等, 2021), 盆缘找矿效果显著。但随着铀矿勘查工作的持续推进, 西南隆起区、西部斜坡区、北部倾没区、东北隆起区、东南隆起区等广大盆缘区勘查程度不断提高(封志

兵等, 2014; 聂逢君等, 2017; 宁君等, 2018; 赵忠华等, 2018), 盆缘找矿面临着后备勘查基地严重不足的严峻形势(封志兵等, 2022), 而盆地中部广大地区(尤其是中部腹地)因远离盆缘富铀蚀源区, 按照经典的水成渗入成矿理论, 很难具备成矿所必须的蚀源区铀源等基本条件, 故多年来未受到铀矿地质工作者的关注, 其目前砂岩型铀矿勘查程度极低。近年来松辽盆地中部肇源地区少量工业孔的发现(汤超等, 2018), 表明盆地中部腹地同样具有较大铀成矿潜力。

位于松辽盆地中部腹地的乾安地区, 地理上处于通辽铀矿田(张金带, 2016; 蔡建芳等, 2018; 宁君等, 2018)与肇源铀矿产地(汤超等, 2018)之间的中间位置, 构造单元上恰好在松辽盆地最大断陷、埋藏最深的复合断陷——长岭断陷之上(葛荣峰等, 2009; 曹跃等, 2018)。研究区特殊的构造位置, 决定了其铀成矿条件与成矿模式必有其特殊性, 其成矿条件与成矿潜力的精细研究, 可能为渗出成矿理论研究提供实例。鉴于目前研究区尚未开展过系统的铀矿地质研究工作, 全面梳理该地区砂岩型铀矿的成矿条件、综合评价其成矿潜力进而明确其找矿方向, 不但有望回答松辽盆地腹地砂岩型铀矿成矿条件与成矿潜力等基础科学问题, 而且可能为松辽盆地的铀矿勘查工作开辟新的战场。

本文在岩心、测井、地震、分析测试资料综合解释的基础上, 系统梳理了与砂岩型铀成矿密切相关的构造天窗、断裂、沉积相与砂体、铀源、放射性异常等基础地质条件, 并以最新的砂岩型铀矿理论为指导, 从渗入、渗出两个角度对乾安地区的砂岩型铀成矿条件进行了综合分析, 在此基础上构建了乾安地区砂岩型渗出-渗入耦合铀成矿模式, 并指明了盆地中部乾安地区四方台组的铀成矿潜力与找矿方向。

2 区域地质背景

研究区位于中国东北松辽盆地中部的乾安地区(图 1-a), 隶属于盆地中央拗陷带南部的长岭凹陷、双坨子阶地、扶新隆起带上等构造单元(图 1-a、图 1-b)。区内经历了早中侏罗世热隆张裂期(前裂谷期)、晚侏罗世—早白垩世初期的伸展断陷期(裂谷期)、晚白垩世中期的沉降拗陷期(后裂谷期)及晚白垩世幕式构造反转期(抬升萎缩期)四大构造演化阶段(Wang et al., 2016; 邢作昌等, 2021)。其中晚白垩世末区域性的幕式挤压造成盆地东南部隆升剥蚀、沉积中心相对西迁(宋鹰, 2010), 在研究区表现为东部隆起带(登楼库背斜)及斜坡(双坨子阶地及乾安斜坡, 图 1-c)的形成。自下而上, 研究区沉积了早白垩世断陷层(火石岭组—营城组—登楼库组)、晚白垩世早期拗陷层(泉头组—青山口组—姚家组—嫩江组)、晚白垩世晚期反转层(四方台组—明水组)及新生代地层(图 1-c), 其中断陷期沙河子组和营城组发育巨厚层半深湖—深湖相暗色泥岩沉积(刘明洁等, 2017), 拗陷期青山口组一段、嫩江组一二段也有厚层黑灰色泥岩(局部为黄褐色油页岩)(侯启军等, 2009; 邢作昌等, 2021), 这些厚层烃源岩为可能的深部铀源(张万良, 2018)。从古气候特征上看, 松辽盆地白垩纪总体上为湿润、半湿润的亚热带环境, 但其间发生三次降温、四次升温和三次半干旱事件(Wang et al., 2013; 王成善等, 2016)。本文重点研究四方台组, 其沉积期对应晚白垩世的最后一次升温事件和半干旱事件, 其气候以干旱、炎热为主(Wang et al., 2013), 为一套红杂色碎屑建造。目前区内晚白垩世地层多被新近系泰康组覆盖, 仅在研究区东北部局部有四方台组、嫩江组出露(图 1-b)。

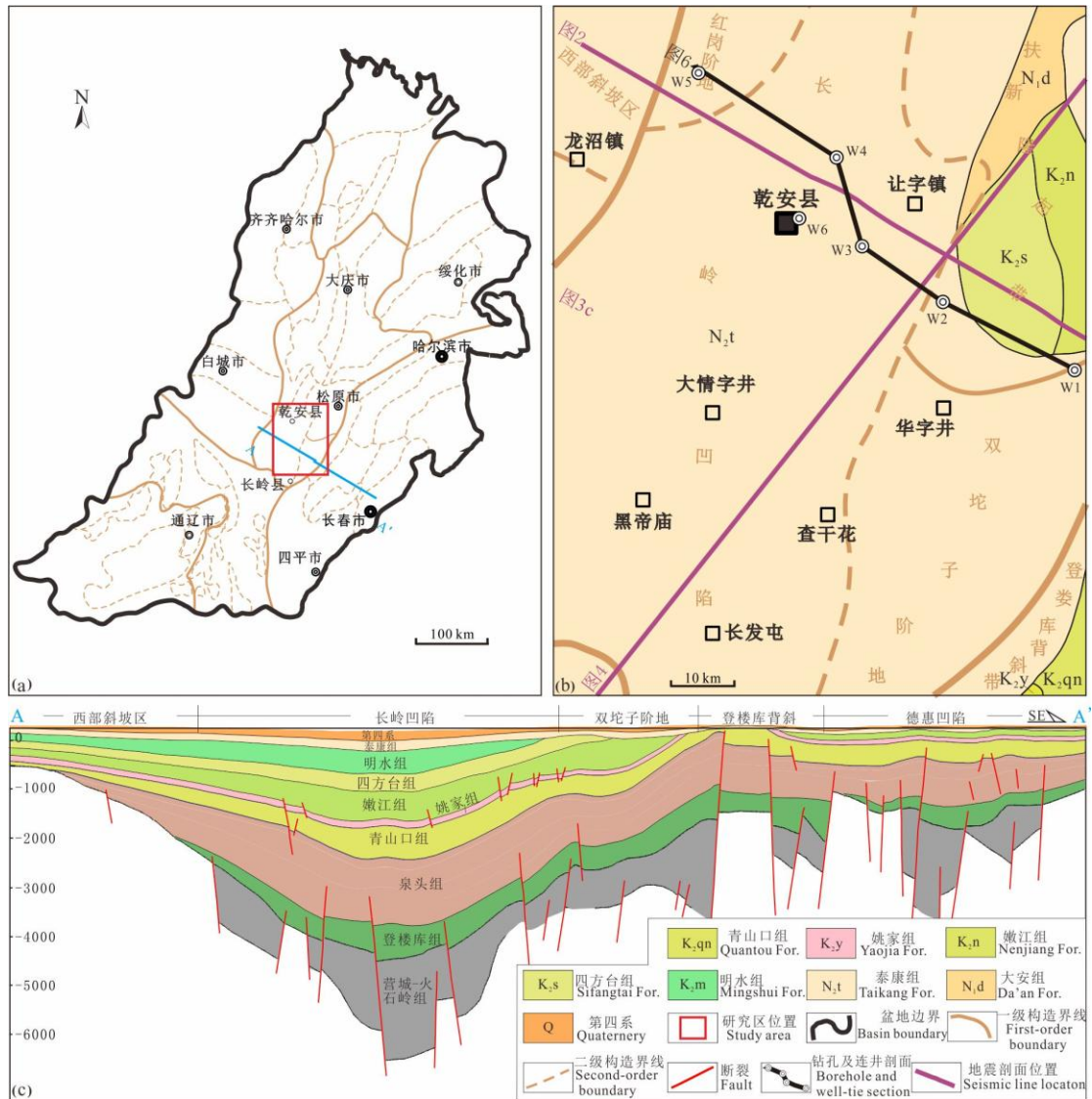


图1 松辽盆地中部乾安地区综合信息图

(a) 松辽盆地拗陷层构造单元划分(据侯启军等, 2009; Feng et al., 2010 修改)及乾安地区位置图; (b) 研究区前第四系地质与拗陷层构造单元划分叠置图; (c) 过研究区的南东向地质剖面, 剖面位置参考图 b 中 A-A'

Fig.1 Comprehensive information map of Qian'an area in Songliao Basin

(a) Tectonic unit division of Songliao basin (after Hou Qijun et al., 2009; Feng et al., 2010) and location of Qian'an area; (b) Overlay map of pre-Quaternary geology and structural unit division of depression in the study area; (c) SE geological profile in the study area, refer to A-A' in Fig.b for its location

3 四方台组砂岩型铀矿成矿条件

3.1 构造条件

不整合构造, 尤其是区域性的大规模、长时间隆升成因的掀斜不整合, 不但可以剥蚀盆缘或盆地构造高地的富铀岩体、为目标层位提供丰富的物源和铀源, 而且不整合代表的隆升构造可造成其下的目标层掀斜, 在局部构造高部位形成有利的流体渗入或渗出的构造天窗, 同时隆升掀斜可形成有利的斜坡条件, 进而为砂岩型铀成矿流体运移提供通道(何中波,

2013)。松辽盆地不整合构造的形成与晚白垩世以来的,基于裂变径迹厘定的 95Ma、77.7Ma、68.3Ma、56.3Ma、30.7Ma、14.9Ma 等 6 期重要的构造隆升事件密切相关(Cheng et al., 2020):白垩纪晚期-古新世早期第一阶段(80—50 Ma)形成了与盆地的整体构造隆起有关的 T_{11} 、 T_{03} 、 T_{02} 等区域性不整合面;渐新世至中新世(40—10Ma)第二阶段盆地发育显著的与大规模构造隆起区相关的褶皱和冲断带,其是中新世末次构造隆升事件对应隆升事件形成的区域不整合,可能是造成盆地砂岩型铀矿超常规富集关键因素(Cheng et al., 2019)。研究区 T_{02} 区域不整合在研究区东部的孤店反转背斜构造高位表现出大角度的削蚀特征(图 2),是其下地层隆升遭受暴露剥蚀最直接的地质证据。这些构造对上部的明水组剥蚀殆尽,其下四方台组地层直接暴露形成乾安构造天窗(图 2)。

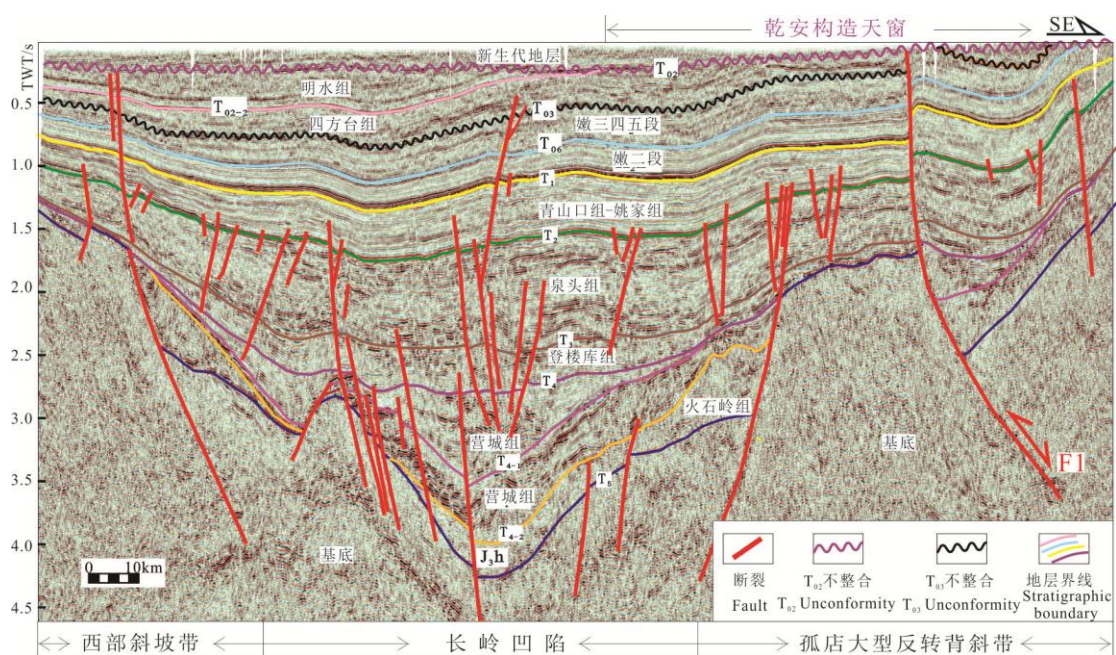


图 2 松辽盆地乾安地区地层结构与构造天窗(剖面位置见图 1b 紫色曲线)

Fig.2 Stratigraphic architecture and tectonic window in Qian'an area of Songliao Basin(See the purple solid line in Fig.1b for the seismic profile location)

四方台组乾安天窗东部紧邻四方台组剥蚀界线,平面上显示为南北向沿让字镇—查干花展布的纺锤形,呈现中部宽(33km),南北窄(5km)的特征,面积 1636 km²,可达研究区面积的 19%以上(图 3);剖面上,天窗东部以 F_1 反转断裂为界,整体向西倾斜,其下地层削蚀角度有向盆内变缓的趋势。乾安构造天窗的暴露时限可依据晚白垩世末 T_{02} 不整合代表的缺失地层的时代估算,天窗之上缺失明水组(底界面年龄约 68.5Ma, (宋鹰, 2010))、古近系依安组、新近系大安组(顶界面年龄 23Ma, (冯志强等, 2021)),据此估计乾安天窗的暴露时限约为 45.5 Ma。天窗以西四方台组地层处于明显的构造斜坡,该时期的构造低点位于研究区西南部的大情字井—长发电一带(图 3)。

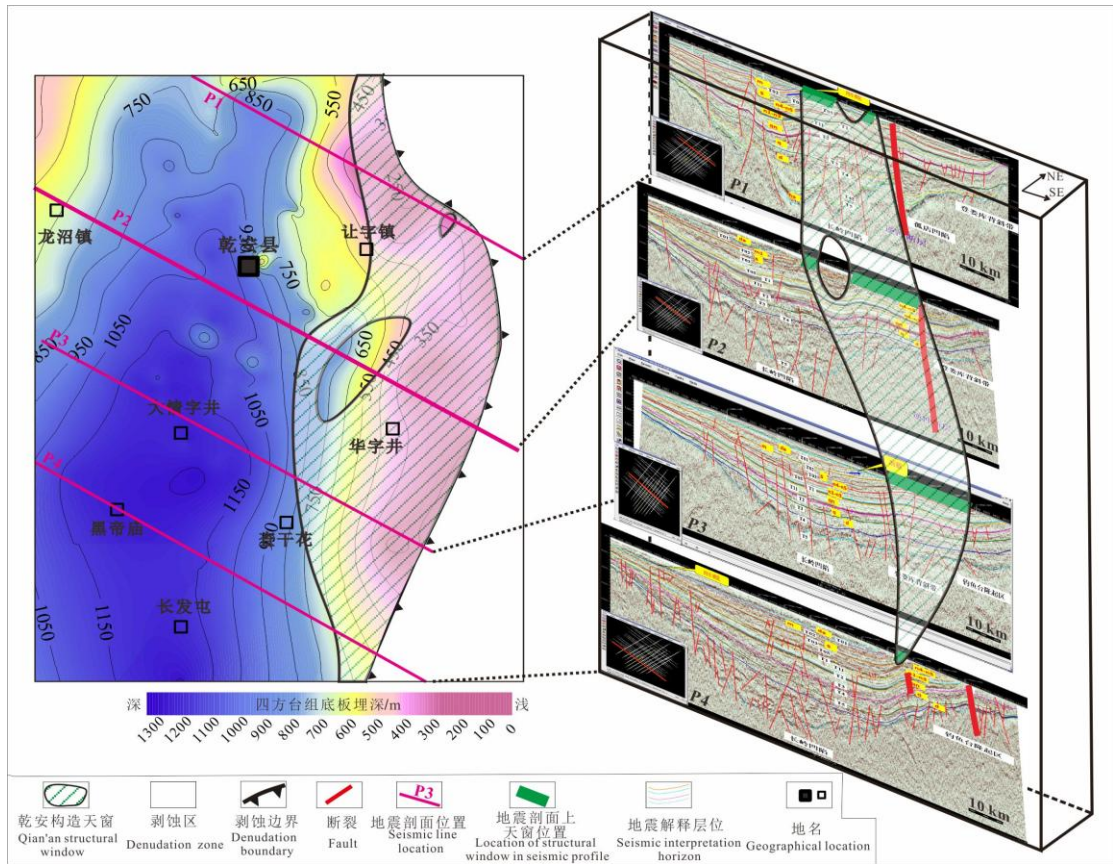


图3 松辽盆地乾安地区四方台组构造天窗平面和立体展布

Fig.3 Plane and three-dimensional view of structural window of Sifangtai Formation, Qian'an area of Songliao Basin

另外，区内断裂发育，断裂表现出类型多（正断裂、逆断裂、反转断裂均有）、活动期次多等特征。精细的地震剖面解译表明，在研究区中西部存在多个直接沟通深部断陷层及浅部反转层四方台组的深大断裂，这些深大断裂断距大、倾角高，断穿层位多（图2、图4），断裂下部或切穿下白垩统沙河子-登楼库组、上白垩统青山口-嫩江组厚大烃源岩，或位于烃源岩减薄的边部，空间产出与深部烃源岩层关系密切。

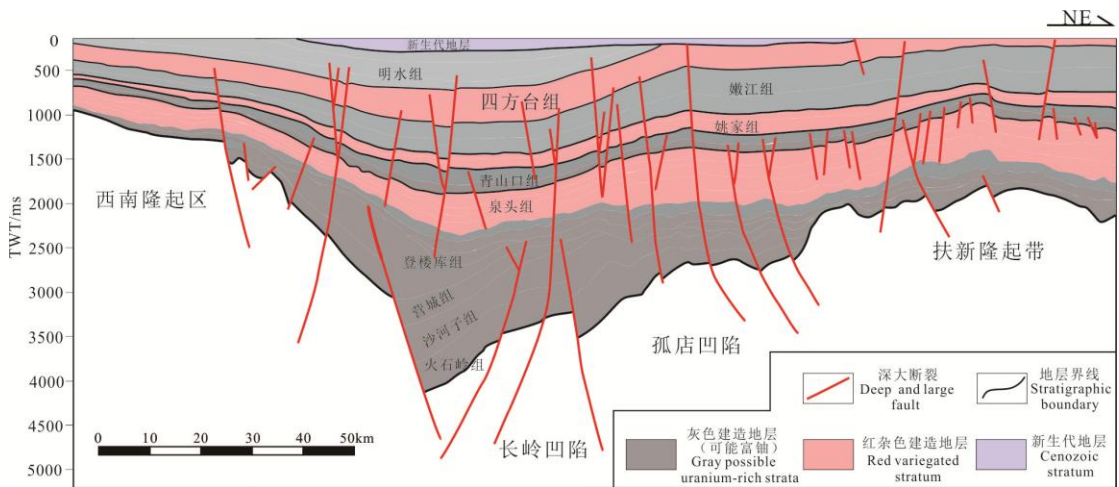


图4 松辽盆地乾安地区北东向地质剖面（剖面位置见图1b紫色曲线）

Fig.4 Northeast Geological Section of Qian'an area, Songliao Basin(See the purple solid line in Fig.1b for the profile location)

3.2 沉积相与砂体条件

四方台组以厚层红色泥岩、灰黄色砂砾岩、灰绿色含砾粗砂岩、灰色细砂岩碎屑沉积建造为特征（图 6）。精细的沉积学分析表明，研究区四方台组主要有辫状河、辫状河三角洲、滨浅湖 3 种沉积相，辫状河道、洪泛平原、辫状河三角洲平原、辫状河三角洲前缘、滨湖泥、浅湖泥、滩坝等 10 种沉积微相（图 5、图 6）。研究区中部典型钻孔的单井沉积相精细分析表明，盆地中部的四方台组主要以辫状河三角洲为特征，其亚相表现出平原—前缘—平原—前缘—平原的多个旋回的相序叠置，反映出四方台组至少经历了 3 个以上的次一级高频的湖侵—湖退旋回。多个高频旋回造成了研究区平原河道砂与辫状河三角洲前缘砂的垂向上的多次叠加增厚，形成了研究区四层厚大砂层（图 6）。

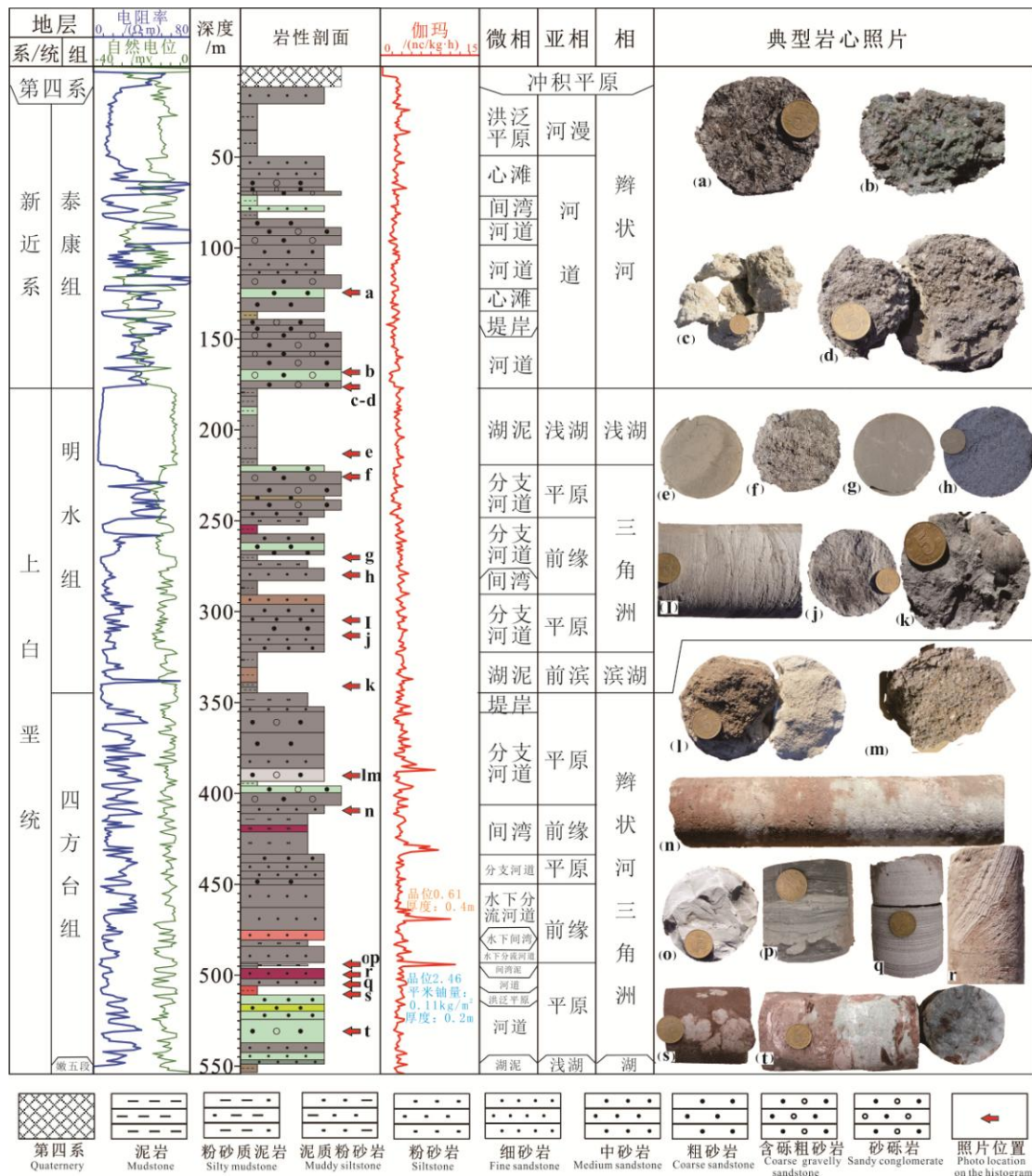


图 5 松辽盆地乾安地区 W3 井沉积相分析

(a) 浅灰绿色细砂岩中沿层理面见大量炭屑，部分植物碎屑未完全炭化，见纤维结构，137.3m；(b) 灰绿色砂砾岩，颗粒以石英、

长石砾为主, 167.55m; (c) 浅黄色含砾粗砂岩, 见褐黄色氧化斑, 173.1m; (d) 灰色底砾岩, 富含炭屑及黄铁矿, 未见氧化及轴异常, 178m; (e) 绿灰色湖相泥岩, 218.8m; (f) 灰色砂砾岩, 224.15m; (g) 灰色湖相泥岩, 270m; (h) 灰色粗砂岩, 成分成熟度较高, 极疏松, 281.8m; (i) 灰色小型交错层理细砂岩, 沿层理面见较多炭屑, 305m; (j) 灰色中细砂岩, 见大量炭屑, 310m; (k) 泥岩中的螺类化石, 345.6m; (l) 灰黄色、浅黄色氧化底砾岩, 397.5m; (m) 灰黄色砂砾岩, 405.1m; (n) 灰绿色砂岩中包裹浅红色砂岩, 两者界线模糊, 呈港湾状、浸染状接触, 420m; (o) 深灰色矿化泥岩, 见较多炭屑和黄铁矿结核, 492.65m; (p) 黑灰色矿化泥岩, 见重力变形构造, 492.2m; (q) 灰色平行层理细砂岩, 501m; (r) 灰色中砂岩, 见滑塌变形层理, 504.3m; (s) 褐红色泥岩, 见白色钙质结核, 506.55m; (t) 褐红色砂岩中包裹灰绿色砂岩, 两者港湾状渐变接触, 局部褐红色泥砾边缘可见灰绿色褪色边, 532.4m

Fig.5 Sedimentary facies analysis of well W3 in Qian'an area of Songliao Basin

(a) A large amount of carbon-chips can be seen along bedding of light gray green fine sandstone, but some plant debris, see fiber structure, is not completely carbonized, 137.3m; (b) Grayish green conglomerate composed of quartz and feldspar gravel, 167.55m; (c) Light yellow gravelly coarse sandstone with brown yellow oxidation spots, 173.1m; (d) Gray bottom conglomerate, rich in carbon chips and pyrite and no oxidation and uranium anomaly, 178m; (e) Greenish grey lacustrine mudstone, 218.8m; (f) Grayish conglomerate, 224.15m; (g) Grey lacustrine mudstone, 270m; (h) Gray coarse sandstone with high maturity and extremely loose composition, 281.8m; (i) Gray fine sandstone, with small cross bedding and many charcoal along the bedding plane, 305m; (j) Gray medium fine sandstone with large amount of carbon chips, 310m; (k) Snail fossils in mudstone, 345.6m; (l) Grayish yellow bottom oxidized conglomerate, 397.5m; (m) Grayish yellow sandy conglomerate, 405.01m; (n) The grayish green sandstone is wrapped with light red sandstone, and their boundary is blurry. They are in contact with harbor-shape or disseminated outline. (o) Dark gray mineralized mudstone, with many carbon chips and pyrite nodules, 492.65m; (p) Dark grey mineralized mudstone, see gravity deformation structure, 492.2m; (q) Gray parallel bedding fine sandstone, 501m; (r) Gray medium sandstone with collapse deformation bedding, 504.3m; (s) Maroon mudstone with white calcareous nodules, 506.55m; (t) The grayish green sandstone wrapped by maroon sandstone, whose boundary is harbor-shape. The grayish green fading edge can be seen at the edge of maroon mud gravel in some areas, 532.4m.

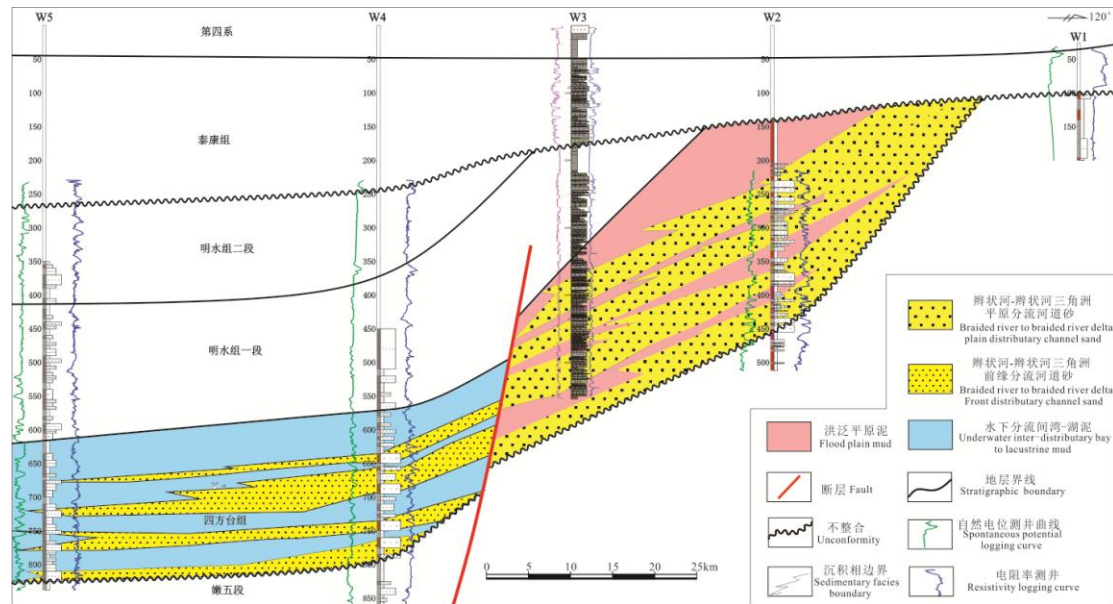


图 6 松辽盆地乾安地区四方台组顺物源方向砂体展布 (剖面位置见图 1b 黑色实线)

Fig.6 Sand body along provenance direction of Sifangtai Formation, Qian'an area of Songliao Basin (See the black solid line in Fig.1b for the profile location)

从四方台组沉积相展布特征来看, 研究区发育南北两大辫状河—辫状河三角洲沉积体系, 其中北部沉积体系规模远大于南部 (图 7b)。北部体系整体呈 NW-SE 向, 在让字镇—查干

花以东主要为辫状河（辫状河河道和洪泛平原相）为主，以西主要为辫状河三角洲和滨浅湖发育区；其辫状河三角洲进一步分为乾安（W4~W5）、查干花-大情字井两支分流体系，乾安分支河道的规模更大。从砂体条件来看，四方台组累计砂体厚度在 30-90m，在辫状河河道位置砂体最厚，向西向盆方向明显分支，且砂体厚度呈现减薄趋势。乾安县—让字镇—华字井—查干花一带的辫状河河道—辫状河三角洲平原河道砂体厚度最大，是优势砂体发育区（图 7-a）。

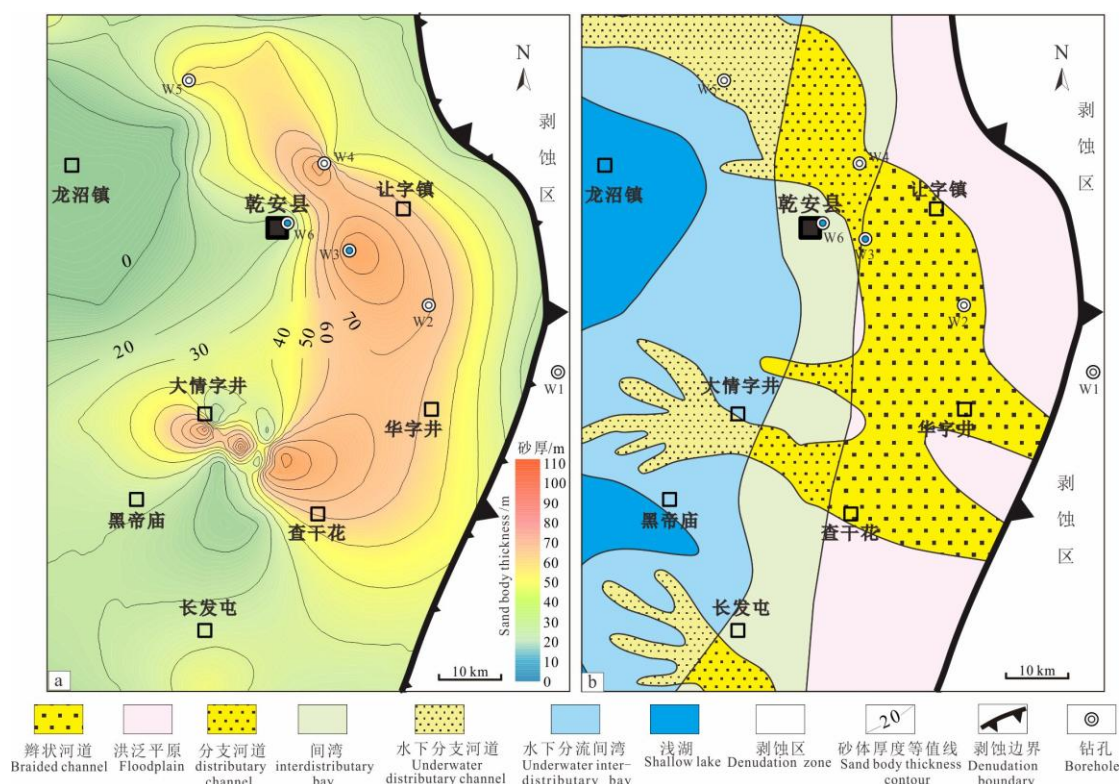


图 7 松辽盆地乾安地区四方台组砂体厚度与沉积相

Fig.7 Sand body thickness and sedimentary facies of Sifangtai formation, Qian'an area of Songliao Basin

(a) 四方台组砂体厚度图；(b) 四方台组沉积相图

(a) Sand body thickness map of Sifangtai Formation; (b) Sedimentary facies map of Sifangtai Formation

3.3 铀源

铀源条件作为砂岩型铀矿成矿潜力评价的重要条件(张字龙等, 2006; 张龙等, 2016; 张万良, 2018)。研究区位于盆地中心腹地，远离盆地边缘蚀源区，盆缘铀源条件相对较差。

乾安地区 W3 孔四方台组微量元素分析发现，四方台组的细粒沉积铀含量 $1.69 \times 10^{-6} \sim 362 \times 10^{-6}$ 之间（表 1），垂向差异大。不同颜色的细粒沉积铀含量差别亦大：多数灰色细粒沉积铀含量 $4.85 \times 10^{-6} \sim 43.7 \times 10^{-6}$ ，个别样品（S21-063）可达 362×10^{-6} ；灰绿色粉砂岩 $2.06 \times 10^{-6} \sim 11.04 \times 10^{-6}$ ；红色调细粒岩沉积 $1.69 \times 10^{-6} \sim 2.86 \times 10^{-6}$ 。泥岩、粉砂岩等细粒沉积不易受后期环境变化的改造，基本可以代表初始沉积环境的铀含量，区内灰色调细粒沉积铀含量明显高于地壳平均含量（ 2.8×10^{-6} ），表明区内原生沉积的铀背景值较高。

表 1 松辽盆地乾安地区四方台组泥岩-粉砂岩铀、钍及钍铀比

Tab.1 Uranium, thorium and Th/U of mudstone and siltstone in Sifangtai formation, well W3 in Qian'an area of

Songliao Basin

样品编号	深度/m	岩性	U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	Th/U
HQ31-80	373.35	灰色粉砂质泥岩	5.05	12.70	2.51
HQ31-78	390.75	灰色粉砂质泥岩	26.00	11.80	0.45
HQ31-77	393.40	灰绿色粉砂岩	2.06	9.97	4.84
HQ31-75	402.65	砖红色泥岩	2.19	12.10	5.53
HQ31-69	411.85	灰色粉砂岩	5.46	8.59	1.57
HQ31-66	421.65	浅红色粉砂岩	1.69	6.88	4.07
HQ31-61	433.00	灰白色粉砂岩	2.79	14.80	5.30
HQ31-48	460.25	紫灰色粉砂岩	2.34	11.20	4.79
HQ31-47	461.10	灰红色粉砂岩	2.86	12.80	4.48
HQ31-46	462.95	灰色粉砂质泥岩	7.92	14.30	1.81
HQ31-42	467.55	灰绿色粉砂岩	11.40	9.69	0.85
HQ31-132	468.00	灰色粉砂岩	6.46	16.30	2.52
HQ31-38	474.60	灰绿色粉砂岩	3.24	18.80	5.80
S21-59	491.05	深灰色泥岩	43.70	15.60	0.36
S21-60	491.65	灰白色钙质粉砂岩	8.01	15.40	1.92
HQ31-30	491.70	深灰色泥岩	10.20	17.20	1.69
S21-61	491.75	深灰色泥岩	20.50	15.30	0.75
S21-62	491.85	深灰色泥岩	36.20	15.70	0.43
S21-63	491.95	深灰色泥岩	362.00	15.30	0.04
S21-64	492.05	深灰色泥岩	27.00	15.00	0.56
HQ31-29	492.15	深灰色泥岩	20.60	15.00	0.73
HQ31-28	492.25	灰色泥岩	7.35	15.10	2.05
HQ31-23	501.75	灰色含碳纹层粉砂岩	4.85	43.80	9.03

样品由核工业北京地质研究院分析测试研究中心测试。(The samples were tested by Analytical Laboratory Beijing Research Institute of Uranium Geology.)

乾安地区 W3 井四方台组砂岩的密集采样微量分析表明,砂岩的铀含量 $1.69 \times 10^{-6} \sim 41.60 \times 10^{-6}$ (表 2), 略高于地壳长石砂岩铀含量 1.5×10^{-6} (张宇龙等, 2006; 苗培森等, 2017); 半数以上的砂岩样品 (14 个, 共 24 个样品) 铀含量 $3.37 \times 10^{-6} \sim 41.60 \times 10^{-6}$, 远高于地壳平均值 2.8×10^{-6} , 表明四方台砂岩具有明显的铀的初始铀富集。另外, 超过半数 (12 个, 表 2) 的砂岩的 Th/U 比大于 4.2, 且这些砂岩 (灰黄色砂岩, HQ31-84; 灰色见黄斑块状细砂岩, HQ31-49; 灰绿色粗砂岩 HQ31-40 等) 的岩石颜色显示出明显的后生改造特征, 综合推断研究区内多数砂岩具有明显的铀迁出特征。认为乾安地区四方台组本身铀源 (内源) 条件良好, 且地质时期砂岩存在铀的迁移成矿过程。

表 2 松辽盆地乾安地区四方台组砂岩铀、钍及钍铀比

Tab.2 Uranium, thorium and Th/U of sandstone in Sifangtai formation, well W3 in Qian'an area of Songliao Basin

样品编号	深度/m	岩性	U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	Th/U
HQ31-84	354.60	灰黄色细砂岩	2.72	13.60	5.0
HQ31-83	361.10	灰色细砂岩	4.80	11.80	2.5
S21-048	371.50	灰色中细砂岩	5.92	21.80	3.7
HQ31-81	373.15	灰色粗砂岩	5.07	3.62	0.7
S21-049	383.15	深灰色中砂岩	1.98	6.29	3.2
S21-50	394.90	灰色中粗砂岩	1.37	6.23	4.5

HQ31-71	406.90	灰色细砂岩	1.82	10.80	5.9
HQ31-70	410.95	灰色细砂岩	8.44	9.14	1.1
HQ31-65	423.00	红色细砂岩	3.37	11.60	3.4
HQ31-62	428.60	灰色细砂岩	41.60	9.95	0.2
HQ31-133	429.75	灰色细砂岩	28.60	10.60	0.4
HQ31-134	431.50	灰色细砂岩	5.14	15.90	3.1
HQ31-55	444.00	灰色细砂岩	3.37	13.40	4.0
HQ31-49	459.65	灰色见黄斑块状细砂岩	3.11	21.10	6.8
HQ31-40	470.30	灰绿色粗砂岩	2.03	14.90	7.3
HQ31-36	483.75	灰色细砂岩	3.75	27.80	7.4
HQ31-35	485.35	灰绿色细砂岩	4.31	45.00	10.4
HQ31-25	496.35	灰色细砂岩	2.58	12.60	4.9
HQ31-23	501.75	灰色含碳纹层粉砂岩	4.85	43.80	9.0
HQ31-13	516.50	灰绿色细砂岩	2.22	17.80	8.0
HQ31-12	522.80	灰绿色细砂岩	2.04	14.80	7.3
HQ31-10	534.70	灰色含碳屑细砂岩	1.69	12.40	7.3
HQ31-06	542.00	暗红色细砂岩	2.01	12.40	6.2
HQ31-04	544.50	灰色细砂岩	3.79	32.10	8.5

样品由核工业北京地质研究院分析测试研究中心测试。(The samples were tested by Analytical Laboratory Beijing Research Institute of Uranium Geology.)

3.4 后生改造

研究区四方台组后生改造可分出后生氧化与后生还原两种类型。后生氧化主要表现为含砾细砂岩层面见褐黄色不规则氧化膜(图 8-a)、砂砾岩颗粒呈现褐黄色强烈褐铁矿化(图 8-b)。后生还原改造主要表现为红色砂岩与灰绿色砂岩港湾状不规则接触(图 8-c、图 8-f)、灰绿色极细砂岩层面见褐红色原生氧化残留(图 8-d)、红色粉砂岩层面见灰黄色残留油膜氧化物(图 8-e)、红色泥砾周围见灰绿色褪色边(图 8-d)等,为油气等深部还原流体对原生氧化红色砂岩还原形成。另外,从 W3 井四方台组垂向上表现出的厚层灰绿色、灰色砂岩局部夹薄层红色砂岩、红色泥岩的建造特征看(图 5),推测区内四方台组砂体后生还原改造更为强烈。

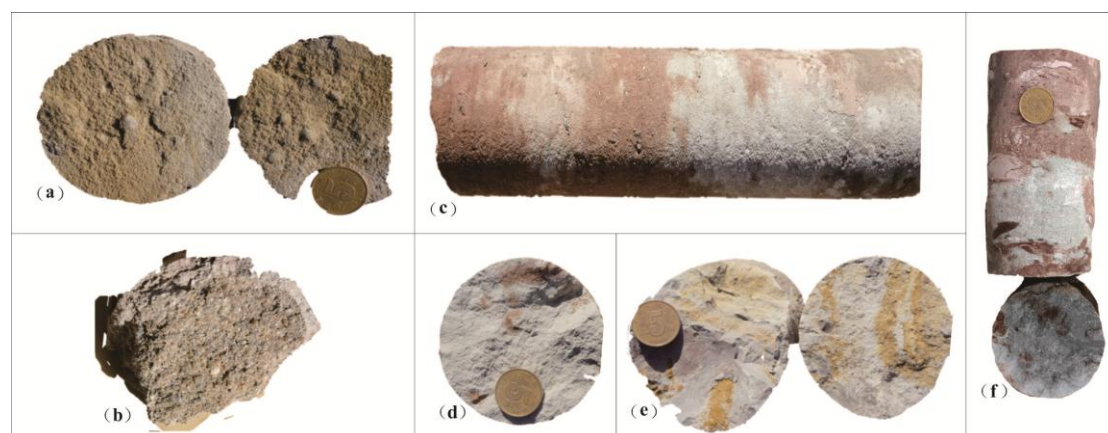


图 8 松辽盆地乾安地区 W3 孔四方台组后生改造特征

(a) 灰色细砂岩, 层面见褐黄色不均匀氧化, 313.8m; (b) 灰黄色砂砾岩, 强烈褐铁矿化, 405.1m; (c) 灰绿色砂岩中包裹浅红

色砂岩，两者港湾状、浸染状接触，两者界线模糊，推测为原生氧化红色砂岩被油气等还原性流体褪色为灰绿色砂岩，420m；
(d) 灰绿色极细砂岩层面见褐红色原生氧化残留，残留原生氧化色与后生还原灰绿色之间为渐变过渡，无明显的突分界线，510m；
(e) 暗红色细粉砂岩中层见石油残余氧化物，523.4m；(f) 褐红色砂岩中夹的薄层灰绿色褪色砂岩，灰绿色与褐红色砂岩呈港湾状、浸染状不规则接触，褪色灰绿色砂岩层面见灰绿色褪色边包裹状残留褐红色泥砾，532.4m

Fig.8 Epigenetic transformation of Sifangtai formation in well W3, Qian'an area of Songliao Basin

(a) Gray fine sandstone with brownish yellow uneven oxidation, 313.8m; (b) Grayish yellow sandy conglomerate with strongly limonitization, 405.1m; (c) The grayish green sandstone is wrapped with light red sandstone, and their boundary is blurry. They are in contact with harbor-shape or disseminated outline. It is proposed that the primary oxidized red sandstone is faded into grayish green sandstone by reducing fluids such as oil and gas, 420m. (d) The grayish green very fine sandstone with brown-red primary oxidation residues, and there is no obvious abrupt boundary but a gradual transition between the residual primary oxidation color and the epigenetic reduced grayish green, 510m; (e) Dark red fine siltstone with residual oil oxides, 523.4m; (f) The grayish green sandstone, wrapped by brown-red sandstone, can be seen grayish green fading edge at the edge of brown-red mud gravel in some areas, 532.4m.

3.5 放射性异常与铀矿化特征

区内多个石油孔的四方台组见放射性铀异常（图 9、图 10），这些放射性异常或产于 540~785m 不等的砂泥界面附近、或产于厚层砂砾岩中部或泥岩中，这些放射性异常垂向上具有明显多层产出特征（图 9），平面上这些放射性异常孔集中分布在长岭凹陷三级构造单元东部内的油气田的边部及乾安-大井里营子深大断裂、查干花深大断裂附近（图 10）。

研究区内目前已施工的两个砂岩型铀矿勘查钻孔均揭示了较好的铀矿化特征：W3 井四方台组含矿地层为三角洲平原向三角洲前缘过渡的河道充填砂体，以灰绿色砂岩、灰色砂岩夹薄层棕红色砂岩、红色泥岩段为特征，其 468.4m~468.8m 异常段砂岩为绿灰色泥质细砂岩，均一，未见明显的碳屑，块状结构厚 0.4m，矿层平均品位 0.61×10^{-4} ；493.5m~493.7m 矿化段为深灰色泥质粉砂岩，厚 0.2m，矿层平均品位 2.46×10^{-4} ，矿层平米铀量 0.11kg/m^2 （图 5）。W191 井四方台组含矿地层具有“灰砂（局部红砂）包红泥”特征，赋矿主砂体为辫状河三角洲平原分支河道滞留沉积之上的河道充填砂体；含矿砂岩主要为深灰色平行层理细砂岩，见无晶型黄铁矿，含 5% 长条状、粒状炭屑，局部见棕红色氧化残留，钙质胶结，致密；542.05-544.45m 的矿层厚度 2.40m，矿层平均品位 2.2634×10^{-4} ，矿层平米铀量 1.09kg/m^2 （张森等，2018）。

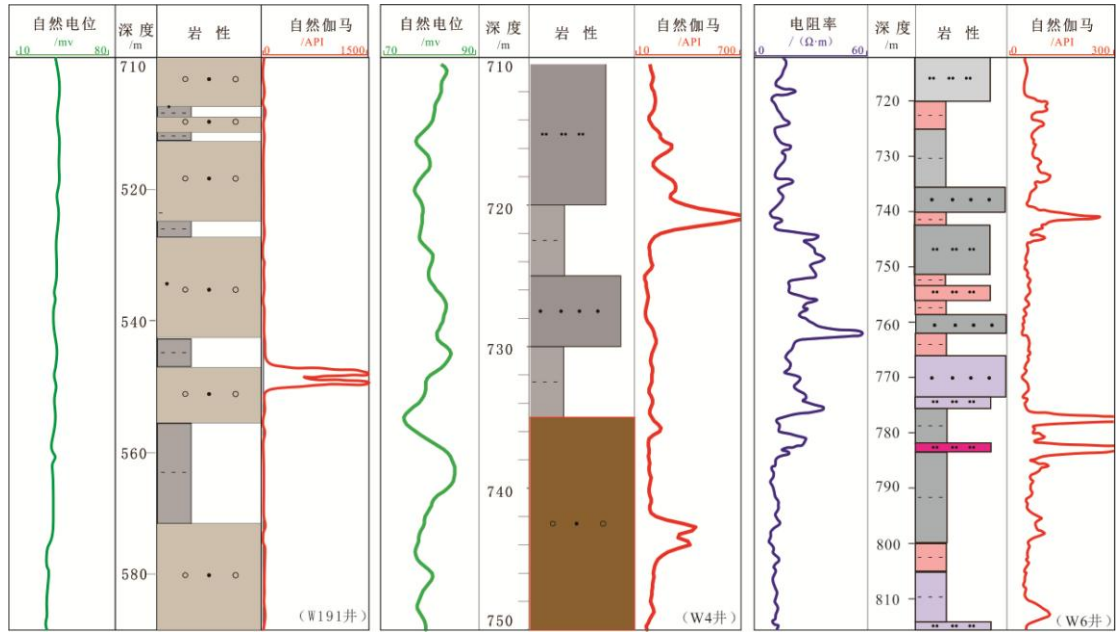


图9 松辽盆地乾安地区四方台组石油孔放射性异常特征 (W191 井放射性信息据文献(张森等, 2018)修改)
 Fig.9 Radioactive anomaly characteristics of oil holes in Sifangtai formation, Qian'an area of Songliao Basin
 (Radioactivity information of W191 is after Zhang Sen et al., 2018)

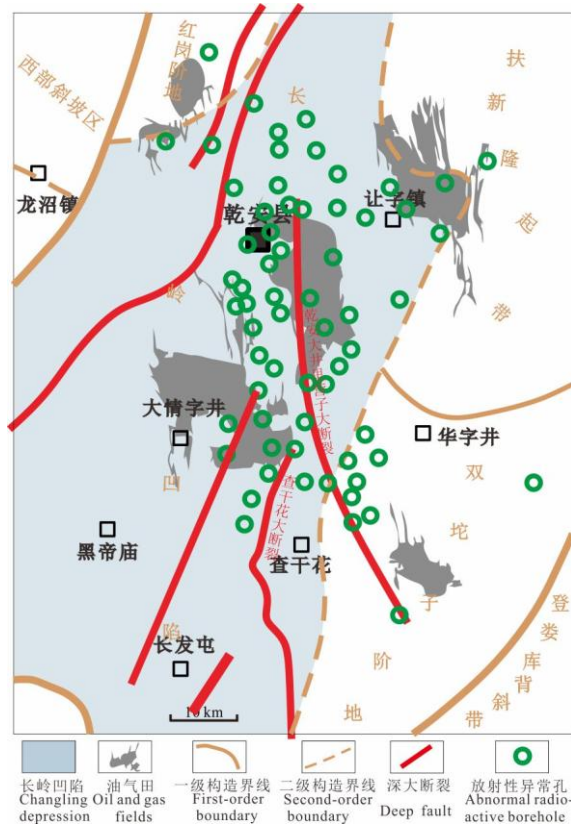


图10 松辽盆地乾安地区四方台组放射性异常孔分布 (油气田据赵文智等, 2004)
 Fig.10 Distribution of radioactive abnormal holes in K_2S and K_2n^5 , Qian'an area of Songliao Basin
 (The oil field is after Zhang et al., 2004)

4 四方台组铀成矿条件与找矿方向

4.1 渗入铀成矿条件分析

乾安地区位于孤店大型反转背斜带西翼（图 2）。该背斜核部被剥蚀至四方台组一嫩五段形成乾安构造天窗，天窗具有较大规模（1636 km²，图 3）、长时间暴露（大于 44.5Ma）、沟通目标层等有利特征，这大大增加了乾安构造天窗作为渗入成矿流体进入四方台组发生成矿作用的可能性。区内四方台组底部 T₀₃ 不整合界面之上发育辫状河-辫状河三角洲等优势相带砂体（图 5、图 6、图 7），加之区内西部具有多个沟通四方台组与地表的深大断裂（图 2、图 4），使得区内四方台组具备完整的渗入成矿必备的“补一径一排”体系。考虑到四方台组地层自身铀源条件良好（表 1、表 2），且灰黄色砂岩（HQ31-84）、黄斑块状细砂岩（HQ31-49）等后生氧化砂岩（图 8-a、图 8-b）存在明显的铀迁出（Th/U 比大于 4.2，表 2），共同表明渗入成矿作用在乾安地区四方台组的确存在。

4.2 渗出铀成矿条件分析

研究区北部大 417 石油孔嫩江组中发现两层厚度较大的放射性异常段（**错误！未找到引用源。**、表 3），而这两层对应的岩性为褐色油页岩、深灰色泥岩，即良好的烃源岩段。结合 W3 孔深灰色泥岩铀含量 $20 \times 10^{-6} \sim 362 \times 10^{-6}$ ，明显高于普通泥岩（ 362×10^{-6} ，表 1、图 12），同样对应的岩性为深灰色泥岩。考虑到两者的高度契合性，认为研究区目标层之下存在富铀烃源岩段。铀在烃源岩内的主要为有机质等吸附形式存在的铀酰有机络合物；其吸附铀的有机质将由于温度的升高而发生热降解生成多种气态液态烃类，这些产物因富含多种有机官能团，易于与铀等金属离子配位，形成金属有机络合物进入富铀深部流体溶液中，即盆地深部烃源岩，虽处于还原环境，但由于有机质的作用，铀容易萃取从烃源岩中迁出（张万良，2018），即深部烃源岩具有供铀能力。研究区四方台组之下存在深部下白垩统沙河子组、中上部上白垩统青一段及嫩一段厚层烃源岩，都有可能含有富铀烃源岩段。结合前人产铀盆地深部的烃源岩即是砂岩型铀矿床的铀源岩（张万良，2018）的认识，推断乾安地区四方台组之下存在多套深部富铀建造，即可能存在多套深部铀源。

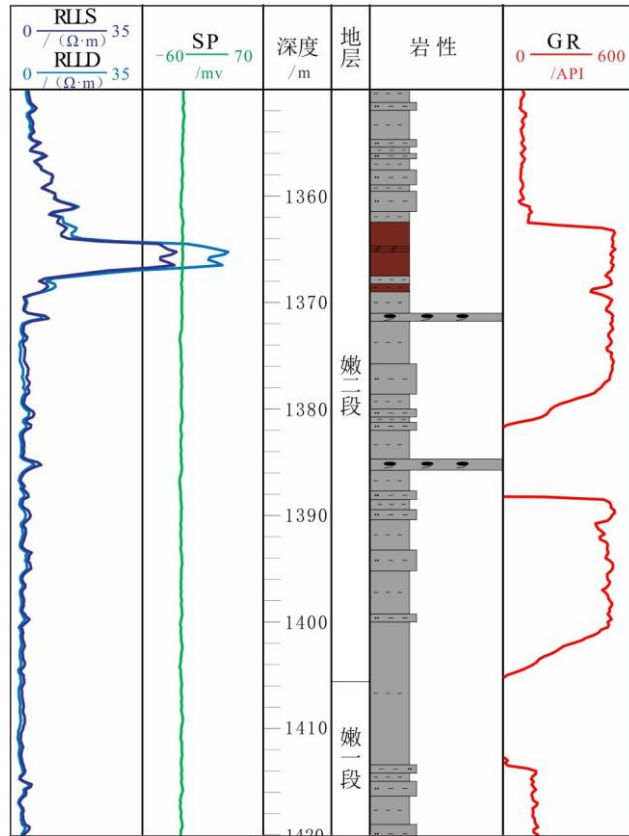


图 11 松辽盆地大 417 井深部放射性异常段特征

Fig.11 Deep radioactive abnormal section in well 417, Songliao Basin

表 3 松辽盆地大 417 钻孔深部放射性异常段统计表

Tab.3 Statistics of radioactive abnormal section in borehole 417, Songliao Basin

层号	厚度/m	深度/m	GR平均值/API	岩性
1	14.15	1363.05-1377.20	483.5	褐色油页岩、深灰色泥岩
2	11.75	1388.625-1400.375	472.8	深灰色泥岩

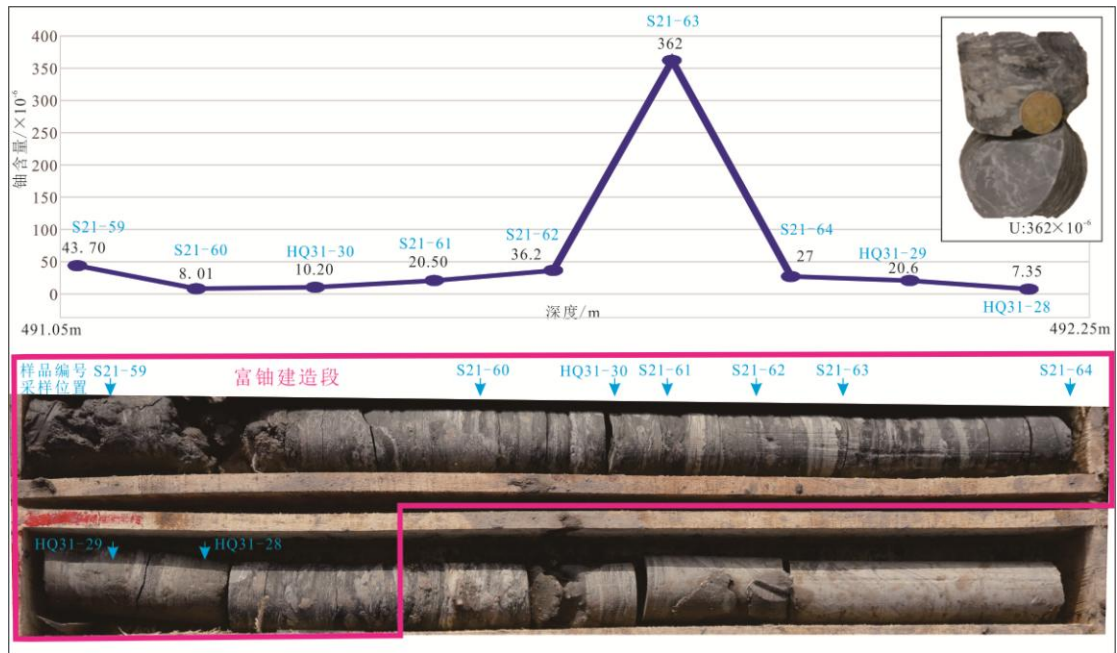


图 12 松辽盆地乾安地区 W3 井富铀建造段特征

图中样品编号及铀含量同表 1

Fig.12 Uranium-rich formation section in well W3, in Qian'an area of Songliao Basin

The sample number and uranium content are the same as those in Tab.1

研究区内深大断裂构造发育, 这些深大断裂断距大、倾角高, 断穿层位多, 断裂或切穿下部(下白垩统沙河子-登楼库组、上白垩统青山口-嫩江组) 厚大烃源岩、或位于烃源岩减薄的边部, 空间产出与深部烃源岩层关系密切(图 2、图 3、图 4)。而烃源岩层为深部可能的富铀建造层位(张万良, 2018; 李子颖等, 2021), 这些深大断裂作为沟通深部富铀建造与浅部四方台组目标层的桥梁, 使得深部铀源为目标层四方台组提供铀源成为可能。而四方台组底部 T₀₃ 不整合构造发育, 不整合之上的辫状河-辫状河三角洲砂体, 配合深大断裂主导的断裂体系, 三者可构成空间上网毯状的渗出成矿流体运移的高速通道体系。

从建造特征上看, 无论是盆地尺度还是研究区尺度, 目标层均为“下灰上红”下灰上红的渗出有利建造: 盆地尺度上, 松辽盆地下白垩统沙河子-营城-登楼库组, 整体为一套灰色建造, 而上白垩统(尤其是泉头组、姚家组、四方台组) 整体为一套红色建造; 从研究区尺度上看, 四方台组下部的嫩江组地层为一套灰色富有机质建造, 而四方台组为一套干旱、炎热气候(Wang et al., 2013; 王成善等, 2016)特征上的红杂色碎屑建造(图 9)。

研究区四方台组放射性异常石油孔局限分布在长岭凹陷三级构造单元内(图 10), 即总体位于松辽盆地面积最大的断陷——长岭断陷(葛荣峰等, 2009)之上。断陷内深部富铀建造(下白垩统烃源岩)发育, 断陷之上中浅部富铀建造(青一段、嫩一二段烃源岩)亦广泛展布。这些深部富铀建造中的铀在烃源岩深埋藏热演化阶段可形成含铀有机络合物从烃源岩中迁出(张万良, 2018)形成深部富铀成矿流体。这些深部成矿流体进一步在地层超压作用下通过研究区内网毯状的高速通道体系(图 2、图 4)运移至浅部目标层位并富集成矿。前人研究表明, 研究区晚白垩世以来存在 72.3–70.8、51.3–40.5、37.5–34.7Ma 等至少三期深部油气运聚期(闫建萍等, 2008), 即区内至少存在三期以上的深部流体运移期, 而深部富铀流体可能是其中的某一次或某几次。研究区受后生改造影响的灰绿色砂岩的铀含量要高于原生红色砂岩(表 2), 可能是深部富铀流体由深部富铀建造通过“网毯状”的渗出成矿流体运移的高速通道体系运移至目标层四方台组进而增加后生还原砂岩铀含量的直接证据。另外, 四方台组放射性异常垂向多段产出的特点(图 9), 与二连盆地哈拉图矿床典型渗出型矿床多层

产出的特征类似(李子颖等, 2022), 可能是这些深部富铀流体运移的地质记录。该认识与“大庆长垣南段工业孔中四方台组富铀砂岩碳酸盐胶结物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值偏负指示铀矿沉淀和富集为深部流体作用的结果(蔡宁宁等, 2021)”结果一致。考虑到放射性铀异常孔的空间产出与油气田、乾安-大井里营子深大断裂-查干花深大断裂密切相关(图 10), 推测研究区四方台组放射性异常的分布可能受到具有深大断裂沟通的深部富铀烃源岩建造的控制。结合研究区具有四方台组深部铀源、“深部富铀烃源岩+深度穿层断裂+T₀₃ 区域不整合面+辫状河三角洲平原分支河道砂体”构成的深部渗出流体通道、“下灰上红”建造、明显后生还原改造、多段放射性异常等渗出成矿有利条件, 且四方台组放射性异常代表的铀含量能达到工业品位(张森等, 2018), 认为研究内四方台组确实发生过渗出成矿流体运移、富集改造成矿的客观事实。

4.3 乾安地区四方台组铀成矿模式

松辽盆地乾安地区四方台组同时具备渗入和渗出两种铀成矿条件。研究区发育多条沟通深部富铀建造、中浅部富铀建造与目标层之间的深大断裂(图 2、图 3、图 4), 且四方台组底部 T₀₃ 区域不整合之上的乾安构造斜坡上发育厚大的辫状河-辫状河三角洲砂体(图 7), 深大断裂+不整合+斜坡+天窗可构成四方台组稳定的渗出成矿流体通道体系; 区内后生还原改造强度远大于氧化改造(图 5、图 8), 加之 W3 孔、石油孔垂向上见多层铀富集段或放射性异常段(图 5、图 9), 综合表明区内四方台组具备渗出成矿的优越条件。考虑到四方台组乾安构造天窗暴露时间长(根据天窗附近 T₀₂ 缺失的地层推断, 其间断时限可达 45.5 Ma), 且研究区中部的 W3 孔四方台组发育典型的后生氧化(图 8)、灰黄色砂岩-黄斑块状细砂岩存在明显的铀迁出特征, 区内存在层间渗入成矿。综合判断, 区内的铀成矿作用类型应以深部渗出叠合浅部渗入耦合成矿作用共同成矿, 且以深部渗出成矿为主。基于此认识提出了松辽盆地中部乾安地区四方台组渗出-渗入耦合铀成矿模式(图 13): 深大断裂沟通了白垩统深部富铀建造和白垩统中浅部富铀建造, 来自深部厚层富铀建造中的富铀成矿流体在地层超压等动力驱动下可沿着深大断裂(配合中浅部的盖层断裂)垂向运移至目标层, 在目标层四方台组继续沿横向运移通道(T₀₃ 不整合、辫状河砂体)顺乾安斜坡带向研究区东部的乾安构造天窗方向(构造高部位)运移, 遇到沿乾安构造天窗渗入的浅部成矿流体, 深部渗出流体与浅部渗入流体交汇段地球化学环境发生巨变, 含矿流体中的铀卸载富集成矿; 由于渗入成矿流体运移距离、目标层初始铀含量有限等因素造成渗入流体携带铀的总量相对较小, 而渗出流体不但有来自深部富铀建造的多次幕式补给、且有中浅部富铀建造的叠加供给, 其对铀成矿的贡献相对更大。需要注意的是, 此模式中的本模式强调渗出-渗入耦合铀成矿作用更多地强调乾安地区四方台组铀成矿作用同时包含渗入、渗出这两种成矿作用的参与, 并不强调这两种成矿作用必须同时发生, 即渗出、渗入铀成矿作用可在不同的成矿阶段独立发生或同一成矿阶段内同时发生。另外, 需要注意乾安构造天窗可能在不同的成矿阶段担当不同的成矿角色: 在渗出阶段, 乾安构造天窗附近可能因相对低压而成为渗出流体运移的优势指示方向, 而在渗入阶段, 天窗则作为含铀含氧水的补给窗口。从整个成矿全过程综合考虑, 四方台组区域上为一套红杂色建造, 浅部渗入流体在这种建造制约成矿的关键因素为目标层本身缺少还原剂, 需要外部提供一定的还原剂以补充其还原容量进而促进铀从浅部氧化流体中还原进而促使铀沉淀(焦养泉等, 2018), 而研究区内断裂附近的渗出流体部位则是提供这种外部还原剂的绝佳部位; 而从渗出成矿角度看, 深部渗出还原流体在这种红杂色建造中成矿的关键地质因素是需要足够氧化的成矿部位进而能形成更大的还原-氧化障进而促进铀的沉积富集(李子颖等, 2022), 而浅部氧化流体的接触部位除了地层本身的氧化障外, 外部氧化流体的不断氧化改造可形成更大、更强的还原-氧化障进而促进铀的沉积富集。故无论是

从渗入成矿还是渗出成矿，浅部渗入流体和深部渗出流体的交汇部位都是成矿地球化学条件最佳的理想部位，是最有利于成矿流体中铀发生卸载、沉淀、富集等成矿作用的地质部位，研究区四方台组放射性异常集中在该部位集中产出就是最有力的证据。基于此认为“浅部渗入流体和深部渗出流体的交汇部位是成矿的最有利部位”。据此预测沿天窗渗入的成矿流体与深部渗出流体的交汇部位为最有利的成矿区域（图 13）。

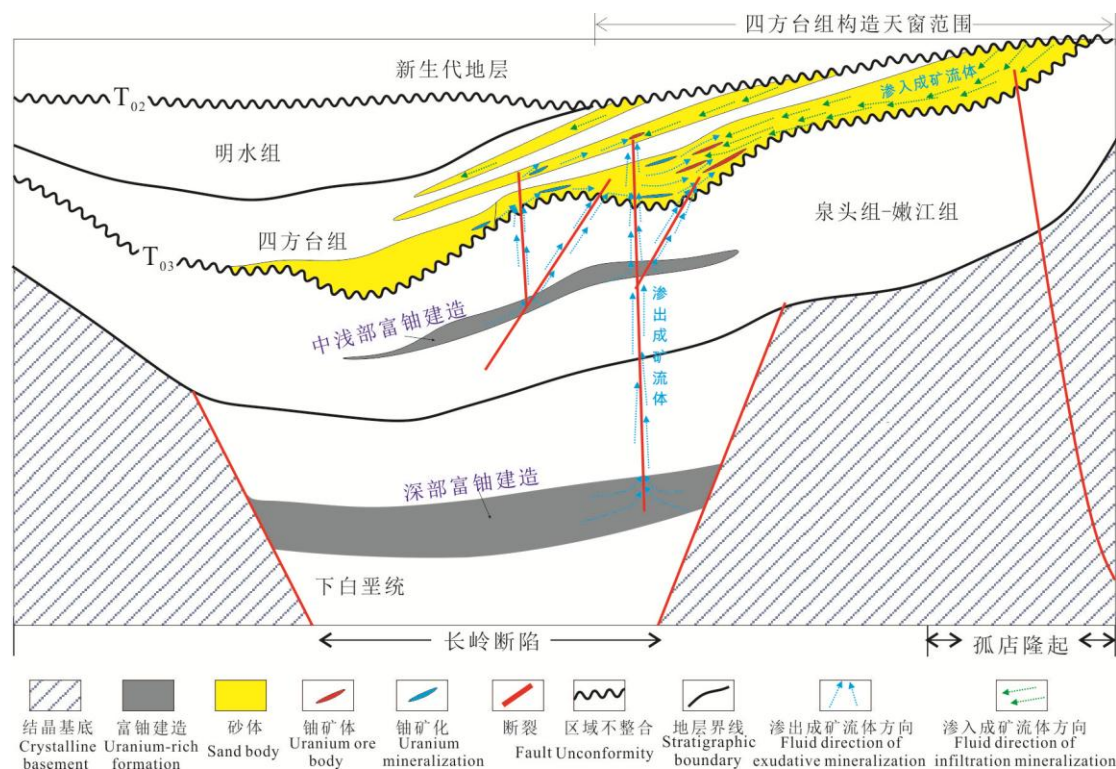


图 13 松辽盆地乾安地区四方台组渗出-渗入耦合铀成矿模式

Fig.13 Uranium metallogenic model coupled with infiltration and exfiltration of Sifangtai Formation, Qian'an area of Songliao Basin

4.4 找矿方向

结合区内乾安构造天窗、断裂、优势沉积相砂体展布、放射性异常孔平面分布、四方台组底板埋深等成矿条件，依据乾安地区四方台组渗出-渗入耦合铀成矿模式（图 13），笔者认为乾安县东南乾安县—让字镇—华字井—查干花一带可作为乾安地区的砂岩型铀矿重点勘查区加大探索（图 14）：该地区四方台组构造上紧邻乾安构造天窗西部边界，是浅部渗入成矿流体氧化改造的前端方向；同时该区位于辫状河向辫状河三角洲平原、辫状河三角洲平原到辫状河三角洲前缘过渡的相带转换位置，为砂岩型铀矿成矿的有利场所(韩效忠等, 2020)；加之区内乾安大井里营子、查干花等深大断裂发育（图 2、图 3、图 4、图 10），这些断裂可沟通深部富铀建造，结合辫状河道砂体、四方台组底界不整合、及乾安构造天窗，构成渗出成矿流体完整的渗出、运移、富集体系（李子颖等, 2022）。区内这些特殊的地质条件有效组合使得乾安县—让字镇—华字井—查干花一带的四方台组可能为浅部渗入流体和深部渗出流体的交汇部位，该地区密集分布的四方台组放射性异常孔（图 10、图 14）显示出该区巨大的找矿前景。同时考虑到四方台组底板埋深小于 1000m（图 3、图 14），完全符合目前砂岩型铀矿找矿的深度要求。综合认为让字镇—查干花一带四方台组的辫状河—辫状河平原河道砂具有砂岩型铀矿成矿较大的成矿潜力，可作为盆地腹部下一步勘探的重点区

优先探索方向。

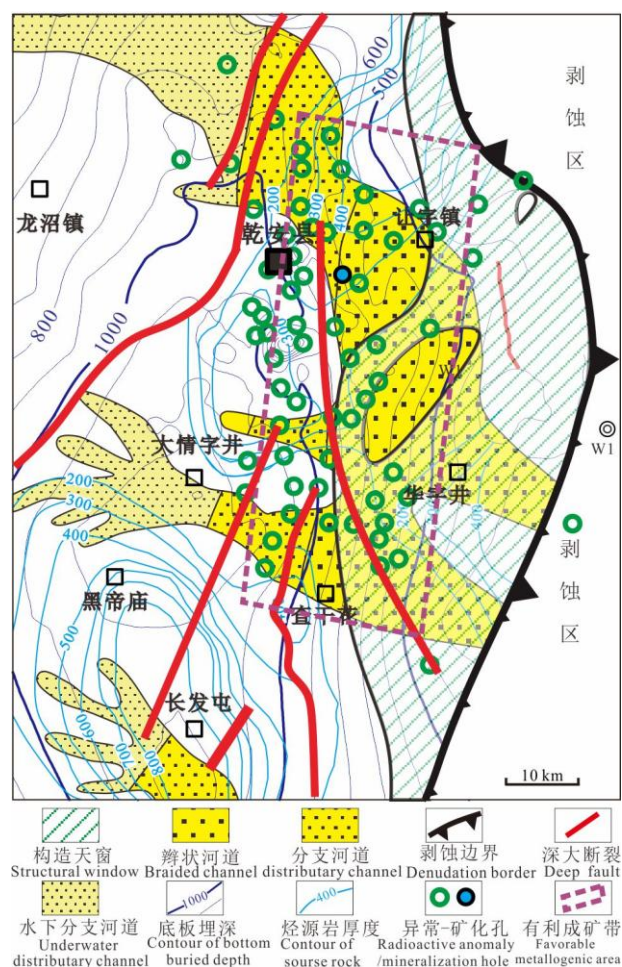


Fig.14 Prediction of favorable areas of Sifangtai formation in Qian'an area of Songliao Basin
The contour line of Shahezi Formation source rocks and large faults are after Ge Rongfeng et al. (2019)

5 结论

(1) 明确了四方台组是盆地腹地砂岩型铀矿的有利目标层位，乾安新区四方台组具备构造天窗、深大断裂、辫状河三角洲河道砂、良好地层铀源条件与后生改造等基本铀成矿条件；

(2) 松辽盆地中部乾安地区四方台组同时具备渗入和渗出两种铀成矿条件：深部富铀建造、沟通富铀建造与目标层之间的深大断裂+不整合+砂体构成的渗出通道体系、岩心显示渗出还原改造特征、钻孔揭示多段铀富集段或放射性异常等有利渗出成矿条件，同时地层本身铀源好、长时间暴露乾安构造天窗、灰黄色砂岩-黄斑块状细砂岩存在明显铀迁出等较有利渗入条件，多种有利铀成矿条件的叠加表明了研究区四方台组巨大的成矿潜力；

(3) 提出了松辽盆地中部乾安地区四方台组渗出-渗入耦合铀成矿模式，浅部渗入流体和深部渗出流体的交汇部位是乾安地区四方台组砂岩型铀矿最有利成矿区，提出让字镇-查干花一带四方台组的辫状河-辫状河平原河道砂体可作为盆地腹部下一步勘探的重点区优先探索；

(4) 该研究首次将渗出成矿条件评价引入到松辽盆地中部红杂色建造的铀成矿条件的系统评价, 改变了以往从渗入角度评价目标层的单一找矿思路, 可有效拓展盆地腹地红杂色层的找矿思路, 通过盆地中部乾安找矿新区的开辟极大地拓展了松辽盆地的找矿空间。

References

- Берриман А.Н. 1995. Hydrogenic Uranium Deposit. Thanslated by XiongFuqing, SunXitian, Di Yongqiang: No. 203 Reseach Institute of Nuclear Industry (in Chinese).
- Губкин Н.В, Смирнов А.А. 1981. Prospecting Criteria and Prediction Basis of Hydrogenetic Uranium Deposits. Thanslated by Lei Wengao, Chen Zhuyi. Beijing: Atomic Energy Press (in Chinese).
- Cai Jianfang, Yan Zhaobin, Zhang Liangliang, Feng Zhibing, Huang Xiao, Nie Fengjun, Xai Fei. 2018. Relationship between grey sandstone and uranium mineralization in Yaojia Formation of upper Cretaceous in Tongliao, Inner Mongolia. Journal of East China University of Technology(Natural ScienceEdition), 41(4):328~335 (in Chinese with English abstract).
- Cai Ningning, Zou Niuniu, Fu Yong, Wei Shuaichao, Li Jianguo, Tang Chao, Wei Jialing. 2021. Carbon and oxygen isotopic characteristics and uranium mineralization significance of the sandstone-type uranium deposit in the Sifangtai Formation at the southern margin of Daqing placanticline in Songliao Basin. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(3):140-150(in Chinese with English abstract).
- Cao Minqiang, Rong Hui, Chen Zhenyan, Jiao Yangquan, Li Hongliang, Wang Yan, Li Qingchun, 2021. Quantitative Characterization and Controlling Factors of the Interlayer Oxidation Zone of Qianjiadian Uranium Deposit, Songliao Basin. Earth Science, 46(10): 3453-3466(in Chinese with English abstract)..
- Cao Yue, Gao Shengli, Qiao Xiangyang, Liu Xixiang, Gao Pengpeng, Ji Yang, 2015. Origin and Accumulation of Natural Gas in Volcanics of Yingcheng Formation of Changling Fault Depression, Southern Songliao Basin. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 33(04): 27-35(in Chinese with English abstract).
- Cheng Yinhang, Wang Shaoyi, Jin Ruoshi, Li Jianguo, Ao Cong, Teng Xueming. 2019. Global Miocene tectonics and regional sandstone-style uranium mineralization. Ore Geology Reviews, 106: 238-250.
- Cheng Yinhang, Wang Shaoyi, Zhang Tianfu, Teng Xueming, Ao Cong, Jin Ruoshi, Li Hongliang. 2020. Regional sandstone-type uranium mineralization rooted in Oligo - Miocene tectonic inversion in the Songliao Basin, NE China. Gondwana Research, 88: 88-105.
- Ding Bo, Liu Hongxu, Zhang Bin, Yi Chao, Liu Hongjun, Wang Gui, Ren Zhiyong. 2020.The formation mechanism of tabular orebody of sandstone- type uranium in the northern Ordos Basin: constraints on the study of kaolinite content from different zones of ore-bearing sandstone. Acta Geologica Sinica,94(10):2874-2882(in Chinese with English abstract).
- Feng Zhibing, Nie Fengjun, Ning Yuanli, Jiang Li, Xia Fei, He Jianfeng, Sheng Zhouning. 2022. Discussion and design of exploration technology for sandstone- type uranium deposits in the interior of the sedimentary basins. Acta Geologica Sinica, 96(6):2217-2229(in Chinese with English abstract)..
- Feng Zhibing, Nie Fengjun, YanZhaobin , Jiang Li, Gu Shefeng, Chen Lulu. 2014. Structure and fluid evolution of the westem slope of Songliao basin and Itsrelation to sandstone type uranium mineralization. Journal of East China University of Technology(Natural ScienceEdition), 37(01): 13-20(in Chinese with English abstract).
- Feng Z Q, Jia C Z, Xie X N, Zhang S, Feng Z H, Cross T A. 2010. Tectonostratigraphic Units and Stratigraphic Sequences of the Nonmarine Songliao Basin, Northeast China. Basin Research, 22(1): 79-95.

-
- Feng Zhiqiang, Dong Li , Tong Ying , Feng Zihui, Zhang Shun,Wu Gaokui ,Ren Qiang. 2021. Impacts of the closure of eastern Mongolia-Okhotsk Ocean on formation and evolution of Songliao Basin. *Oil & Gas Geology*, 42(2): 251-264(in Chinese with English abstract).
- Ge Rongfeng, Zhang Qinglong, Xu Shiyin, Wang Liangshu, Xie Guoai, Chen Juan, Wang Xiyong. 2009. Structure evolution and its kinetic setting of Changling fault depression in Songliao basin. *Journal of Geology*, 33(04): 346-358(in Chinese with English abstract).
- Han Xiaozhong, Wu Zhaojian, Lin Zhongxiang, Jiang Zhe, Hu Hang, Yin Dongfa, Ji Hui, Li Zinan. 2020. Constraints of Sedimentary Facies of the Targeting Layers on Sandstone-type Uranium Mineralization in Major Uranium-producing Basins in Northern China: A Brief Discussion.*Geotectonica et Metallogenia*, 44(04): 697-709(in Chinese with English abstract).
- He Zhongbo. 2013. Types of Unconformity in Sedimentary Basin and its Relation to Sandstone Hosted Uranium Mineralization. *Uranium Geology*, 29(03): 133-138(in Chinese with English abstract).
- Hou Qijun, Feng Zhiqiang, Feng Zihui. 2009. *Terrestrial Petroleum Geology of Songliao Basin*. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).
- Li Ziyang, Qin Mingkuan, Cai Yuqi, Fang Xiheng, Guo Qingyin, Yi Chao, Xia Yuliang, Sun Ye, Zhang Zilong, Jia Licheng. 2020. Metallogenic Models and Prospective Analysis of Sandstone-type Uranium Deposits in Ordos Basin. *Uranium Geology*, 36(01): 1-13 (in Chinese with English abstract).
- Li Ziyang, Qin Mingkuan, Fan Honghai, Cai Yuqi, Cheng Jixing, Guo Dongfa, Ye Fawang, Fan Guang, Liu Xiaoyang. 2021. Main Progresses of Uranium Geology and Exploration Techniques for the Past Decade in China. *Acta Metallurgica Sinica*, 40(4): 845-857(in Chinese with English abstract).
- Li Ziyang, Liu Wusheng, Li Weitao, Li Xide, Qin Mingkuan, Cai Yuqi, Zhang Yunlong, He Sheng, Wu Qubo, Qiu Linfei, Liu Chiheng, Zhu Pengfei, Ji Hongwei, Guo Jian. Exudative metallogeny of the Hadatu sandstone—type uranium deposit in the Erlian Basin, Inner Mongolia, 2022, 49(4): 1009-1047(in Chinese with English abstract).
- Li Chenghui, Cheng Yinhang, Wang Tiejun, Wang Shaoyi, Zhang Tianfu, Cheng Xianyu, Zhang Xiawei, Li Yanfeng. 2020. The controlling effect of Cenozoic tectonic evolution on the mineralization of sandstone-type uranium deposits in the Songliao Basin: evidence from apatite fission tracks. *Acta Geologica Sinica*,94(10):2856-2873(in Chinese with English abstract).
- Liu Mingjie, Liu Zhen, Wu Yaowen, Zhu Wenqi, Wang Peng. 2017. Differences in formation process of tight sandstone gas reservoirs in different substructures in Changling Fault Depression, Songliao Basin, NE China. *Petroleum Exploration and Development*. 44(2): 235-242(in Chinese with English abstract).
- Jiao Yangquan, Wu Liquan, Rong Hui, 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. *Earth Science*, 43(2): 459-474.Miao Peisen, Li Jianguo, Tang Chao, Jin Ruoshi, Cheng Yinhang, Zhao Long, Xiao Peng, Wei Jialin. 2017. Metallogenic condition and prospecting orientation for deep sandstone-hosted uranium deposits in Mesozoic-Cenozoic basins of North China. *Geological Bulletin of China*, 36(10): 1830-1840(in Chinese with English abstract).
- Nie Fengjun, Yan Zhaobin, Xia Fei, LI Mangen, Lu Yayun, Cai Jianfang, Guo Funeng, Ning Jun. 2017. Hot fluid flows in the sandstone-type uranium deposit in the Kailu basin, Northeast China. *Geological Bulletin of China*, 36(10): 1850-1866 (in Chinese with English abstract).
- Ning Jun, Xia Fei, Nie Fengjun, Tong Shumin, Song Hairui, Feng Zhibing, Nie Tao, Li Qiang. 2018. Analysis of the Relation between Uranium Mineralization and the Grey Sand Body in the Lower Part of Yaojia Formation in the South of Songliao Basin. *Journal of East China University of Technology(Natural*

-
- ScienceEdition), 41(04): 336-342. (in Chinese with English abstract).
- Rong Hui, Jiao Yangquan, Wu Liqun, Ji Dongmin, Li Hongliang, Zhu Qiang, Cao Minqiang, Wang Xiaomei, Li Qingchun, Xie Huili, 2016. Epigenetic Alteration and Its Constraints on Uranium Mineralization from the Qianjiadian Uranium Deposit, Southern Songliao Basin. *Earth Science*, 41(1): 153-166(in Chinese with English abstract).
- Rong H, Jiao Y, Wu L, Wan D, Cui Z, Guo X, Jia J. 2019. Origin of the carbonaceous debris and its implication for mineralization within the Qianjiadian uranium deposit, southern Songliao Basin. *Ore Geology Reviews*, 107: 336-352.
- Song Ying. 2010. The Post-rift Tectonic Inversion of SoBasin, NE China and Its Dynamic Background. China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Tang Chao, Jin Ruoshi, Gu Shefeng, Li Jianguo, Zhong Yanqiu, Miao Peisen, Sima Xianzhang, Wei Jialin. 2018. Discovery and significance of industrial uranium ore in Sifangtai Formation, north Songliao basin. *Geological Survey and Research*, 41(01): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- Tang Xiangfei, Wang Guo, Zhang Zhanfeng, Li Yanlong, Wu Shengming, Li Chenglong. 2018. A Study on Uranium Metallogenic Model of Jurassic in Kamust Region, Junggar Basin. *Geological Review*, 64(3):647-657 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chengshan, Feng Zhiqiang, Wang Pujun. 2016. Initial Report of Continental Scientific Drilling Project of the Cretaceous Songliao Basin(SK1). Beijing: Science Press.
- Wang C, Scott R W, Wan X, Graham S A, Huang Y, Wang P, Wu H, Dean W E, Zhang L. 2013. Late Cretaceous climate changes recorded in Eastern Asian lacustrine deposits and North American Epieric sea strata. *Science & Technology Innovation Herald*, 126(126): 275-299.
- Wang Jun, Geng Shufang. 2009. Characteristics of the interlayer oxidation zone and the Kujieertai uranium deposit in Yili Basin. *Geology in China*, 36(03): 705-713(in Chinese with English abstract).
- Wang P, Mattern F, Didenko N A, Zhu D, Singer B, Sun X. 2016. Tectonics and cycle system of the Cretaceous Songliao Basin: An inverted active continental margin basin. *Earth-Science Reviews*, 159: 82-102.
- Xia Yuliang, Lin Jinrong, Li Zhiyi, Li Shengxiang, Liu Hanbin, Wang Zhiming, Fan Guang, Zheng Jiwei, Li Zhenji, Zhang Mingyu. 2003. Perspective and resource evaluation and metallogenic studies on sandstone-type uranium deposit in Qianjiadian Depression of Songliao Basin. *China Nuclear Information Centre*, (03): 105-117(In Chinese).
- Xing Zuochang, Qin Mingkuan, Li Yan, Guo Qiang, Zhang Yang, Jia Licheng, Xiao Jing. Stratigraphic architecture, sedimentary filling and uranium prospecting of Upper Cretaceous strata, northeastern Songliao Basin. *Geology in China*, 48(4): 1225-1238(in Chinese with English abstract).
- Xing Zuochang, Qin Mingkuan, Zhang Yang, Guo Qiang, Li Yan, Jia Licheng, Xiao Jing. 2021. Sedimentary Facies and Uranium Prospecting Potential of Yaojia Formation in Tieli, Northeastern Songliao Basin. *Uranium Geology*, 37(4): 573-583(in Chinese with English abstract).
- Yan Jianping, Liu Chiyang, Guo Guihong. 2008. Determination of oil/gas entrapment stage and time in Fuyang Reservoir of Songliao Basin. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)* 44(05):26-29 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jindai. 2016. Innovation and Development of Metallogenic Theory for Sandstone Type Uranium Deposit in China. *Uranium Geology*, 32(06): 321-332(in Chinese with English abstract).
- Zhang Long, Wu Bailin, Liu Chiyang, Lei Kaiyu, Hou Huiqun, Sun Li, Cun Xiaoni, Wang Jianqiang. 2016. Provenance Analysis of the Zhiluo Formation in the Sandstone hosted Uranium Deposits of the Northern Ordos Basin and Implications for Uranium Mineralization. *Acta Geologica Sinica*, 90(12):3441-3453(in

Chinese with English abstract).

- Zhang Sen, Shi Lei, Ju Nan, SU Jianwei. 2018. The “Oil-Uranium Co-Exploitation” Idea in Songliao Basin: A Practice in Southern Central Depression. *Geology and Resources*, 27(03): 257-262(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wanliang. 2018. Hydrocarbon source rock=uranium source rock: new thinking about metallogenic material source of sandstone type uranium deposit. *Mineral Resource and Geology*, 32(01): 1-7(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zilong, Hang Xiaozhong, Yao Chunling. 2006. Discussion on evaluation methods of uranium source conditions for sandstone-type uranium deposits. *World Nuclear Geoscience*, 23(02): 67-72(in Chinese with English abstract).
- Zhao Wenzhi, Li Jianzhong. 2004. Control of basement faults on hydrocarbon accumulation in Southern Songliao Basin. *Acta Petro Leica Sinica*, 25(04): 1-6(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhonghua, Bai Jingping, Lai Tiangong. 2018. Reversal Structure and Its Relation to Metallization of Sandstone Type Uranium Deposit in Northern Songliao Basin. *Uranium Geology*, 34(05): 274-279 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 别列里曼 A. H. 1981. 水成铀矿床[M]. 熊福清, 孙西田, 狄永强, 译. 咸阳: 核工业二〇三研究所.
- 古勃金, 斯米尔诺夫. 1981. 水成铀矿床的找矿标志和预测基础[M]. 雷文高, 陈祖伊, 译. 北京: 原子能出版社.
- 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体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(04): 328-335.
- 蔡宁宁, 邹妞妞, 付勇, 魏帅超, 李建国, 汤超, 魏佳林. 2021. 松辽盆地大庆长垣南缘四方台组砂岩型铀矿碳氧同位素特征及铀成矿意义[J]. *地质科技通报*, 40(3): 140-150.
- 曹民强, 荣辉, 陈振岩, 焦养泉, 里宏亮, 王岩, 李青春. 2021. 松辽盆地钱家店铀矿床层间氧化带结构定量表征及制约因素[J]. *地球科学*, 46(10): 3453-3466.
- 曹跃, 高胜利, 乔向阳, 刘喜祥, 高鹏鹏, 季阳. 2018. 松辽盆地南部长岭断陷营城组火山岩天然气成因与成藏[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 33(04): 27-35.
- 丁波, 刘红旭, 张宾, 易超, 刘洪军, 王贵, 任志勇. 2020. 鄂尔多斯盆地北缘砂岩型铀矿板状矿体形成机制: 来自含矿层不同分带砂岩中高岭石含量研究的约束[J]. *地质学报*, 94(10): 2874-2882.
- 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, 江丽, 谷社峰, 陈路路. 2014. 松辽盆地西部斜坡构造-流体演化特征与铀聚集[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 37(01): 13-20.
- 冯志强, 董立, 童英, 冯子辉, 张顺, 吴高奎, 任踞. 2021. 蒙古-鄂霍茨克洋东段关闭对松辽盆地形成与演化的影响[J]. *石油与天然气地质*, 42(2): 251-264.
- 葛荣峰, 张庆龙, 徐士银, 王良书, 解国爱, 陈娟, 王锡勇. 2009. 松辽盆地长岭断陷构造演化及其动力学背景[J]. *地质学刊*, 33(04): 346-358.
- 韩效忠, 吴兆剑, 林中湘, 蒋喆, 胡航, 殷栋法, 季辉, 李紫楠. 2020. 浅论中国北方主要产铀盆地含矿目标层沉积相对砂岩型铀矿的制约[J]. *大地构造与成矿学*, 44(04): 697-709.2020.
- 何中波. 2013. 沉积盆地不整合类型及其与砂岩型铀矿成矿的关系[J]. *铀矿地质*, 29(03): 133-138.
- 侯启军, 冯志强, 冯子辉. 2009. 松辽盆地陆相石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 李子颖, 秦明宽, 蔡煜琦, 方锡珩, 郭庆银, 易超, 夏毓亮, 孙晔, 张宇龙, 贾立城. 2020. 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿成矿作用和前景分析[J]. *铀矿地质*, 36(01): 1-13.

- 李子颖, 秦明宽, 范洪海, 蔡煜琦, 程纪星, 郭冬发, 叶发旺, 范光, 刘晓阳. 2021. 我国铀矿地质科技近十年的主要进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 40(04): 845-857.
- 李子颖, 刘武生, 李伟涛, 李西德, 秦明宽, 蔡煜琦, 张云龙, 何升, 吴曲波, 邱林飞, 刘持恒, 朱鹏飞, 纪宏伟, 郭建. 2022. 内蒙古二连盆地哈达图砂岩铀矿渗出铀成矿作用[J]. 中国地质, 49(4): 1009-1047.
- 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. 地球科学, 43(02): 459-474. 吏成辉, 程银行, 王铁军, 王少轶, 张天福, 程先钰, 张夏炜, 李艳锋. 2020. 松辽盆地新生代构造演化对砂岩型铀矿成矿的控制作用——来自磷灰石裂变径迹的证据[J]. 地质学报, 94(10): 2856-2873.
- 刘明洁, 刘震, 伍耀文, 朱文奇, 王鹏. 2017. 松辽盆地长岭断陷不同次级构造带致密砂岩气形成过程差异[J]. 石油勘探与开发, 44(02): 235-242.
- 苗培森, 李建国, 汤超, 金若时, 程银行, 赵龙, 肖鹏, 魏佳林. 2017. 中国北方中新生代盆地深部砂岩铀矿成矿条件与找矿方向[J]. 地质通报, 36(10): 1830-1840.
- 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.
- 宁君, 夏菲, 聂逢君, 佟术敏, 宋海瑞, 封志兵, 聂涛, 李强. 2018. 浅析松辽盆地南部姚下段灰色砂体与铀成矿关系[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 41(04): 336-342.
- 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(01): 153-166.
- 宋鹰. 2010. 松辽盆地裂后期构造反转及其动力学背景分析[D]. 中国地质大学.
- 汤超, 金若时, 谷社峰, 李建国, 钟延秋, 苗培森, 司马献章, 魏佳林. 2018. 松辽盆地北部四方台组工业铀矿体的发现及其意义[J]. 地质调查与研究, 41(01): 1-8.
- 唐湘飞, 王果, 张占峰, 李炎龙, 吴声明, 李承龙. 2018. 准噶尔盆地卡姆斯特地区侏罗系铀成矿模式研究[J]. 地质论评, 64(03): 647-657.
- 王成善, 冯志强, 王璞珺. 2016. 白垩纪松辽盆地松科1井大陆科学钻探工程[M]. 北京: 科学出版社.
- 王军, 耿树方. 2009. 伊犁盆地库捷尔太铀矿床层间氧化带与铀矿化特征研究[J]. 中国地质, 36(03): 705-713.
- 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.
- 邢作昌, 秦明宽, 李研, 郭强, 张杨, 贾立城, 肖菁. 2021. 松辽盆地东北缘晚白垩世地层结构、沉积充填及铀矿找矿方向[J]. 中国地质, 48(4): 1225-1238.
- 邢作昌, 秦明宽, 张杨, 郭强, 李研, 贾立城, 肖菁. 2021. 松辽盆地东北部铁力地区姚家组沉积相与铀矿找矿前景[J]. 铀矿地质, 37(4): 573-583.
- 闫建萍, 刘池洋, 郭桂红. 2008. 松辽盆地扶杨油层油气成藏期次和时限确定[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 44(05): 26-29.
- 张金带. 2016. 我国砂岩型铀矿成矿理论的创新和发展[J]. 铀矿地质, 32(06): 321-332.
- 张龙, 吴柏林, 刘池洋, 雷开宇, 侯惠群, 孙莉, 寸小妮, 王建强. 2016. 鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿直罗组物源分析及其铀成矿意义[J]. 地质学报, 90(12): 3441-3453.
- 张森, 石蕾, 鞠楠, 苏建伟. 2018. “油铀兼探”的找矿思路在松辽盆地的应用——以中央拗陷区南部为例[J]. 地质与资源, 27(03): 257-262.
- 张万良. 2018. 烃源岩=铀源岩:砂岩铀矿成矿物质来源新思考[J]. 矿产与地质, 32(01): 1-7.
- 张字龙, 韩效忠, 姚春玲. 2006. 砂岩型铀矿床铀源条件评价方法探讨[J]. 世界核地质科学, 23(02): 67-72.
- 赵文智, 李建忠. 2004. 基底断裂对松辽南部油气聚集的控制作用[J]. 石油学报, 25(04): 1-6.
- 赵忠华, 白景萍, 赖天功. 2018. 松辽盆地北部反转构造与砂岩型铀矿成矿作用[J]. 铀矿地质, 34(05): 274-279.

