

# 内蒙古二连盆地西部白彦花地区砂岩型铀矿地质特征及成矿作用浅析

李彤<sup>1,2</sup>, 俞初安<sup>1,3\*</sup>, 荣辉<sup>4</sup>, 杨桐旭<sup>1,4</sup>, 司庆红<sup>1</sup>, 朱强<sup>1</sup>, 彭胜龙<sup>1,5</sup>, 唐永香<sup>6</sup>, 全孝勤<sup>7</sup>

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 中钢集团天津地质研究院有限公司, 天津 3001813; 3. 中国地质科学院, 北京 100037; 4. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074; 5. 内蒙古自治区煤田地质局, 内蒙古 呼和浩特 010000; 6. 天津地热勘查开发设计院, 天津 300250; 7. 中国冶金地质总局西北地质勘查院, 陕西 西安 710061)

**提要:**【研究目的】近年来, 北方砂岩型铀矿勘探进展迅速, 白彦花铀矿为二连盆地川井坳陷新发现的中型规模砂岩型铀矿产地。通过对白彦花地区砂岩型铀矿系统研究, 以期为二连盆地川井坳陷的砂岩型铀矿找矿预测和成矿规律研究提供一定价值的参考。【研究方法】本文在钻孔资料编录、编图研究、系统取样、镜下分析、地化数据整理等基础上, 笔者阐述了矿区成矿地质条件、矿体分布、矿石特征以及川井坳陷的构造、沉积充填、流体作用等, 讨论本区砂岩型铀矿成矿模式。【研究结果】研究区主要含矿层位为下白垩统赛汉组上段, 矿体产状呈西高东低展布, 且相对平缓, 区域内铀矿化富集程度与隆起带边缘的低洼区域有着紧密的空间关系。铀矿物以铀石为主, 主要赋存在灰色、深灰黑色砂砾岩中。区域内, 主要发育辫状河-三角洲体系, 砂体分布广泛, 连通性较好, 河道中心发育氧化还原带, 成矿流体及还原性气体运移、铀源物质运移等为区域成矿提供有利条件。【结论】白彦花地区铀矿的成矿模式为下白垩统赛汉塔拉组上段沉积间断末期, 来自白彦花隆起的富铀流体发生了潜水渗入作用形成了铀矿体, 二连组沉积后白彦花凸起被沉积物所覆盖, 适时发生了层间氧化成矿作用。

**关键词:** 砂岩型铀矿; 层间氧化成矿作用; 二次开发; 白彦花; 赛汉组; 川井坳陷; 铀矿勘查工程; 二连盆地; 内蒙古

**创新点:** 本文从区域内地质构造、矿体、矿石、岩相、铀源等特征进行分析, 阐述了二连盆地西部白彦花地区下白垩统赛汉组铀矿找矿发现。总结该区域内砂岩型铀矿成矿模型以及成矿条件, 对研究盆地砂岩型铀矿成矿规律以及下一步铀矿勘查工作具有重要意义。

## Geological characteristics and mineralization of sandstone type uranium deposit in Baiyanhua area, Western Erlian Basin

LI Tong<sup>1,2</sup>, YU Rengan<sup>1,3</sup>, RONG Hui<sup>4</sup>, YANG Tongxu<sup>1,4</sup>, SI Qinghong<sup>1</sup>, ZHU Qiang<sup>1</sup>, PENG Shenglong<sup>1,5</sup>, TANG Yongxiang<sup>6</sup>, QUAN Xiaoqin<sup>7</sup>

(1. Tianjin Geological Survey Center of China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 2. Steel Group Tianjin Geological Research Institute Co., Ltd., Tianjin 3001813, China; 3. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. China University of Geosciences, Hubei 430074, Wuhan, China; 5. Coal Geological Bureau of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010000, Inner Mongolia, China; 6. Tianjin Geothermal Exploration and Development Design Institute, Tianjin 300250, China; 7. Northwest Geological Exploration Institute of China Metallurgical Geology Administration, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

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

**[Objective]** In recent years, the exploration of sandstone uranium ore in the north has progressed

**基金项目:** 中国地质调查局地质调查项目“鄂尔多斯、柴达木等盆地砂岩型铀矿调查”(DD20190119-09)和“内蒙古中西部重点铀矿勘查区块优选调查评价”项目(DD20221678-5)

**作者简介:** 李彤, 男, 1997年生, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿相学专业, 从事铀矿勘查和地球化学研究, E-mail:790491299@qq.com。

**通讯作者:** 俞初安, 男, 1980年生, 教授级高工, 硕士生导师, 矿产勘查专业, 从事铀矿勘查和地球化学研究; E-mail:121181748@qq.com。

rapidly, and Baiyanhua uranium ore is a newly discovered medium-sized sandstone uranium ore source in the Chuanjing Depression of the Erlian Basin. The systematic study of sandstone uranium ore in Baiyanhua area is intended to provide some valuable references for the prediction of sandstone uranium ore search and the study of mineralization pattern in Chuanjing Depression of Erlian Basin. **[Methods]** Based on drilling data compilation, map compilation study, systematic sampling, microscopic analysis, and geochemical data compilation, the author elaborates the geological conditions of ore formation, ore body distribution, ore characteristics, and the tectonics, sedimentary filling, and fluid action of Chuanjing Depression in the mining area, and discusses the sandstone type uranium ore formation pattern in this area. **[Results]** The main ore-bearing level in the study area is the upper section of the Lower Cretaceous Saihan Formation, and the ore bodies are relatively gently spreading in the east and high west. The uranium minerals are mainly uraninite, mainly in gray and dark gray-black sand conglomerates. In the region, the braided river-delta system is mainly developed, the sand bodies are widely distributed and well connected, and the redox zone is developed in the center of the river, which provides favorable conditions for regional mineralization by mineralizing fluids and reducing gas transport and uranium source material transport. **[Conclusion]** The mineralization pattern of uranium ore in Baiyanhua area is that the uranium-rich fluids from the Baiyanhua Bulge occurred at the end of sedimentary interruption in the upper part of the Lower Cretaceous Saihantala Formation, and the uranium ore bodies were formed by diving and infiltration of uranium-rich fluids from the Baiyanhua Bulge, and the Baiyanhua Bulge was covered by sediments after the deposition of the Erlian Formation, and interstratified oxidation mineralization occurred in due course.

**Key words:** sandstone uranium; interstratified oxidation mineralization; secondary development; Baiyanhua; Saihan Formation; Chuanjing depression; uranium exploration engineering; Eliana Basin; Inner Mongolia

**Highlights:** This paper analyzes the geological structure, ore body, ore, lithofacies and uranium source in the region, expounds the uranium prospecting discovery of the Lower Cretaceous Saihan Formation in the Baiyanhua area in the western part of the Erlian Basin. Summarizes the sandstone-type uranium mineralization model and mineralization conditions in the area, which is of great significance for studying the mineralization law of sandstone-type uranium ore in the basin and the next step of uranium exploration.

**About the first author:** LI Tong, male, born in 1997, master 's degree in mineralogy, petrology, mineralography, engaged in uranium exploration and geochemical research, E-mail : 790491299 @ qq.com.

**About the corresponding author:** YU reng'an, male, born in 1980, professor-level senior engineer, master 's supervisor, mineral exploration major, engaged in uranium exploration and geochemical research ; e-mail : 121181748 @ qq.com.

**Fund support:** Supported by the projects of China Geological Survey 'Sandstone-type uranium deposits in Ordos, Qaidam and other basins ' ( DD20190119-09 ) and the project of ' Optimization survey and evaluation of key uranium exploration blocks in central and western Inner Mongolia ' ( DD20221678-5 ).

## 1 引言

铀资源是我国重要的关键矿产。二连盆地作为我国北部重要的石油、天然气、煤炭、

铀等多能源矿产资源产地。上世纪末和本世纪初，二连盆地中部发现了赛汉高毕、哈达图、巴彦乌拉、努和廷、恩格日音和陆海等不同类型的铀矿（李保侠等，2002；刘波，2016；苗全芸等，2016；李伟涛等，2020；俞初安等，2020；饶耕玮等，2021；李子颖等，2022）。诸多学者在盆地内开展基础地质和成矿规律研究等工作，显著提升了二连盆地的科学示范引领作用（乔鹏等,2015；焦养泉等，2015；吴兆剑等，2016；B. F , Windley et al. ,2001；Dou L et al. ,2003；Ding Xiujian et al. ,2019）。在成矿规律研究方面，主要是针对马尼特坳陷和乌兰察布坳陷的典型砂岩型铀矿床和泥岩型铀矿床开展了相关研究，在盆地铀矿床类型以及成矿地质特征（李月湘等，2009；刘武生等，2013、2015、2017；俞初安等，2020；杨彪等，2021），成矿过程以及成矿规律（刘波，2016；于雅岑，2019；鲁超，2019；彭云彪等，2019；李伟涛等，2020），以及盆地成矿层间氧化带以及流体动力学（苗鹏翼等，2021；秦彦伟等，2021）等方面取得了较多地理论认识，为本文提供了一定的重要研究基础和思路。

川井坳陷作为二连盆地西缘的一个次级构造单元。20世纪90年代以来，学者在川井坳陷开展了铀矿勘查评价工作（李保侠等，2002；胡晓宇等，2019），在达格图以及桑根达来凹陷取得了一定的勘探成果（费琪等，1996；彭云彪等，2018）。尤其是针对构造演化、铀源、沉积相条件以及桑根达来凹陷、白音查干凹陷等地区的成矿前景等开展了大量工作，例如，川井坳陷内古河道砂岩型铀矿成矿有利区与缓倾斜破带的密切联系等（李保侠等，2002），川井坳陷基底构造演化、盖层含矿建造后生改造作用过程的研究（刘武生等，2015），川井坳陷差异性沉降和整体隆升等构造活动的作用（吕永华等，2019）；由于川井坳陷受制于有限的砂岩型铀矿找矿成果，能源矿产方面的研究主要集中在白音查干凹陷和桑根达来凹陷油气和煤炭方面（谈玉明等，2003；谢利华等，2008；邓已寻等，2013），因此，对典型铀矿床的成矿规律相对偏少，尤其对川井坳陷的砂岩型铀矿地质特征、铀成矿过程和成矿机理等方面的研究程度远不如二连盆地中部的铀矿床。

白彦花铀矿为近几年中国地质调查局天津地质调查中心利用煤田资料“二次”开发思路和综合找铀技术方法取得找矿新进展的矿区。本文通过描述研究区成矿地质特征、矿体和矿石特征，结合地质构造、沉积演化以及流体特征对其成矿机理以及成矿模式进行探讨，以期对二连盆地川井坳陷的砂岩型铀矿找矿预测和成矿规律研究提供参考。

## 2 区域地质背景

二连盆地除南、北部断陷带和中央隆起带外，盆内还划分了“五坳一隆”六大构造单元，包括北部川井坳陷、马尼特坳陷、乌兰察布坳陷，南部乌尼特坳陷和腾格尔坳陷，中部苏尼特隆起（图 1a）。川井坳陷位于二连盆地的最西端，呈近东西向展布，前人对盆地构造演化以及沉积体系开展了系统研究，将地质演化分为四个阶段，即挤压隆起-构造转换-盆地发展消亡-走滑挤压隆升阶段（赵澄林等，1996；赵兴齐等，2019；林效宾等，2021）。川井坳陷处于华北地台与内蒙中段地槽褶皱带的交界处，坳陷东接乌兰察布坳陷，西临狼山-

宝音图隆起，南缘至阴山凸起，北缘达索伦山隆起，基底内部以周边控盆断裂为特征，总体形成了西拉木伦—索仑山—扎嘎乌苏大断裂、白云鄂博—川井—巴音前达门大断裂以及白音查干断裂（图 1b），其中巴音达门-川井-白云鄂博断裂带作为槽台分界线。盆地基底地层主要由元古代和古生代的变质岩和火山碎屑岩组成(图 2)。基底断裂带经过多期次运动叠加后，在伸展盆地中处于构造薄弱地带，控制了盆地拗陷的形成与发育。由此，川井拗陷了形成两种不同地层分布格局，即中、北部地层属于二连盆地地层分区，南部地层属于阴山地层分区（饶耕玮等，2021）。

川井拗陷呈现南高北低的地势特征，地形起伏较小，南缘构成山前倾斜平原，北缘主要是由古生代的基岩所组成的低山丘陵（彭云彪等，2018）。盆地盖层主要包括白垩系、古近系、新近系和第四系。其中，下白垩统地层包括阿尔善组（ $K_{1a}$ ）、腾格尔组（ $K_{1t}$ ）和赛汉组（ $K_{1s}$ ），分布在各凹陷中，而拗陷中部的隐伏凸起则缺失该层位；上白垩统地层为二连组，与下覆赛汉组呈不整合接触关系。赛汉组为主要含铀目的层，可分为赛汉组上段和赛汉组下段，以冲积扇-辫状河及三角洲-湖沼沉积为主，含矿部位主要赋存在赛汉组上段沉积相广泛发育的砂体中（彭云彪等，2018、2019）。

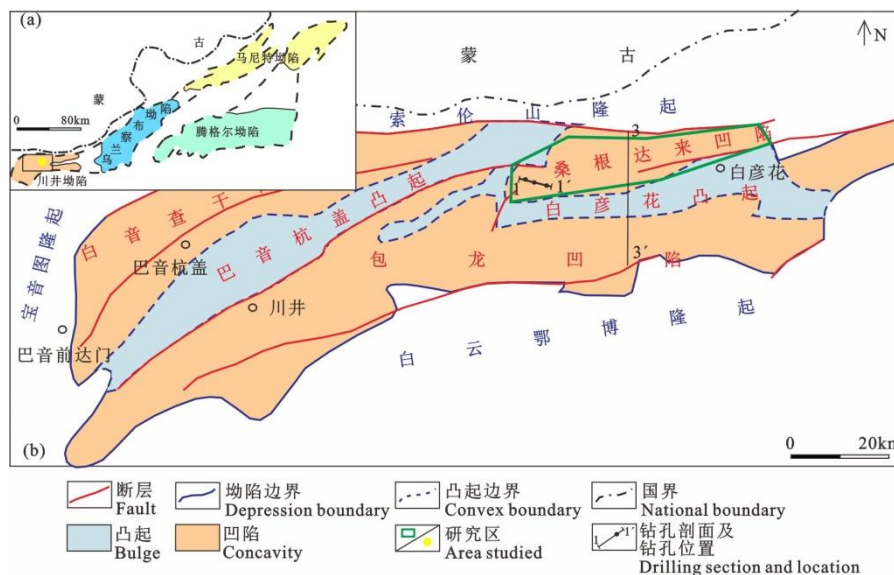


图 1 二连盆地构造分区 (a) 和川井拗陷构造分区图 (b)（据刘武生等，2015 修改）

Fig.1 Structural zoning of the Erlian Basin (a) and structural zoning of the Chuanjing Depression (b) (modified after Liu et al.,2015)

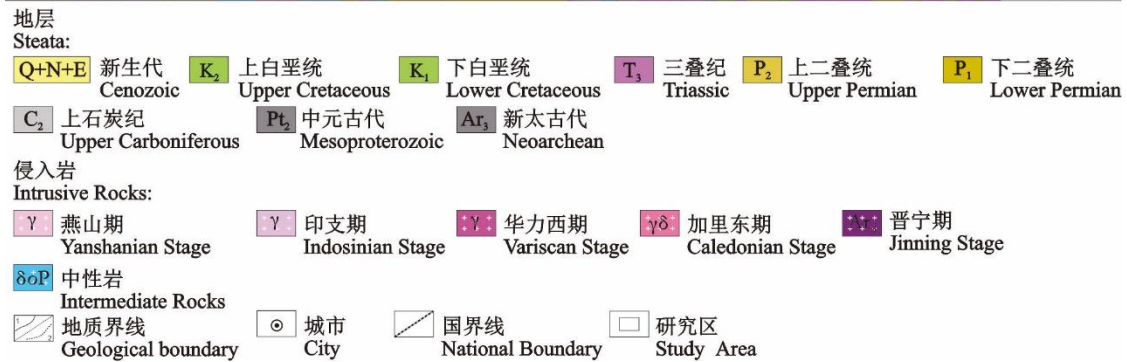
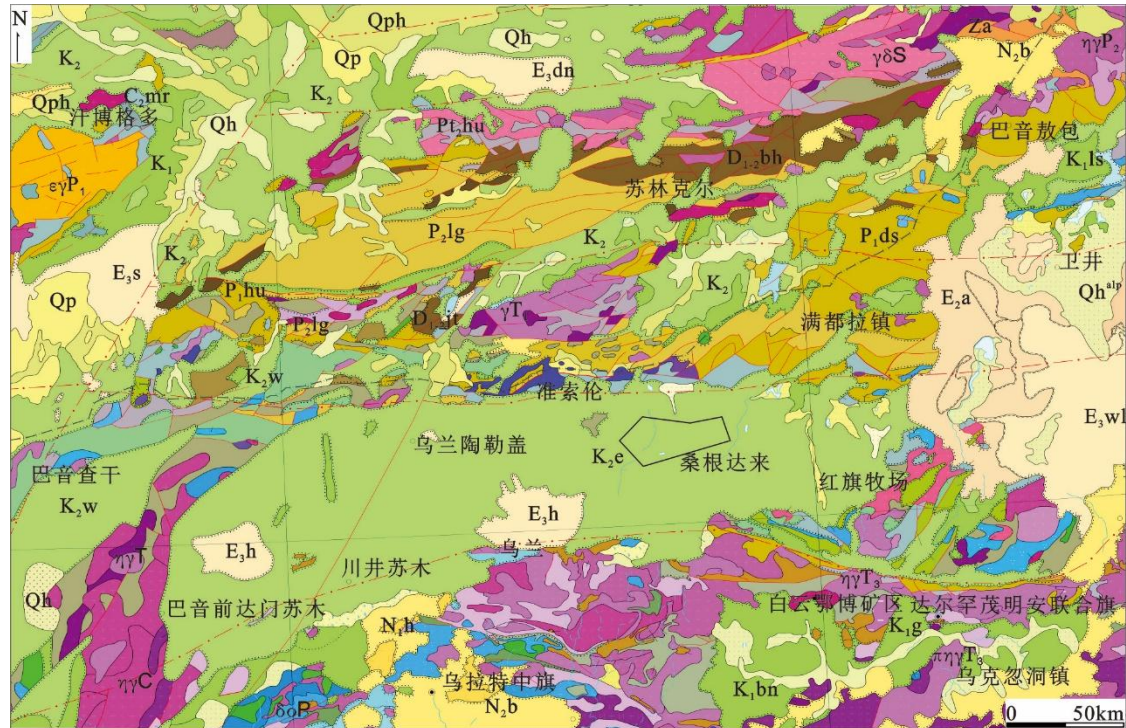


图 2 川井坳陷及周边地区地质图 (据李俊建等, 2020 修改)

Fig.2 Geological map of Chuanjing Depression and its surrounding areas ( revised according to Li et al., 2020 )

### 3 铀成矿地质特征

#### 3.1 地层结构特征

研究区下白垩统赛汉组地层是一套富含有机质、黄铁矿等还原介质的含煤岩系 (聂逢君等, 2015), 赛汉组上段是一套以灰色碎屑岩及泥质岩系为主的沉积地层, 以黄色、杂色层和二连组的红层划分, 经历了多期次沉积构造, 形成了分布较为广泛且稳定的砂体, 其上覆盖层以上白垩统红色泥岩为主; 赛汉组下段以灰色粉砂岩、炭质泥岩、绿灰色泥岩、砂砾岩以及褐煤为主, 下层以一套角度不整合的深灰色页岩作为与腾格尔组的分界面。结合前人钻井数据的分析, 研究区内的赛汉组沉积体系主要为扇三角洲、辫状河三角洲和滨浅湖相, 其中辫状河三角洲砂体发育程度较高, 砂体富含有机质、黄铁矿等还原介质, 是

砂岩型铀矿赋矿的有利层位（图3）。

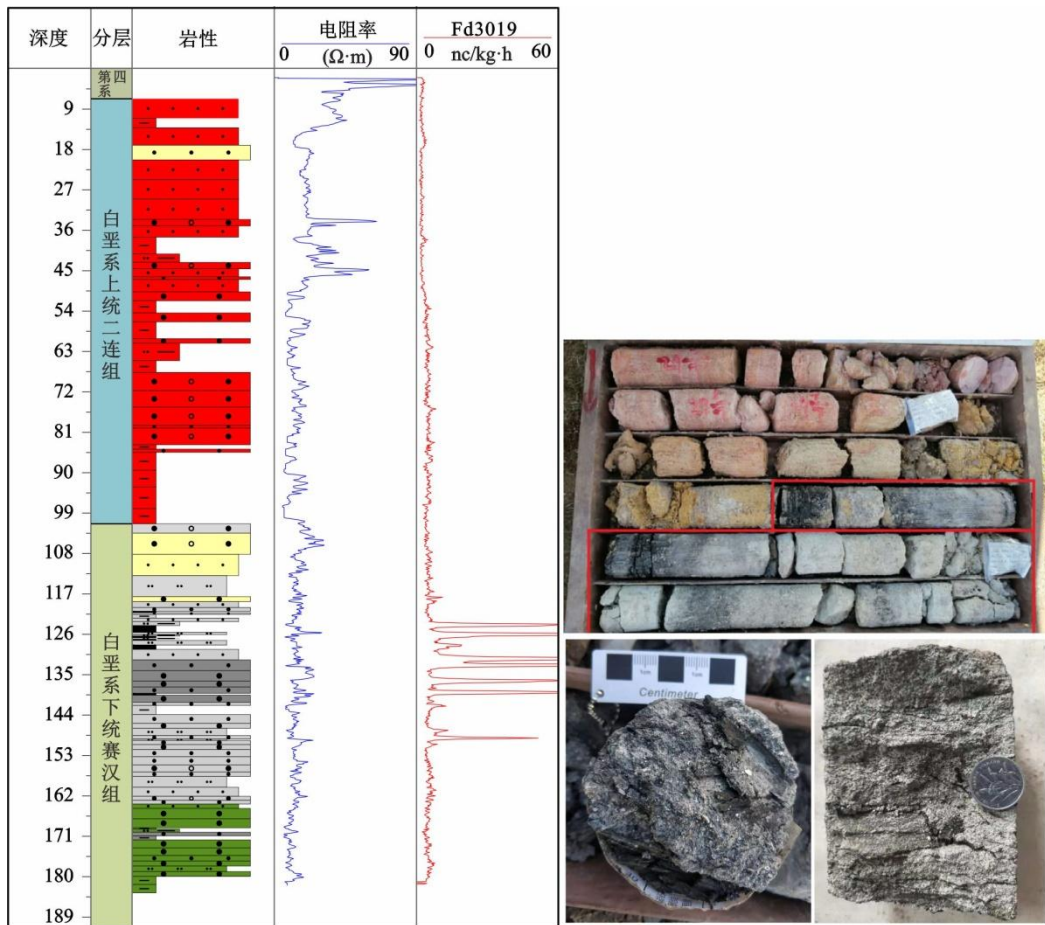


图3 白彦花矿区含矿地层综合柱状图及矿心

Fig. 3 Comprehensive columnar diagram and ore core of the ore-bearing strata in the Baiyanhua Mining Area

### 3.2 目的层砂体特征

沉积砂体的空间展布分析能显示内部地层分布关系，研究区的赛汉组地层沉积体系是以冲积扇-辫状河-湖相为主，沿古河道纵向上矿化发育的地段为砂质辫状河和曲流河形成的砂体。图4显示西南部桑根达来地区砂体展布相对均匀，整体厚度在25-75m之间，为辫状河-三角洲平原沉积物。西南向砂体高于东北向，中部砂体多为泥岩组成，具湖泊相沉积特征。研究区赛汉组上段位于西南向辫状主河道砂体发育区，具有较宽、较深、动能较强的特点，形成规模大，渗透性能良好的砂体，易于形成优质储层。地层沉积砂岩、砂砾岩夹炭质泥岩和粉砂岩，砂体厚35m~50m，呈蛇曲状分布，厚度逐渐减薄，直至尖灭。含矿地段地层岩性、岩相稳定，砂体厚度变化相对较小。富铀矿层主要位于粒度偏细的深灰色、灰黑色中-细粒砂岩或者含泥砂质砾岩中。

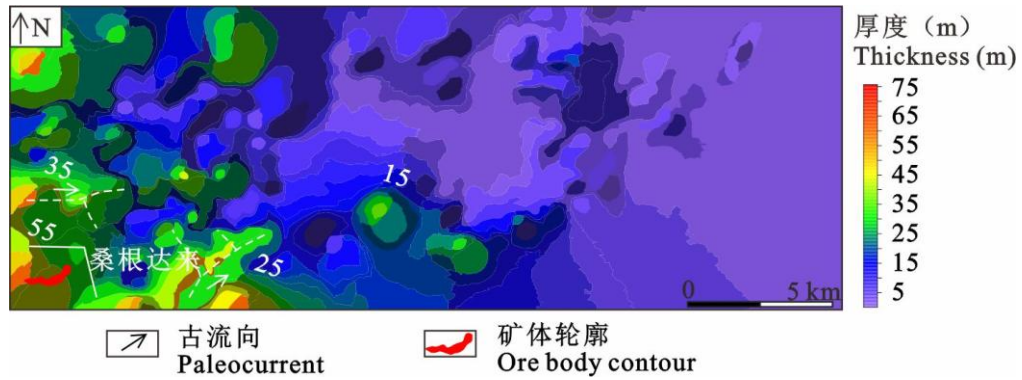


图 4 坳陷东部白彦花地区赛汉组砂体厚度等值线图

Fig.4 sand body thickness contour map of Saihan formation in Baiyanhua area in the eastern depression

### 3.3 矿体和矿石矿物特征

平面上铀矿体呈近北西向展布，产状西高东低，相对平缓倾角  $1^{\circ}$  左右，与区内地层展布方向基本一致。矿体埋深 123-190m，平均品位为 0.0458%；厚度 2.6-5.2m，垂向上主要发育 1 层矿体，局部为两层，矿体主要分布于赛汉组上段的上部灰色砂岩中。铀矿体主要富集于凸起带边缘的相对低洼处，二者空间分布关系非常密切。

砂岩由碎屑物和少量杂基组成（图 5a、b、c），碎屑物成分为石英、长石和岩屑，可见少量的云母及重矿物，杂基主要为粘土矿物。碎屑物中石英含量 70%~90%，大部分具波状消光，无液体和气体包裹体；长石含量 5%~30%，一般 15%~20%，以微斜长石为主，具格子状双晶，斜长石次之，条纹长石少见；岩屑主要由片岩岩屑、花岗岩屑、云英岩岩屑组成；云母以黑云母为主。砂岩分选中等，为次棱角一次圆状。砂体松散无胶结或泥质微胶结，胶结类型以接触式胶结为主，次为孔隙式胶结，基底式胶结少见。岩石中普遍含黑色炭屑、煤屑等有机质及黄铁矿等。

据电子探针下铀矿物分布特征图显示（图 5d），铀矿物以铀石为主，主要赋存在矿化砂岩中填隙部位以及矿物解理部位，交代黄铁矿、炭屑等。样品中黄铁矿多呈胶状结构，其余分散的铀石及部分沥青铀矿呈不规则粒状、星点状赋存于砂岩填隙物中的粘土矿物或黄铁矿边缘、裂隙部位。

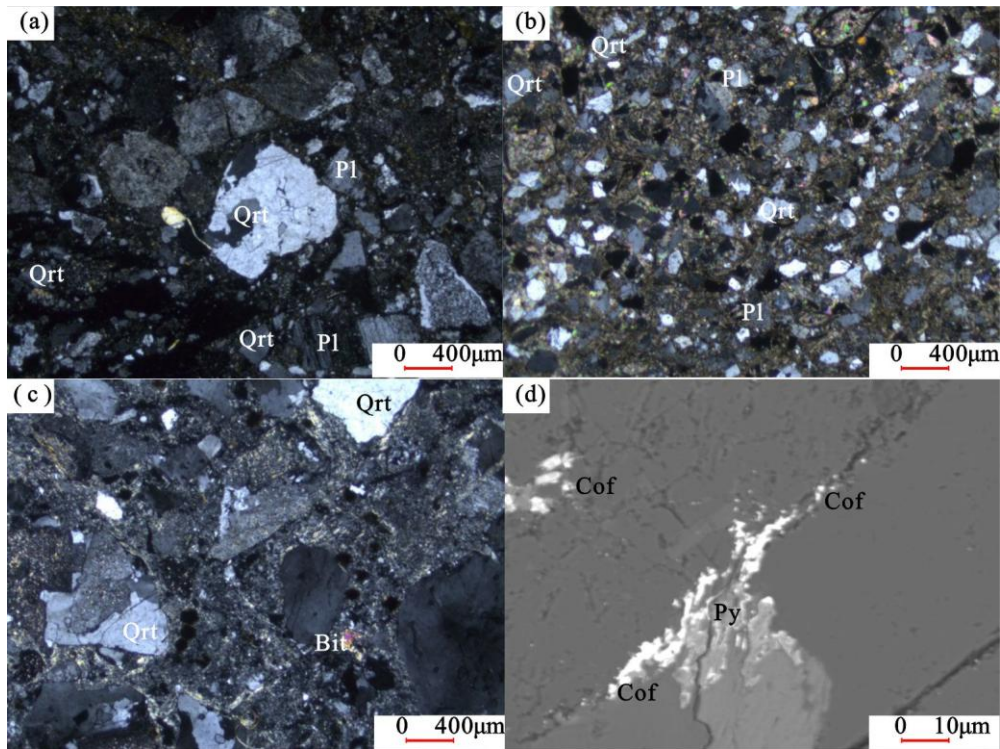


图 5 白彦花地区白垩系下统样品岩石学特征

Qrt. 石英; Pl. 斜长石; Bit. 黑云母; Cof. 铀石; Py. 黄铁矿

Fig. 5 Petrological Characteristics of the Lower Cretaceous Samples in Baiyanhua Area

Qrt. quartz; Pl. plagioclase; Bit. black mica; Cof. uraninite; Py. pyrite

## 4 成矿作用浅析

### 4.1 构造与铀成矿

盆内的铀成矿都是在一定的构造类型和构造演化过程中形成的（于文斌等，2008；荣辉等，2016；焦养泉等，2021）。川井坳陷在断陷盆地形成阶段，同时也是赛汉组沉积时期。坳陷内沉积作用的充填以及后期改造作用受到构造样式的控制。桑根达来凹陷赛汉组上段顶板标高图（图 6）显示，部分区域等值线较为密集，显示该地高差变化剧烈。赛汉组上段顶板标高在桑根达来凹陷内呈现出明显的南低北高的倾向，反映赛汉组上段在桑根达来凹陷内有一个大致向南倾斜的构造形态。该层位的埋藏深度和构造形态，对砂岩型铀成矿有重要的控制作用。图中局部隆起区以及局部凹陷区整体呈近东西方向相间分布，赛汉组上段顶板标高的变化范围在 840~1140m，中部分布一个明显的坳陷区。白彦花铀矿体分布于桑根达来凹陷的西南角斜坡带中，顶板标高的变化范围为 960~1080m。桑根达来凹陷内基底以及盖层的沉降受到先存基底断裂的控制。桑根达来凹陷的北部盖层中 EW 向断裂广泛发育，由于索伦山隆起的地质作用，影响了桑根达来整体构造格局，其北部隆升速率相较于南部更快，北部赛汉组地层逐渐抬升出露于地表之上受到剥蚀，南部隆升缓慢，赛汉组地层顶板埋深超过了 300m。



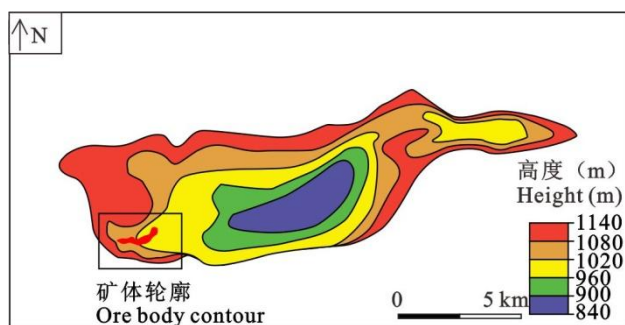


图 6 川井坳陷桑根达来凹陷赛汉组上段顶板标高

Fig. 6 Roof elevation of upper Saihan formation in the Sanggandalai sag, Chuanjing depression

川井坳陷的中部分布白彦花凸起带，结合地震剖面可以清晰的看出凸起带的北侧整体为单斜构造，局部发育微复式向斜构造。图 7 显示了区域内白垩系地层地震相，可将其大致分为中振幅中高连续性楔状充填、中振幅中连续性楔状充填区域、过渡杂乱充填和中强振幅中高连续性席状充填四种类型。道号 2987-4027 区域为中振幅中高连续性楔状充填区域。该区域内特征表现为中振幅、中高连续性，同轴具有平行状纹理但整体呈现楔状结构的特点。4027-5187 为中振幅中连续性楔状充填区域。该类型的长轴展布多为北西-南东向，从盆地边缘到盆地内部区域，一般具有较大的扩展、延伸空间。5187-6387 为中振幅中连续性的楔状充填向中强振幅中高连续性席状充填的过渡杂乱充填区域。该类型同相轴体现为不平整的起伏状，连续性差，此类型一般延伸不远，多出现与冲积扇以及构造变动强烈变形的区域。6387-7787 区域为中强振幅中高连续性席状充填区域。其特征是同相轴相互平行、或有不同程度波动的席状充填为特点，横向上沉积速率大体相等，垂向上均匀加积产物。它的分布范围为较大陆棚、深湖浅湖、深海盆地、沼泽相、凹陷湖盆中心区域等均有发育，与强振幅、高连续的席状充填相比，表现相对稳定条件下的沉积作用。

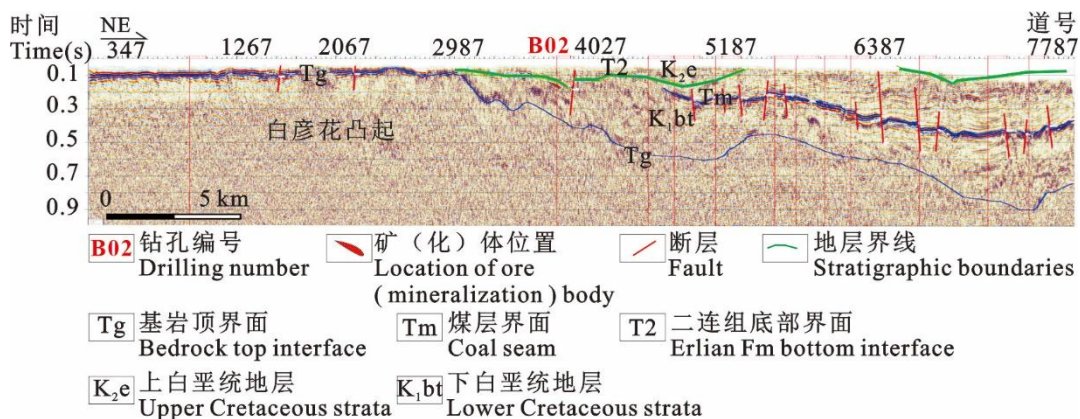


图 7 白彦花地区 2-2'地震剖面

Fig.7 2-2' seismic profile in Baiyanhua area

川井坳陷岩性岩相剖面图（图 8）显示桑根达来地区赛汉组两侧发育较多洪积物，即红色含巨砾泥-砂-细砾岩石。反映了两条东西向展布的缓倾斜坡带，水动力条件由急变缓，地球化学条件发生改变的区域，从而也成为铀元素能够贯入沉积地层中的通道。中心地区

广布冲-湖积物以及褐煤层，包括红色泥岩、粉砂岩及微细砂岩夹层。体现了较低能的水动力条件，这个区域影响了后期成矿过程中层间氧化现象。结合地震剖面解译，显示整个地层区域在基底的基础上广泛接受中生代白垩系地层的沉积，其形成早期地层逐渐填平补齐，在上部形成了含煤岩层和白垩系上统盖层。白彦花凸起和桑根达来凹陷苏海布龙地区，沉积物大量供给，原有盆地被改造逐渐形成古河谷地貌，由此发育冲积扇-辫状河沉积体系。在盆地拗陷时期形成斜坡带、冲积扇-辫状河-三角洲相沉积，地层内“泥-砂-泥”体系为盆地内铀成矿提供了良好的储存空间。

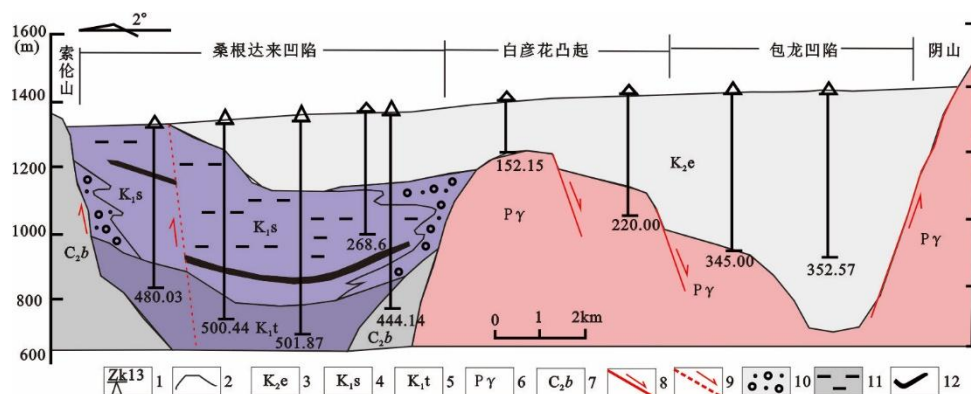


图 8 川井拗陷岩性岩相剖面图（据李保侠等，2002 改）

1-钻孔位置;2-地质界线;3-上白垩统二连组;4-下白垩统赛汉组;5-下白垩统腾格尔组;6-二叠纪花岗岩;7-正断层;8-推断断层;9-断层;10-洪积物;11-冲、湖积物;12-褐煤层

Fig.8 Lithology and lithofacies profile of Chuanjing depression (modified according to libaoxia et al., 2002)

1-drillinglocation;2-geologicalboundary;3-UpperCretaceousErlianFormation;4-LowerCretaceousSaihanFormation;5-lowerCretaceousTenggerFormation;6-Permiangranite;7-normalfault;8-Inferredfault;9-Fault;10-diluvialdeposits;11-alluvialandlacustrinedeposits;12-Lignitelayer

白彦花地区构造属于单断箕状复合型的铀成矿样式，铀成矿矿体主要分布在盆地内部隆起构造两侧的下白垩统地层中，与构造作用形成的断裂、褶皱、不整合等控制因素密切相关。下白垩统赛汉组沉积期间地质构造活动相对较弱，有利于研究区铀矿的形成发育（李先平等，2015，权建平等，2007）。晚白垩世，在桑根达来拗陷的南北两侧，由于北西向断裂的控制，于拗陷北部形成了一个规模较大的弧形隆起。由于沉积盖层厚度高差增大，南侧边缘发育冲洪积相、湖相砂体。而北侧边缘以河流相为主，发育有少量湖相地层。由于多期构造活动的影响，形成了一系列东西向断裂。这些断裂又控制着研究区地层的发育和分布，对铀矿化具有重要作用。铀成矿层位因盆地内隆起构造，形成了不同程度的倾斜、抬升或下降，总体表现为南北两侧受东西沉积断裂，在凸起两侧发育稳定斜坡带。后期经过隆升形成剥蚀窗口，形成南、北斜坡夹中部拗陷的构造特征，广泛发育缓倾斜破带以及辫状河-三角洲体系。铀成矿作用得以在铀储层中进行，进而决定了研究区古河道砂体的分

布和赋存特征。同时，内部隆起构造提供了铀源和流体来源，促进了铀元素的迁移和富集。特别是在内部隆起构造两侧形成了氧化还原过渡带，为铀元素的还原沉淀提供了有利条件。总之，白彦花地区铀成矿作用中沉积盖层起着重要作用，但构造运动也是控制白彦花地区铀成矿作用不可忽视的因素。

## 4.2 储层非均质性和流体作用对成矿的制约

### 4.2.1 储层非均质性

砂岩型铀成矿作用受到储层非均质性和沉积环境的制约（夏毓亮等，2003；荣辉等，2016；刘武生等，2017；焦养泉等，2018；）。赛汉组上部含水层相对稳定，以辫状河三角洲相砂体最为发育，氧化作用顺着河道中心方向延展，垂直及横向上都具有一定的分带性，铀富集地段往往呈现灰黑色，泥质、炭质较为发育，矿段富含黄铁矿、有机质等还原介质。前人于其他盆地开展了铀储层非均质地质建模研究（焦养泉等，2018），结合本文在取回的研究区铀储层砂岩样品中，显示炭质碎屑（图 9a）在多个取样矿段中广泛分布，个别直径达 70~90cm，镜下观察该类砂岩的磨圆度良好呈次棱角一次圆状，反映明显的搬运特征。样品中铀储层内部的炭质碎屑大多数来源于同期发育的泥炭沼泽，经河道水流中-短距离搬运、以滞留沉积物形式堆积。黄铁矿作为煤层向铀储层砂体运移含烃流体的痕迹以及标志，反映了煤层在铀成矿演化中排烃作用使铀储层砂体形成强还原环境的过程。在研究区多个钻孔的采样标本中，同样大范围发现岩心中均含有不同程度、结核大小直径不一的黄铁矿化现象（图 9b）。与工业煤层相关的铀储层中，黄铁矿结核直径和分布密度均与下伏煤层的距离呈现负相关关系。据桑根达来凹陷煤层厚度等值线图（图 10）显示，煤层厚度为 0.25-37.4m，平均 12.43m，煤层厚度具有自盆地内从边缘向中心逐渐增加，向西南部或研究区逐渐减薄，直至尖灭的特征。通过宏微观现象观察，以煤为代表的有机质与铀储层内矿物的形成有密切关系，而研究区铀矿物主要的有机质类型是炭化程度低、处于未成熟或褐煤阶段的炭屑、煤线和细分散状的有机质。多项实证进一步反映了研究区储层非均质性对于成矿的影响。

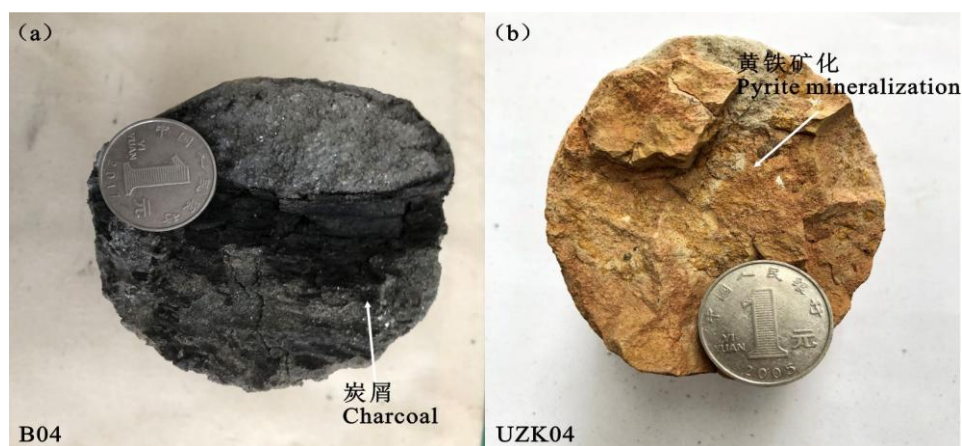


图 9 (a) 钻孔含矿目的层炭屑砂岩岩石照片 (b) 钻孔含矿目的层黄铁矿化岩石照片

Fig. 9 (a) Borehole ore-bearing target layer carbon sandstone rock photos (b) Borehole ore-bearing target layer pyritization rock photos

同时，还原介质是砂岩型铀成矿必不可少的条件，地层的生烃能力是在一定温度和压力条件下，能够生成和排放烃类的能力。生烃能力受到有机质类型、有机质丰度、成熟度、埋藏深度等因素的影响，可以作为衡量沉积盆地油气藏勘探潜力的指标之一（孙求实等，2022，张文浩等，2021；王艳清等，2016）。本文对研究区 59 件矿化段灰色砂岩样品进行数据统计，取砂岩中各元素的几何平均数，得到如下结果（表 1）。根据英国石油公司分类方案，将烃源岩有机相划分为五类，研究区样品 TOC 质量分数 1%-2%，初步判断属于 III 型或 IV 型，即代表倾气型烃源岩，发育在陆源有机质丰富的环境。一般来说，I 型和 II 型干酪根具有较高的生烃潜力，而 III 型和 IV 型干酪根具有较低的生烃潜力，暗示地层具备一定生烃能力，但不如 I 型和 II 型干酪根的生烃能力强。综上，研究区铀储层有机质充足，反映了一定的生烃特征。通过岩心及镜下鉴定证明，该区域内铀储层的非均质性很大程度上影响了铀沉淀的还原介质富集。同时，含矿矿石中  $S_{全}$  和  $S^2$  均远高于不含矿岩石，明显较高的  $CO_2$  含量也指示深部烃类气体的离散可能一同参与了铀沉淀的过程，总体显示了研究区铀储层具备较好成矿条件。

表 1 研究区砂岩环境指标特征值分析结果表

Table 1 analysis results of characteristic values of sandstone environmental indicators in the study area

岩性	$\omega(U)/10^{-6}$	$\omega(FeO)/10^{-2}$	$\omega(Fe_2O_3)/10^{-2}$	$\omega(C有)/10^{-2}$	$\omega(S^2)/10^{-2}$	$\omega(S_{全})/10^{-2}$	$\omega(\Delta Eh)mv$	样品数
灰色砂岩	39.27	0.62	0.94	1.02	18.18	0.06	61.20	59 个

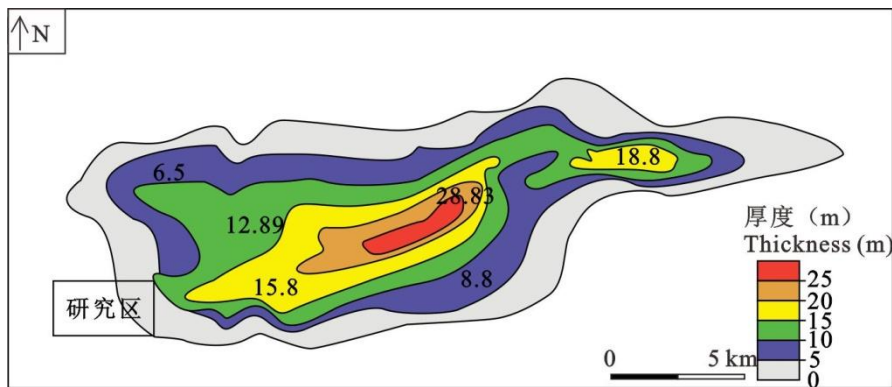


图 10 桑根达来凹陷煤层厚度等值线图

Fig.10 Coal seam thickness contour map of Sanggendalai sag

#### 4.2.2 流体作用

对于河流相等沉积体系来说，需要对区域内流体系统进行阐述。地下流体的主体为地下水，其水文特征、水动力条件等在很大程度上也影响了成矿机理（解习农等，2006；刘波等，2016）。研究区成矿流体的运移机理为：由桑根达来凹陷油田勘查钻孔资料显示，该区赛汉组下部泥岩总体厚度约 700m，其中暗色泥岩厚度约为 644m，占该组地层厚度的 78.5%，赛汉组下部有机质丰度指标偏高，平均约为 11.37mg/g，TOC 平均约为 1.89%。各项指标都显示桑根达来地区赛汉组下部以及腾格尔组地层，是一套有机质成熟发育的生油

地层（熊国起，2017），显示区内基底先存的含烃流体较为丰富。上覆沉积层厚度增加，导致了地层被压实，从而加速了孔隙水向流体超压较小的地方的排出，驱动了流体经过沉积作用以及区域构造断裂，向浅部运移。经后期构造抬升作用，流体在赛汉组地层中不断被运移。来自于地表水的成矿流体在储层内发生还原反应，使得含氧含铀水中的矿物质与储层中的有机质、含烃流体等混合，络合物经过氧化还原反应，富集形成铀矿体。在流体垂向和层间渗入氧化带过程中，储层结构的良好连通性以及内外部还原介质的影响下，铀得以富集成矿，研究区内富集的有机质流体、表生含矿流体等多种混合流体混合形成铀矿体的过程。其次，铀石在弱碱性或碱性条件下才稳定，而在中性或弱酸性条件下容易分解成沥青铀矿和铀石英，在温度、Ph 两者或其中之一下降和 Eh 适当的环境下所形成的。随着酸性还原流体作用，铀石逐渐在胶状黄铁矿、它形黄铁矿、锐钛矿、高岭石中沉淀富集（朱强等，2021）。据前文所述，赛汉组铀矿物主要是以铀石形式出现，且周围富集黄铁矿，即指示了酸性含 H<sub>2</sub>S 流体作用增强，它形、胶状黄铁矿等矿物蚀变、岩屑压实析出过程。侧面证实了通过流体作用运移了丰富 Fe 在碎屑颗粒间富集，生成充填孔隙的胶状黄铁矿，铀石就吸附在后生蚀变黄铁矿的边缘。还可见铀石呈脉状充填在胶状黄铁矿裂隙或者呈星点状被胶状黄铁矿包裹，反映胶状黄铁矿经受了活动能力更强的含铀流体的改造过程。

#### 4.3 铀源与铀成矿

北方盆地砂岩型铀矿的来源主要包括来自于蚀源区在铀储层预先富集的铀和晚期铀成矿流体向地层中输送的铀，盆地破碎程度、分布面积、沉积相分布和氧化还原带的规模对铀源的贡献都有一定的影响（俞初安等，2020）。二连盆地在侏罗纪至白垩纪之间处于伸展断裂的构造背景，抬升隆起作用明显，地层遭受剥蚀，为二连盆地赛汉组的沉积提供了丰富的物源和铀源。

川井坳陷分割性强，沉积相带窄，铀源对于白彦花铀矿的影响较大（夏毓亮等，2003）。川井坳陷基底为中朝陆台北缘元古代褶皱带及内蒙地槽华力西褶皱带，由元古界和古生界变质岩系组成，索伦山隆起、南部造山带、华力西和燕山期多旋回构造岩浆活动剧烈，地壳演化成熟度高。通过综合对比研究区地层的碎屑锆石年龄与盆地周缘及毗邻山体出露岩石的年龄，能够准确地为该区物源提供证据。为了确定研究区赛汉组砂岩沉积物源，搜集了研究区周边北部索伦山隆起、南部阴山造山带-白云鄂博-四子王旗、二连盆地中东部等周边地质体测年数据，用以直观反映白彦花地区及邻区的物源时空分布特征。白彦花地区所采二连组样品以及赛汉组样品砂岩碎屑锆石年龄峰值区域分为三个阶段，主要集中于早三叠世-中二叠世之间（246~289Ma），其次为中元古代（1387~1779Ma）以及古元古代（1827~2086Ma）。除白彦花隆起本身提供的物源外，研究区峰值年龄区域与北部隆起区以及南部造山带的峰值年龄也有较好的对应关系，且物源组成较为复杂（笔者另文研究）。川井坳陷周缘地质体花岗岩、混合花岗岩富铀，一般为  $3.2-5.1 \times 10^{-6}$ ，Th/U 比值为 4.1-5.2（饶耕玮等，2021）；基底南部花岗岩华力西晚期的 U 含量为  $3.01 \times 10^{-6}$ ，Th/U 含量为 5.1（李保侠等，2002），显示了铀迁移的程度高，周围隆起地质体遭剥蚀年代与赛汉组沉积时

代相吻合，也进一步说明了周边蚀源区为目的地砂岩层提供了丰富的铀源物质，为铀的预富集以及后生成矿作用提供了必要的前提条件。

另外，根据钻孔中岩石样品的 Th/U 比值能粗略判断岩石的原始铀含量，从而可以辨别铀的预富集和铀后生成矿作用（夏毓亮，2003）。白彦花地区铀矿勘查钻孔岩、矿心样品的原始铀含量及变化规律显示，围岩(铀含量 $<10\times 10^{-6}$ )的现测铀含量平均值为  $6.39\times 10^{-6}$ ，原始铀含量平均值  $2.58\times 10^{-6}$ ，铀得失 147.67%；矿化段( $10\times 10^{-6}<$ 铀含量 $<100\times 10^{-6}$ )的现测铀含量平均值为  $40\times 10^{-6}$ ，原始铀含量平均值  $3\times 10^{-6}$ ，铀得失 1233.33%；矿段(铀含量 $>100\times 10^{-6}$ )的现测铀含量平均值为  $889.9\times 10^{-6}$ ，原始铀含量平均值  $2.76\times 10^{-6}$ ，铀得失 32142.75%。可以看出围岩、矿化段、矿段三个不同部位随着现测铀含量的增加，原始铀含量未发生明显变化且数值均较低。说明成岩时矿化段、矿段岩石获得大量的铀，铀的预富集程度偏低，铀源主要来自外围的蚀源区。

#### 4.4 铀成矿模式及成矿过程

前人研究表明二连盆地铀成矿模式主要为潜水-层间氧化作用成矿、流体混合作用成矿以及受沉积湖泛面控制成矿等多种复杂因素耦合成矿（焦养泉等，2015，2018，2021；俞初安等，2020；封志兵等，2021；聂逢君等，2021）。诸如对努和廷矿床、哈达图矿床、赛汉高毕等矿床成矿模式开展了大量研究（旷文战等，2014；李伟涛等，2020）。二连盆地的砂岩型铀矿成矿机理具有一定的相似性。成矿沉积前期，赛汉组地层铀部分预富集或者直接成矿；在成矿期间蚀源区成矿物以及砂体被剥蚀后运移到赛汉组地层中，通过流体作用与潜水和层间氧化还原带和流体混合界面相接触，在一定物化条件下形成矿体；成矿晚期，被上覆二连组、古近纪、第三纪沉积地层所保护，铀矿体较为完好地被储存下来。

川井坳陷在早白垩世阿尔善期和腾格尔期为断裂构造形成和活动期。沿坳陷沿岸发育冲积扇、扇三角洲、近岸水下扇及深湖、半深湖沉积；沿坳陷斜坡带发育辫状河三角洲及滨浅湖沉积。整个坳陷以白音查干凹陷北西部沉降幅度最大，发育厚度巨大的油页岩层。腾格尔组沉积之后，也就基本上意味着断陷盆地的发展期结束，转而进入断坳转换期。该时期，白彦花地区成矿过程可分为三个阶段：

早白垩世早期，含矿目的地层赛汉组开始沉积，大部分断裂构造趋于稳定，活动性减弱。该时期内广泛发育辫状河三角洲沉积，同时桑根达来凹陷南缘断裂和包龙凹陷仍具有一定的活动性，从而发育了扇三角洲沉积，形成了广泛分布且连续的砂体。古构造地貌类型为西高东低，南高北低从而形成了由南向北、由西向东的河流方向，为铀源物质的输送提供通道，铀在迁移过程中在砂体中被还原，形成初步的铀矿化与富集。

早、晚白垩世之间全区隆升，形成上、下白垩统之间的沉积间断。受地质构造隆升作用影响，在中部白彦花凸起和周边附近形成剥蚀窗口，赛汉组地层出露地表遭受剥蚀（图 11a），含氧含铀水通过河道由南部隆起带向凹陷地区渗入，带动了大量成矿物质的运移，使研究区早期潜水氧化成矿作用得以进行（图 11b）。此外，赛汉组下段和腾格尔组是主要的生油气资源的地层，其富含有机质、煤油资源，油气在构造运动中可沿深部断裂、岩石

裂隙上升，在赛汉组发育广泛的后生还原作用，地层还原容量增加，生成了大量的次生黄铁矿。

晚白垩世时期，古气候环境干旱炎热，二连组开始沉积，白彦花被地层覆盖形成隐伏凸起。坳陷南部包龙凹陷发育冲洪积扇，粗碎屑岩沉积于此；坳陷北部白音查干凹陷和桑根达来凹陷主要发育洪泛平原沉积，细碎屑岩和泥质岩沉积，此时沉降中心在坳陷南部、沉积中心在坳陷北部（李洪军等，2012）。沉积物质不断压实地层，形成烃类气体，造成赛汉组地层大面积封存。后期盆地坳陷中部的早期断裂构造复活，切穿上部层位，从而使层间承压水通过断裂排泄，形成通畅的补、迳、排体系，是坳陷北部后生氧化和砂岩型铀成矿作用的有利时期（图 11c）。在水动力、丰富的还原介质、古气候和构造运动等多种因素的耦合下，使铀在赛汉组地层中进一步富集或改造。

成矿后期区域内形成稳定的隔水顶板，含氧水无法进入内部，目的层氧化能力减弱，只有局部还存在着有铀成矿作用的再富集与改造。同时，因地层的覆盖，深部物质的还原作用对于之前生成的铀矿床也起到了重要的保护作用。

综上所述，川井坳陷目的层赛汉组形成后经历了赛汉期末-二连期初的沉积间断，并经历了渐新世-上新世北部抬升作用和第四纪南部抬升作用等，从而使目的层在坳陷边缘不同程度的暴露，潜水氧化作用广泛发育，局部发育层间氧化作用。白彦花矿区及周边的潜水一层间氧化带主要发育在白彦花隐伏凸起和苏海布龙隆起带的边缘。

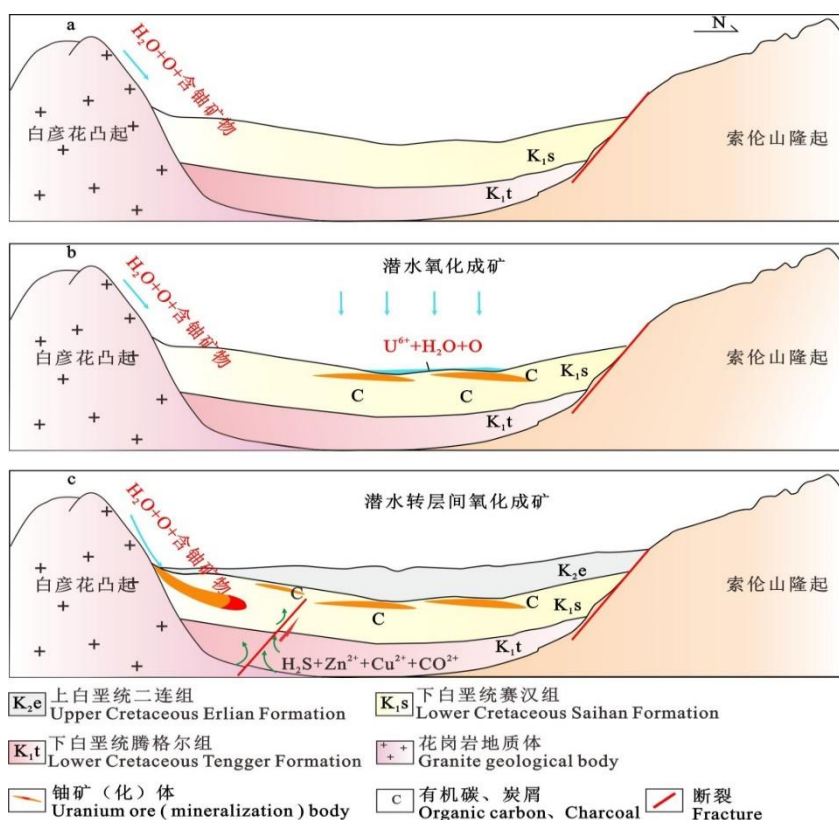


图 11 二连盆地赛汉组古河谷铀成矿作用流体运移模式图

Fig. 11 Fluid transport pattern of uranium mineralization in the ancient valley of the Saihan Formation in the Erlian Basin

## 5 结论

(1) 二连盆地白彦花地区砂岩型铀矿主要产于白垩纪下统赛汉组上段砂体中, 矿体产状西高东低。铀矿石以灰色、深灰黑色砂砾岩为主, 局部夹炭质泥岩以及褐煤。铀矿物以铀石为主, 主要赋存在矿化砂岩中填隙部位以及矿物解理部位, 交代黄铁矿、炭屑等。

(2) 白彦花矿区发育辫状河-三角洲体系, 上部含矿含水层相对稳定, 二连组作为上隔水层发育稳定, 部分地段下隔水层不连续发育。经后期构造抬升作用, 流体在地层中运移, 含氧含铀水与含烃流体等混合, 络合物经过氧化还原反应, 有利于形成铀矿体。

(3) 白彦花铀矿成矿模式为: 川井坳陷东部白彦花凸起与两侧凹陷间的缓倾斜坡带是古河道砂岩型铀矿的有利成矿区。下白垩统赛汉塔拉组上段沉积间断末期, 来自白彦花隆起的富铀流体发生了潜水渗入作用形成了铀矿体, 二连组沉积后, 白彦花凸起被沉积物所覆盖, 适时发生了层间氧化成矿作用。

**致谢:** 感谢匿名审稿专家以及责任编辑对论文提出的宝贵修改意见。

## References

- B.F. Windley and G. Badarch and W.D. 2001.Cunningham and A. Kröner and A.C. Buchan and O. Tomurtogoo and E.B. Salnikova. Subduction-Accretion History of the Central Asian Orogenic Belt: Constraints from Mongolia[J]. Gondwana Research.
- Chen Zhelong, Liu Guangdi, Lu Xuejun, Huang Zhilong, Luo Qiang, Ding Jianshe. 2015. Quantitative study on inversion degree of inversion structure in Erlian Basin and its influence on oil and gas accumulation [J] Journal of Central South University (NATURAL SCIENCE EDITION), 46 (11): 4136-4145(in Chinese with English abstract).
- Deng Jixun, Ji Youliang, Xu Shenmou, Huang Pei, Guo Xun. 2013. reservoir characteristics and main controlling factors of Tengger formation in Sanghe area of Baiyinchagan depression [J] Acta sedimentologica Sinica, 31 (02): 350-357(in Chinese with English abstract)
- Ding X , Liu G , Ablimit I .2018.Relationship between source rock development and petroleum accumulation in the Erlian Basin, northern China[J]. Geological Journal.
- Dou L , Chang L.2003. Fault linkage patterns and their control on the formation of the petroleum systems of the Erlian Basin, Eastern China[J]. MARINE AND PETROLEUM GEOLOGY.
- Du Guangyi .2008. study on the fault and unconformity of Sanghe sub sag and the law of oil and gas accumulation in Baiyinchagan Sag [D] China University of petroleum(in Chinese with English abstract).
- Fei Qi, Zhu Yuheng, Du Jinhu, Ping Xuecong, Ye Qiuyan. 1996. application of oil forming system analysis in surface geochemical exploration -- Taking sangendalai depression as an example [J] Earth science, (02): 227-230(in Chinese with English abstract).
- Feng Zhibing, Nie Bingfeng, Nie Fengjun, Jiang Li, Xia Fei, Li Mangen, Yan Zhaobin, he Jianfeng, Cheng ruodan .2021. Application progress of geophysical methods in sandstone type uranium exploration [J] Geophysical and geochemical exploration, 45 (05): 1179-1188(in Chinese with English abstract).
- Feng Zhibing, Nie Fengjun, Xia Fei, Li Mangen, Jiang Li, Zhang Hujun, Yan Zhaobin, Zhang Chengyong, Zhang Xin .2021. Discussion on the morphological characteristics and genesis of sandstone type uranium deposits [J] Uranium geology, 37 (06): 981-



- 990(in Chinese with English abstract).
- Hu Xiaoyu .2019. Study on metallogenic characteristics and radioactive pollution of sandstone type uranium deposit in Baiyanhua area [J] Inner Mongolia coal economy, (19): 230(in Chinese with English abstract).
- Jiao Yangquan, Wu Liqun, Peng Yunbiao, Rong Hui, Ji Dongmin, Miao Aisheng, Li Hongliang .2015. comprehensive analysis of sedimentary tectonic background for the formation and development of sedimentary uranium deposits in the paleo Asian tectonic domain in northern China [J] Geoscience frontiers, 22 (01): 189-205(in Chinese with English abstract).
- Jiao Yangquan, Wu Liqun, Rong Hui, Zhang Fan .2021. Coal accumulation law of Zhiluo Formation in Ordos Basin and its indicative significance to paleoclimate and uranium metallogenic environment [J] Journal of coal, 46 (07): 2331-2345(in Chinese with English abstract).
- Jiao Yangquan, Wu Liqun, Rong Hui, Zhang Fan, Le Liang, Tao Zhenpeng, Sun Yuhan .2018. geological modeling of uranium reservoir: reveal the metallogenic mechanism and the geological basis for dealing with "residual uranium" [J] Earth science, 43 (10): 3568-3583(in Chinese with English abstract).
- Jie Xinong, Jiang Tao, Wang Hua, Lu Yongchao, Xie Yuhong.2006.Stratigraphic hydrochemical evidence of thermal fluid breakthrough in the bottom incipient zone of Yinggehai Basin[J]. Journal of Petrology, (08):2243-2248. (in Chinese with English abstract).
- Kuang Wenzhan, Cai Tong, Yan Zhaobin .2014. Cretaceous characteristics and uranium metallogenic types of Wulanchabu depression in Erlian Basin, Inner Mongolia [J] Journal of Donghua University of Technology (NATURAL SCIENCE EDITION), 37 (02): 111-121(in Chinese with English abstract).
- Li Baoxia, Zheng Kewen, Wei Guanhui .2002. Study on uranium metallogenic environment and favorable metallogenic areas in Chuanjing depression of Erlian Basin [J] Uranium geology, 2002 (02): 77-84(in Chinese with English abstract).
- Li Hongjun, Shen Kefeng, Nie Fengjun, Kuang Wenzhan, He Datu .2012. Mesozoic Cenozoic sedimentary evolution and uranium mineralization in Erlian Basin [J] Journal of Donghua University of Technology (NATURAL SCIENCE EDITION), 35 (04): 301-308(in Chinese with English abstract).
- Li Li, Xu Guosheng, Wang Wei, Zhou Liande .2007. oil and gas accumulation law of dalqi oilfield in Baiyinchagan depression [J] Journal of Chengdu University of Technology (NATURAL SCIENCE EDITION), (03): 277-284(in Chinese with English abstract).
- Li Weitao, Li Ziyang, Li Xide, Liu Wusheng, Kang Shihu, Lv Yonghua .2020. Study on clay mineral characteristics of Hadatu uranium deposit in Erlian Basin and its relationship with uranium mineralization [J] Uranium geology, 36 (02): 96-103(in Chinese with English abstract).
- Li Xianping, Zhang Shaohua, Li Linbo, Yang Minghui, Lu Yonghe, Zhou Duo, Qu Xiaoyan .2015. Coupling of Early Cretaceous fault depression and basement structure in Erlian Basin [J] Geoscience, 50 (01): 88-99(in Chinese with English abstract).
- Li Yuexiang, Yu Jinshui, Qin Mingkuan, Chen Daisheng, Cao Jianying, Wei Sanyuan .2009. prospecting direction of in-situ leachable sandstone type uranium deposit in Erlian Basin [J] Uranium geology, 25 (06): 338-343(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. 2022. Exudative

- uranium mineralization of the Hadatau sandstone uranium deposit in the Erlian Basin, Inner Mongolia [ J ]. *China Geology*, 49 ( 04 ) : 1009-1047 (in Chinese with English abstract) .
- Liang Jiwei, Cai Yue, Fu Guomin, song Yan, Zhang Fangdong, Liu Shaoguang .2012. oil and gas sources in Sanghe area of Baiyinchagan depression [J] *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42 (02): 327-334(in Chinese with English abstract).
- Lin Xiaobin, Li Xide, Liu Wusheng .2021. Metallogenic types and temporal and spatial distribution characteristics of uranium deposits in Erlian Basin [J] *Uranium geology*, 37 (06): 1013-1026(in Chinese with English abstract).
- Liu Bo, Yang Jianxin, Qin Yanwei, Qiao Peng, Zhang Feng .2016. Study on ore controlling genetic facies of paleo Valley sandstone type uranium deposit of Saihan formation in the Middle East of Erlian Basin [J] *Geology and exploration*, 52 (06): 1037-1047(in Chinese with English abstract).
- Liu Wusheng, Kang Shihu, Jia Licheng, Shi Qingping, Peng Cong .2013. Metallogenic characteristics of paleochannel sandstone type uranium deposit in the middle of Erlian Basin [J] *Uranium geology*, 29 (06): 328-335(in Chinese with English abstract).
- Liu Wusheng, Li Bihong, Shi Qingping, Jia Licheng, Zhao Xingqi .2015. Soil radon anomaly model and application of sandstone type uranium deposit in Erlian Basin [J] *Geophysical and geochemical exploration*, 39 (02): 234-239(in Chinese with English abstract).
- Liu Wusheng, Zhao Xingqi, Shi Qingping, Zhang Zinan.2017.Research on the relationship between sandstone-type uranium mineralization and oil and gas in northern China [ J ].*Geology of China*, 44 ( 02 ) : 279-287 (in Chinese with English abstract) .
- Lu Chao .2019. Structural ore control mechanism and metallogenic model of Bayan Wula uranium ore field in Erlian Basin [D] *China University of Geosciences*(in Chinese with English abstract).
- Lv Yonghua, Liu Wusheng, Kang Shihu, Xu Yaxiong, Liu Lu .2019. uranium metallogenic geological conditions and prospecting direction of the lower Saihan formation in Wulanchabu depression [J] *Uranium geology*, 35 (05): 273-281(in Chinese with English abstract).
- Miao Pengyi, Li Mangen, Zhang Feng, Wu Jinzhong .2021. Study on the occurrence characteristics and ore control of interlayer oxidation zone in Hadatau area, Erlian Basin, Inner Mongolia [J] *Journal of Donghua University of Technology (NATURAL SCIENCE EDITION)*, 44 (03): 212-223(in Chinese with English abstract).
- Miao Quanyun, Qi Jiafu, Xiao Yang, Wang Lishuang, Zeng Ting, Zhang Jie. 2016.Extensional tectonic characteristics and basin-forming evolution of Wunite depression in Erlian Basin [ J ].*China Geology*, 43 ( 06 ) : 2036-2045 (in Chinese with English abstract) .
- Nie Fengjun, Chen Anping, Hu Qinghua, Shen Kefeng, Qin Mingkuan, Li Mangen, Jiang Meizhu .2007. Discussion on the age of the target layer of Early Cretaceous sandstone type uranium deposit in Erlian Basin, Inner Mongolia [J] *Journal of stratigraphy*, (03): 272-279(in Chinese with English abstract).
- Nie Fengjun, Li Mangen, Yan Zhaobin, Xia Fei, Zhang Chengyong, Yang Jianxin, Kang Shihu, Shenkefeng .2015. segmentation and uranium mineralization of Saihan formation of sandstone type uranium deposit in Erlian Basin, Inner Mongolia [J] *Geological bulletin*, 34 (10): 1952-1963(in Chinese with English abstract).
- Nie Fengjun, Yan Zhaobin, Xia Fei, He Jianfeng, Zhang Chengyong, Feng Zhibing, Zhang Xin, Yang Dongguang, Chen Mengya, Tan Shunjia, Zhang Jin, Kang Shihu, Ning Jun, Yang Jianxin, Shen Kefeng, Cai Jianfang .2021. "Two stage and two mode" mineralization of sandstone type uranium deposits [J] *Acta geologica Sinica*, 42 (06): 823-

- 848(in Chinese with English abstract).
- Peng Yunbiao, Liu Bo, Qin Yanwei, Yan Xiaobo .2018. Constraints of tectonic evolution of Chuanjing depression in Erlian Basin on the mineralization of sandstone type uranium deposits [J] *Geology and exploration*, 54 (05): 917-928(in Chinese with English abstract).
- Peng Yunbiao, Lu Chao.2019. Metallogenic model of sandstone type uranium deposit in the lower segment of Saihantala formation in the west of Wulanchabu depression, Erlian Basin [J] *Northwest geology*, 52 (03): 46-57(in Chinese with English abstract).
- Qi Jiafu, Zhao Xianzheng, Li Xianping, Yang Minghui, Xiao Yang, Yu Fusheng, Dong Yueqi .2015. Early Cretaceous fault depression distribution in Erlian Basin and its relationship with basement structure [J] *Geoscience frontiers*, 22 (03): 118-128(in Chinese with English abstract).
- Qiao Peng, Yang Jianxin, Ge Yanzhong, Liu Guoan, Liu Zhongren .2015. uranium exploration progress and prospecting direction in Erlian Basin, Inner Mongolia [J] *Geological review*, 61 (S1): 250-251(in Chinese with English abstract).
- Qin Yanwei, Fang Shi, Liu Bo, Lv Yonghua, Qiao Peng, Wang Wei, Dong Xushu. 2021. Study on the relationship between the development style of structure oxidation zone and sandstone type uranium mineralization in the middle of Erlian Basin [J] *Uranium geology*, 37 (06): 1037-1048(in Chinese with English abstract).
- Quan Jianping, Fan Tailiang, Xu Gaozhong, Li Weihong, Chen Hongbin.2007.Discussion on the role of oil and gas migration in the mineralization of sandstone-type uranium deposits in northern basins of China [ J ]. *China Geology*, ( 03 ) : 470-477 (in Chinese with English abstract) .
- Rao Gengwei, Liu Xiaodong, Liu Pinghui, Dai Chaocheng, Huang Guanghui. 2021. Geochemical characteristics and geological significance of Cretaceous strata in Chuanjing depression, Erlian Basin [J] *Science, technology and engineering*, 21 (08): 3023-3031(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 of Qianjiadian uranium deposit in southern Songliao Basin and its constraints on uranium mineralization [J] *Earth science*, 41 (01): 153-166(in Chinese with English abstract).
- Sun Qiushi, Zong Wenming, Wang Sijia, Sun Shouliang, Li Yongfei, Gao Xiaoyong, Zhang Tao.2022.New strata of early and middle Jurassic high-quality source rocks were found below the Mesoproterozoic nappe in Niuyingzi Sag, Western Liaoning [ J ].*China Geology*, 49 ( 04 ) : 1285-1294(in Chinese with English abstract).
- Tan Yuming, Feng Jianhui, Jin Guangxing, Zhang Yunxian, Pan Changchun, Sheng Guoying, Fu Jiamo. 2003. geochemical and physical properties of crude oil from dahrqi oilfield in Baiyinchagan depression [J] *Geochemistry*, (03): 271-281(in Chinese with English abstract).
- Wang Yanqing, Zhang Yongshu, Xia Zhiyuan, Yang Tiyuan, Song Guangyong, Xu Feng, Liu Zhangguo.2016.Analysis of salinization characteristics and hydrocarbon generation potential of Cenozoic in Yiliping Depression, Qaidam Basin [ J ].*Geology of China*, 43 ( 04 ) : 1317-1330(in Chinese with English abstract).
- Wei W , Zhu X , He M ,Wing M , Liu X et al.2018.Original sediment composition of the Lower Cretaceous lacustrine tight-oil mudstone and influences on diagenesis and organic matter content, the Erennaoer Sag in Erlian Basin, NE China[J]. *Marine and Petroleum Geology*.
- Wu Zhaojian, Han Xiuzhong.2016.Secondary development technology of uranium ore from coalfield data and its significance in finding ore - taking the discovery of uranium

- occurrences in ZS coalfield in Erlian basin as an example[J]. *China Geology*, 43(02):617-627(in Chinese with English abstract).
- Xia Yuliang, Lin Jinrong, Liu Hanbin, Fan Guang, Hou Yanxian. 2003. metallogenic chronology of sandstone type uranium deposits in major uranium producing basins in northern China [J] *Uranium geology*, (03): 129-136+160(in Chinese with English abstract).
- Xie Lihua, Zhou Tong, Yang Jiancheng. 2008. oil and gas accumulation conditions and oil and gas distribution law in Baiyinchagan depression [J] *Petroleum Geology and engineering*, (03): 16-20+2(in Chinese with English abstract).
- Xiong Guoqi.2017.Research on petroleum geological characteristics of Sanggendalai sag [ J ].*Petroleum and Petrochemical Corporation of China*, ( 05 ) : 24-25(in Chinese with English abstract).
- Xu Shutang, Ma Weimin, Wang Deren, Jin Guangxing, Li Jidong, Yang yu'e .2004. Study on sequence stratigraphy of Lower Cretaceous in Baiyinchagan Sag, Erlian Basin [J] *Acta sedimentologica*, (04): 644-650(in Chinese with English abstract).
- Yang Biao, Chen Zhongshan .2021. Application of "secondary development" of coalfield data in the analysis of uranium prospecting prospect in Erlian Basin [J] *Journal of Hebei University of Geosciences*, 44 (04): 62-66(in Chinese with English abstract).
- Yu Renan, Wu Zhaojian, Sima Xianzhang, Han Xiaozhong, Li Zinan, Wensibo, Tu Jiarun .2020. Detrital zircon age of Saihantala formation sandstone in the southern margin of MANITE depression, Erlian Basin and its geological significance [J] *Earth science*, 45 (05): 1609-1621(in Chinese with English abstract).
- Yu Renan, Zhu Qiang, Wen Sibao, Tu Jiarun, Peng Shenglong, Si Qinghong, Tang Yongxiang .2020. Tectonic setting and provenance analysis of the source area of Zhiluo Formation sandstone in tarangaole area, Ordos Basin [J] *Earth science*, 45 (03): 829-843(in Chinese with English abstract).
- Yu Yacen .2019. Study on characteristics and mineralization of sandstone type uranium deposit in Hadatau area, Erlian Basin [D] *Donghua University of technology*(in Chinese with English abstract).
- Zhang Fushun, fan Tailiang, Liu Yanxue, Sun Yipu, Xu Shutang .2003. significance of special lithologic sections in sequence stratigraphy research in Baiyinchagan depression [J] *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, (01): 8-10+4(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wenhao, Tang Dongjie, Yang Ye, Zhang Jiaodong, Liu Xufeng, Wang Dandan, Zeng Qiunan, Liu Weibin. 2021. Sedimentary characteristics and hydrocarbon generation potential of Meso-Neoproterozoic source rocks in North China Platform [ J ]. *China Geology*, 48 ( 05 ) : 1510-1523(in Chinese with English abstract).
- Zhao Chenglin .1996. formation mechanism and hydrocarbon bearing property of volcanic reservoir space [J] *Geological review*, 42 (S1): 37-43(in Chinese with English abstract).
- Zhao Xianzheng, Liu Guangdi, Jin Fengming, Huang Zhilong, Lu Xuejun, Sun Mingliang, Ding Jianshe, Chen Zhelong .2015. distribution characteristics and distribution mode of effective source rocks in small faulted lake basins -- Taking the lower Cretaceous of Erlian Basin as an example [J] *Journal of petroleum*, 36 (06): 641-652(in Chinese with English abstract).
- Zhao Xingqi, Qin mingkuan, Fan Honghai, Liu wusheng, Kang Shihu, Zhang Zilong, Zhou Fei, Cai Ya, Shi Qingping .2019. Relationship between hydrocarbon fluid characteristics and uranium mineralization in paleochannel type uranium deposits in the central Erlian Basin, Inner Mongolia [J] *Acta geologica Sinica*, 40 (03): 405-416(in Chinese with English abstract).
- Zhu Qiang, Yu Rengan, Li Guangyao, Wen Sibao, Li Jianguo, Si Qinghong, Guo Hu.2021. Associated

mineral assemblage of sandstone type uranium ore in northeastern Ordos Basin and its geological significance[J]. Geotectonics and Metallogeny,45(02):327-344.

## 附中文参考文献

- 陈哲龙,柳广弟,卢学军,黄志龙,罗强,丁修建.2015.二连盆地反转构造反转程度定量研究及对油气成藏的影响[J].中南大学学报(自然科学版),46(11):4136-4145.
- 邓已寻,纪友亮,徐深谋,黄佩,郭勋.2013.白音查干凹陷桑合地区腾格尔组储层特征及主控因素分析[J].沉积学报,31(02):350-357.
- 杜广义.2008.白音查干凹陷桑合次洼断裂和不整合与油气成藏规律研究[D].中国石油大学.
- 费琪,祝玉衡,杜金虎,平学聪,叶秋炎.1996.成油体系分析在地表化探中的应用——以桑根达来凹陷为例[J].地球科学,(02):227-230.
- 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(05):1179-1188.
- 封志兵,聂逢君,夏菲,李满根,江丽,张虎军,严兆彬,张成勇,张鑫.2021.砂岩型铀矿的矿体形态特征及其成因探讨[J].铀矿地质,37(06):981-990.
- 胡晓宇.2019.白彦花地区砂岩型铀矿成矿特征及放射性污染研究[J].内蒙古煤炭经济,(19):230.
- 焦养泉,吴立群,彭云彪,荣辉,季东民,苗爱生,里宏亮.2015.中国北方古亚洲构造域中沉积型铀矿形成发育的沉积-构造背景综合分析[J].地学前缘,22(01):189-205.
- 焦养泉,吴立群,荣辉,张帆,乐亮,陶振鹏,孙钰函.2018.铀储层地质建模:揭示成矿机理和应对“剩余铀”的地质基础[J].地球科学,43(10):3568-3583.
- 焦养泉,吴立群,荣辉,张帆.2021.鄂尔多斯盆地直罗组聚煤规律及其对古气候和铀成矿环境的指示意义[J].煤炭学报,46(07):2331-2345.
- 解习农,姜涛,王华,陆永潮,谢玉洪.2006.莺歌海盆地底辟带热流体突破的地层水化学证据[J].岩石学报,(08):2243-2248.
- 旷文战,蔡彤,严兆彬.2014.内蒙古二连盆地乌兰察布坳陷白垩系特征及铀成矿类型[J].东华理工大学学报(自然科学版),37(02):111-121.
- 李保侠,郑克文,魏观辉.2002.二连盆地川井坳陷铀成矿环境及成矿有利地段研究[J].铀矿地质,2002(02):77-84.
- 李洪军,申科峰,聂逢君,旷文战,何大兔.2012.二连盆地中生代沉积演化与铀成矿[J].东华理工大学学报(自然科学版),35(04):301-308.
- 李莉,徐国盛,王威,周连德.2007.白音查干凹陷达尔其油田油气成藏规律[J].成都理工大学学报(自然科学版),(03):277-284.
- 李伟涛,李子颖,李西得,刘武生,康世虎,吕永华.2020.二连盆地哈达图铀矿床黏土矿物特征及其与铀成矿关系研究[J].铀矿地质,36(02):96-103.
- 李先平,张少华,李林波,杨明慧,卢永合,周多,屈晓艳.2015.二连盆地早白垩世断陷及基底构造的耦合性[J].地质科学,50(01):88-99.
- 李月湘,于金水,秦明宽,陈戴生,曹建英,卫三元.2009.二连盆地可地浸砂岩型铀矿找矿方向[J].铀矿地质,25(06):338-343.
- 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(04):1009-1047.
- 梁积伟,蔡玥,付国民,宋岩,张放东,刘绍光.2012.白音查干凹陷桑合地区油气来源[J].吉林大学学报(地球科学版),42(02):327-334.
- 林效宾,李西得,刘武生.2021.二连盆地铀矿床成矿类型及时空分布特征[J].铀矿地质,37(06):1013-1026.
- 刘波,杨建新,秦彦伟,乔鹏,张锋.2016.二连盆地中东部赛汉组古河谷砂岩型铀矿床控矿成因相研究[J].地质与勘探,52(06):1037-1047.
- 刘武生,康世虎,贾立城,史清平,彭聪.2013.二连盆地中部古河道砂岩型铀矿成矿特征[J].铀矿地质,29(06):328-335.
- 刘武生,李必红,史清平,贾立城,赵兴齐.2015.二连盆地砂岩型铀矿土壤氡异常模型及应用[J].物探与化探,39(02):234-239.
- 刘武生,赵兴齐,史清平,张梓楠.2017.中国北方砂岩型铀矿成矿作用与油气关系研究[J].中国地质,44(02):279-287.
- 鲁超.2019.二连盆地巴彦乌拉铀矿田构造控矿机制和成矿模式[D].中国地质大学.
- 吕永华,刘武生,康世虎,徐亚雄,刘璐.2019.乌兰察布坳陷赛汉组下段铀成矿地质条件及找矿方向[J].铀矿地质,35(05):273-281.
- 苗鹏翼,李满根,张锋,吴金钟.2021.内蒙古二连盆地哈达图地区层间氧化带产出特征与控矿作用研究[J].东华理工大学学报(自然科学版),44(03):212-223.
- 苗全芸,漆家福,肖阳,王利爽,曾婷,张洁.2016.二连盆地乌尼特坳陷伸展构造特征及成盆演化[J].中国地质,43(06):2036-2045.
- 聂逢君,陈安平,胡青华,申科峰,秦明宽,李满根,姜美珠.2007.内蒙古二连盆地早白垩世砂岩型铀矿目的层时代探讨[J].地层学杂志,(03):272-279.
- 聂逢君,李满根,严兆彬,夏菲,张成勇,杨建新,康世虎,申科峰.2015.内蒙古二连盆地砂岩型铀矿目的层赛汉组分段与铀矿化[J].地质通报,34(10):1952-1963.
- 聂逢君,严兆彬,夏菲,何剑锋,张成勇,封志兵,张鑫,杨东光,陈梦雅,谈顺佳,张进,康世虎,宁君,杨建新,申科峰,蔡建芳.2021.砂岩型铀矿的“双阶段双模式”成矿作用[J].地球学报,42(06):823-848.
- 彭云彪,刘波,秦彦伟,颜小波.2018.二连盆地川井坳陷构造演化对砂岩型铀矿成矿作用的约束[J].地质与勘探,54(05):917-928.
- 彭云彪,鲁超.2019.二连盆地乌兰察布坳陷西部赛汉塔拉组下段砂岩型铀矿成矿模式[J].西北地质,52(03):46-57.
- 漆家福,赵贤正,李先平,杨明慧,肖扬,于福生,董越崎.2015.二连盆地早白垩世断陷分布及其与基底构造的关系[J].地学前缘,22(03):118-128.
- 乔鹏,杨建新,戈燕忠,刘国安,刘忠仁.2015.内蒙古二连盆地铀矿勘查进展与找矿方向[J].地质论评,61(S1):250-251.
- 秦彦伟,方石,刘波,吕永华,乔鹏,王伟,董续舒.2021.二连盆地中部构造-氧化带发育样式与砂岩型铀成矿关系研究[J].铀矿地质,37(06):1037-1048.
- 权建平,樊太亮,徐高中,李卫红,陈宏斌.2007.中国北方盆地中油气运移对砂岩型铀矿成矿作用讨论[J].中国地质,(03):470-477.
- 饶耕玮,刘晓东,刘平辉,戴朝成,黄光辉.2021.二连盆地川井坳陷白垩系地层元素地球化学特征

- 及地质意义[J].科学技术与工程,21(08):3023-3031.
- 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.
- 孙求实,宗文明,王斯佳,孙守亮,李永飞,郜晓勇,张涛.2022.辽西牛营子凹陷中元古界推覆体以下发现早中侏罗世优质烃源岩新地层[J].中国地质,49(04):1285-1294.
- 谈玉明,冯建辉,靳广兴,张云献,潘长春,盛国英,傅家谟.2003.白音查干凹陷达尔其油田原油地球化学与物性特征[J].地球化学,(03):271-281.
- 王艳清,张永庶,夏志远,杨体源,宋光永,徐峰,刘占国.2016.柴达木盆地一里坪坳陷新生界咸化特征及生烃潜力分析[J].中国地质,43(04):1317-1330.
- 吴兆剑,韩效忠.2016.煤田资料的铀矿二次开发技术及其找矿意义——以二连盆地 ZS 煤田铀矿点的发现为例[J].中国地质,43(02):617-627.
- 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[J].铀矿地质,(03):129-136+160.
- 谢利华,周彤,杨建成.2008.白音查干凹陷油气成藏条件及油气分布规律[J].石油地质与工程,(03):16-20+2.
- 熊国起.2017.桑根达来凹陷石油地质特征研究[J].中国石油石化,(05):24-25.
- 许书堂,马维民,王德仁,靳广兴,李继东,杨玉娥.2004.二连盆地白音查干凹陷下白垩统层序地层研究[J].沉积学报,(04):644-650.
- 杨彪,陈中山.2021.煤田资料“二次开发”在二连盆地铀矿找矿前景分析中的应用[J].河北地质大学学报,44(04):62-66.
- 于雅岑.2019.二连盆地哈达图地区砂岩型铀矿特征与成矿作用研究[D].东华理工大学.
- 俞弼安,吴兆剑,司马献章,韩效忠,李紫楠,文思博,涂家润.2020.二连盆地马尼特坳陷南缘赛汉塔拉组砂岩碎屑锆石年龄及其地质意义[J].地球科学,45(05):1609-1621.
- 俞弼安,朱强,文思博,涂家润,彭胜龙,司庆红,唐永香.2020.鄂尔多斯盆地塔然高勒地区直罗组砂岩源区构造背景与物源分析[J].地球科学,45(03):829-843.
- 张福顺,樊太亮,刘燕学,孙宜朴,许书堂.2003.白音查干凹陷特殊岩性段在层序地层研究中的意义[J].江汉石油学院学报,(01):8-10+4.
- 张文浩,汤冬杰,杨焯,张交东,刘旭锋,王丹丹,曾秋楠,刘卫彬.2021.华北地台中—新元古界烃源岩沉积特征及生烃潜力[J].中国地质,48(05):1510-1523.
- 赵澄林.1996.火山岩储层储集空间形成机理及含油气性[J].地质论评,42(S1):37-43.
- 赵贤正,柳广弟,金凤鸣,黄志龙,卢学军,孙明亮,丁修建,陈哲龙.2015.小型断陷湖盆有效烃源岩分布特征与分布模式——以二连盆地地下白垩统为例[J].石油学报,36(06):641-652.
- 赵兴齐,秦明宽,范洪海,刘武生,康世虎,张字龙,周飞,蔡亚,史清平.2019.内蒙古二连盆地中部古河道型铀矿床中烃类流体特征与铀成矿关系[J].地球学报,40(03):405-416.
- 朱强,俞弼安,李光耀,文思博,李建国,司庆红,郭虎.2021.鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿伴生矿物组合及其地质意义[J].大地构造与成矿学,45(02):327-344.