

# 鄂尔多斯盆地西南缘彭阳铀矿地质特征、 成矿规律及找矿标志

张 博<sup>1, 2, 3)</sup>, 苗培森<sup>1, 2)</sup>, 肖克炎<sup>3)\*</sup>, 李建国<sup>4)</sup>, 赵华雷<sup>1, 2)</sup>,  
陈 印<sup>1, 2)</sup>, 汤 超<sup>1, 2)</sup>, 司庆红<sup>1, 2)</sup>, 朱 强<sup>1, 2)</sup>

1) 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170;

2) 中国地质调查局铀矿地质重点实验室, 天津 300170;

3) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

4) 自然资源实物地质资料中心, 河北廊坊 065201

**摘 要:** 彭阳铀矿位于鄂尔多斯盆地西南缘, 是全球首例在风成沉积环境中发现的大型砂岩型铀矿, 具有含矿层位深、砂体厚度大、铀矿品位高等特点。通过对彭阳铀矿地质特征、物源、铀源、铀矿物赋存状态、蚀变矿物、烃类流体参与成矿等方面进行研究, 结合前人研究成果, 系统总结了彭阳铀矿的成矿规律。综合研究表明, 研究区深大断裂发育、拥有厚大砂体及稳定的“泥-沙-泥”结构, 对铀成矿极为有利。同时, 盆地西缘岩体可提供稳定铀源, 浅层富氧含铀流体顺层流动、下渗, 深部烃类流体沿断裂上升至洛河组, 导致红色砂岩褪色蚀变, 为铀成矿提供还原剂。中新世到更新世, 构造活动引发了富氧含铀流体和深层含烃流体的耦合作用, 形成了完整的“补-径-排”流体成矿系统, 最终导致铀成矿。通过分析彭阳铀矿的成矿和控矿要素, 进而建立了成矿模式, 对鄂尔多斯盆地西南缘砂岩型铀矿找矿及其它地区相似地质条件下找矿勘查与研究具有重要指示意义。

**关键词:** 彭阳铀矿; 砂岩型铀矿; 地质特征; 成矿规律; 找矿标志

中图分类号: P619.14 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2023.041201

## Geological Characteristics, Metallogenic Regularity and Prospecting Criteria of Pengyang Uranium Deposit in the Southwest Margin of Ordos Basin

ZHANG Bo<sup>1, 2, 3)</sup>, MIAO Pei-sen<sup>1, 2)</sup>, XIAO Ke-yan<sup>3)\*</sup>, LI Jian-guo<sup>4)</sup>, ZHAO Hua-lei<sup>1, 2)</sup>,  
CHEN Yin<sup>1, 2)</sup>, TANG Chao<sup>1, 2)</sup>, SI Qing-hong<sup>1, 2)</sup>, ZHU Qiang<sup>1, 2)</sup>

1) Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170;

2) Key Laboratory of Uranium Geology, China Geological Survey, Tianjin 300170;

3) Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

4) Core and Samples Center of Land and Resources, Langfang, Hebei 065201

**Abstract:** Pengyang uranium deposit is located in the southwest margin of Ordos Basin. It is the first large-scale sandstone type uranium deposit found in the aeolian sedimentary environment in the world. It has the characteristics of deep uranium bearing beds, thick sand bodies, and high uranium radioactivity. Based on the systematic study of the geological characteristics, material source, uranium source, occurrence state of uranium minerals, altered minerals, and the involvement of hydrocarbon fluids in the mineralization of Pengyang uranium deposit, the metallogenic regularity of Pengyang uranium deposit is systematically summarized in combination with previous research results. The study shows that the deep and large fractures, thick sand bodies and stable “mud-sand-mud” structure in the study area are very favorable for sandstone-type uranium mineralization. At the

本文由国家自然科学基金重点支持项目(编号: 92162212)、国家重点研发计划项目(编号: 2018YFC0604200)、中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20221678)、国际地球科学计划项目(编号: IGCP675)联合资助。

收稿日期: 2022-10-12; 改回日期: 2023-03-10; 网络首发日期: 2023-04-13。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 张博, 男, 1991年生。博士研究生。主要从事砂岩型铀矿调查及研究。E-mail: zhangbo0354@163.com。

\*通讯作者: 肖克炎, 男, 1963年生。博士, 研究员。主要从事矿产资源定量预测与评价。E-mail: kyanxiao@sohu.com。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

same time, the rock mass in the west of the basin can provide a stable uranium source, the shallow oxygenated uranium bearing fluid flows and penetrates along the layer, and the deep hydrocarbon fluid rises to the Luohe formation along the fault, leading to the fading and alteration of red sandstone and providing a reducing agent for uranium mineralization. During the Miocene to Pleistocene, tectonic activities triggered the coupling of oxygenated uranium bearing fluids and deep hydrocarbon bearing fluids, forming a complete fluid metallogenic system of “supplement-channel-discharge”, which ultimately led to uranium mineralization. Based on the analysis of the metallogenic factors and ore-controlling factors of Pengyang uranium deposit, a metallogenic model has been established, which is of great significance for the prospecting and research of sandstone type uranium deposits in the southwest margin of Ordos basin and similar geological conditions in other areas.

**Key words:** Pengyang uranium deposit; sandstone-type uranium deposits; geological characteristics; regularity of ore formation; prospecting target

铀作为重要战略资源和非化石能源,是实现“双碳”目标的重要能源保障之一。铀矿床类型多样,但砂岩型铀矿因具有矿床规模大、开采成本低、绿色环保等特点,已成为目前全球开采、利用的重要铀矿类型(张金带等, 2008; Jaireth et al., 2008; IAEA, 2020; 金若时和滕雪明, 2022)。我国的砂岩型铀矿主要分布在北方中生代盆地中,如鄂尔多斯盆地、松辽盆地、二连盆地、伊犁盆地、准噶尔盆地等(焦养泉等, 2015; 王飞飞等, 2017; 韩效忠等, 2020; 李建国等, 2020)。

数十年来,鄂尔多斯盆地的铀矿找矿工作主要围绕盆地北部开展,国内外砂岩型铀矿地质工作者在该地区取得了重要的找矿和科研成果(焦养泉等, 2015; 吴柏林等, 2016; Akhtara et al., 2017; 冯晓曦等, 2017)。但是,盆地西南缘的铀矿勘查工作尚显不足。20世纪60年代,在鄂尔多斯盆地西南缘发现国家湾小型铀矿床(张宇龙等, 2018),随后,下关、华亭、三角城等地也陆续发现多个铀矿化层及矿点(张嘉冕和张玉龙, 2022),之后未再发现新的铀矿床。近年来,依托中国地质调查局北方砂岩型铀矿调查工程和国家重点研发计划项目,天津地质调查中心在鄂尔多斯盆地西南缘彭阳—镇原地区发现了一处含矿层埋深在800~1400 m、砂体厚度大、品位高的深部铀矿化集中区(彭阳铀矿)(朱强等, 2019; 苗培森等, 2020; Miao et al., 2020),标志着盆地西南缘铀矿勘查工作取得了重要突破。众多研究者围绕沉积地层(乔大伟等, 2020)、环境气候(Zhang et al., 2022)、构造演化(Chen et al., 2021)、蚀变矿物(Zhu et al., 2021)等方面展开研究。本文结合前人研究成果,进一步系统总结了彭阳铀矿的地质特征、成矿规律等,并根据成矿要素初步建立了成矿模式,试图对鄂尔多斯盆地西南缘砂岩型铀矿找矿及其它地区同类型铀矿勘查及研究有一定指示意义。

## 1 区域地质特征

鄂尔多斯盆地是发育在华北克拉通之上的大型

多旋回叠合型盆地(邓军等, 2005; 刘池洋等, 2005, 2006; 吴柏林等, 2016),盆地主体面积约 $2.5\times 10^5\text{ km}^2$ ,呈近南北向展布,是我国重要的石油、天然气、煤炭、铀等多能源共存盆地(王贵玲等, 2004)。盆地东邻吕梁山,西接六盘山、祁连山及阿拉善地块,南以祁连山和秦岭造山带为界,北与阴山隆起接壤(图1)。盆地具有明显的双重基底结构,基底由太古代、古元古代的变质岩和中新元古界、古生界的海相灰岩夹碎屑沉积岩组成(杨俊杰, 2002; 朱宏权和张哨楠, 2004; 刘池洋等, 2006; 薛春纪等, 2008),这些古老基底在鄂尔多斯盆地周缘蚀源区均有出露,为盆地盖层的沉积提供了丰富的物源,也为铀矿原始富集奠定基础。盆地盖层为中新生界陆相沉积碎屑岩(杨晓勇等, 2009),主要包括三叠系、侏罗系、下白垩统、古近系、新近系和第四系等。其中,三叠系、侏罗系和下白垩统是盆地沉积的主体。三叠系内发育了盆地重要的烃源岩,也是重要的油气储层。侏罗系为盆地重要的含煤地层,也是盆地北部主要的砂岩型铀矿含矿层。白垩系在盆地北部和东南部广泛出露,也是盆地西南部重要的赋铀层位。古近系和新近系零星出露;第四系在盆地中部及南部分布面积广,地貌上表现为黄土地貌。

通常根据基底和构造演化特点将盆地划分为6个二级构造单元,即西缘逆冲带、天环拗陷、伊盟隆起、伊陕斜坡、渭北隆起和晋西挠褶带(图1)(王琳琳, 2014)。构造单元对鄂尔多斯盆地内砂岩型铀矿的矿集区具有明显的控制作用,比如西缘逆冲带、天环拗陷、伊盟隆起、渭北隆起都发育重要的铀矿矿集区。盆地边缘断裂和褶皱相对发育,为导通深部流体提供了通道,对铀矿成矿极为有利。

## 2 铀矿地质特征

### 2.1 构造特征

彭阳铀矿位于鄂尔多斯盆地西南缘,大地构造位置位于天环拗陷南缘,西邻西缘逆冲带南部的六盘山造山带,发育青铜峡—固原断裂带、

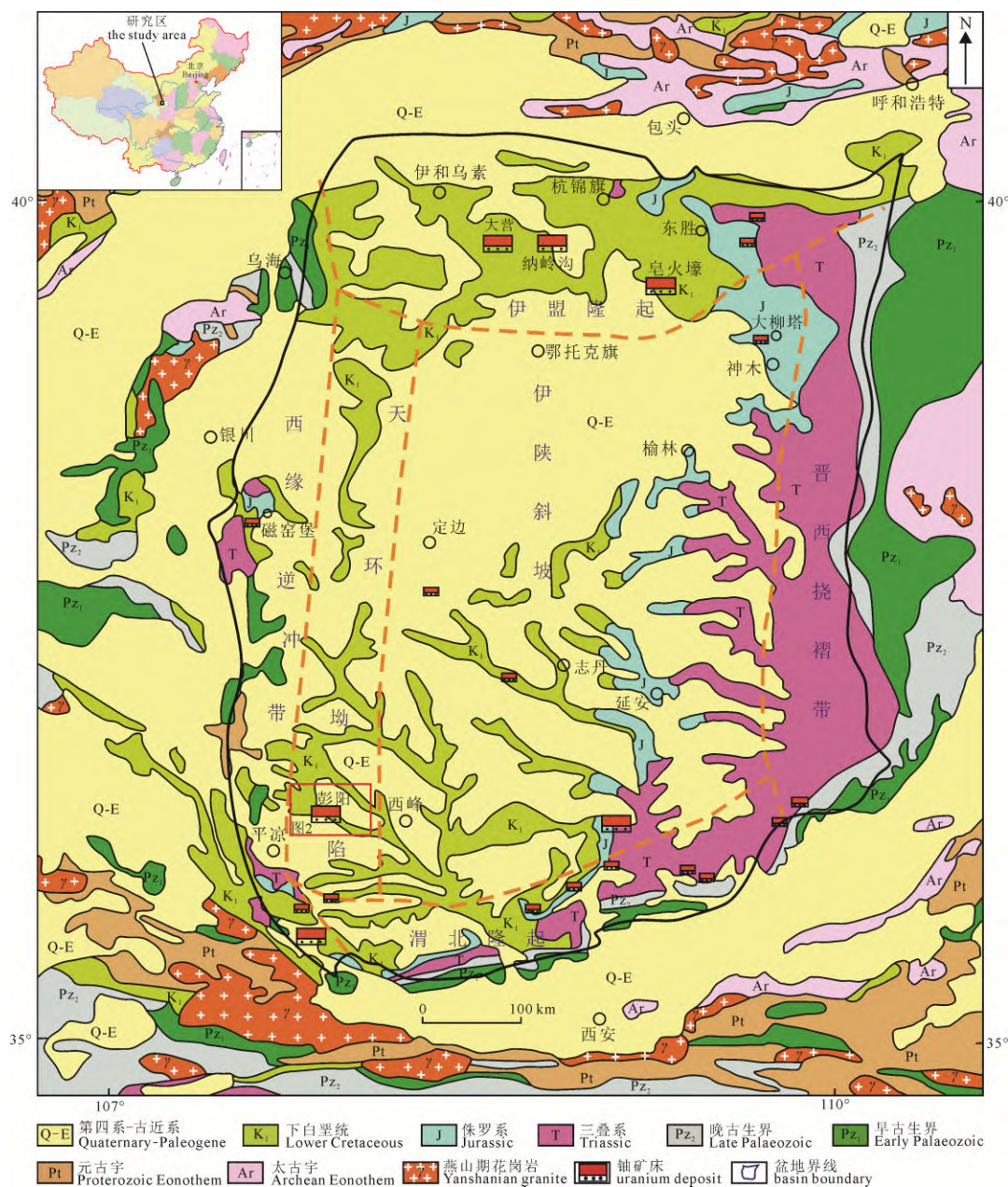


图 1 鄂尔多斯盆地地质简图(据赵华雷等, 2020 修改)

Fig. 1 Geological map of Ordos Basin (modified from ZHAO et al., 2020)

西华山—六盘山断裂带及六盘山西麓断裂等大型逆冲推覆构造(Chen et al., 2022a), 东邻伊陕斜坡(图 1)。研究区构造空间展布总体上近南北向分布(图 2), 发育大量逆推覆构造和褶皱, 野外观察、地震及重力资料解译均表明该地区发育大量断层, 以北西向和近南北向的断裂构造为主。彭阳铀矿成矿区与构造表现出一致的空间展布, 呈南北走向的矩形, 南北长约 60 km, 东西宽约 33 km。

晚侏罗世以来, 盆地西南部地层广泛发育了多期角度不整合面接触(孙建博等, 2006; 陈刚等, 2007), 尤其上侏罗统与下白垩统、下白垩统与渐新统以及新近系与第四系之间的角度不整合。研究区地处庆阳鼻状隆起区(李文辉等, 2017), 重要的油气藏储集构造。地震剖面解译表明, 彭阳铀矿的主矿

体位于天环坳陷内相对稳定的地区, 西缘断裂带广泛发育(Chen et al., 2022b)。相对稳定的地层结构, 为砂岩型铀成矿作用提供了巨厚的赋矿砂体及稳定的“泥-沙-泥”结构。断层导通了上下地层结构, 有利于流体的运移, 尤其深部还原性流体的上涌, 进一步限定了有利的铀成矿部位。

## 2.2 含矿地层

研究区含铀岩系属于下白垩统志丹群, 自下而上可划分为宜君组( $K_{1y}$ )、洛河组( $K_{1l}$ )、环河—华池组( $K_{1h}$ )、罗汉洞组( $K_{1lh}$ )、泾川组( $K_{1jc}$ ), 以风成沉积、冲洪积、河流和湖相沉积地层为主。风成沉积相主要发育在洛河组和罗汉洞组的上段, 其中洛河组砂岩分布面积最广, 厚度最大, 也是该地区主要的含铀层位。

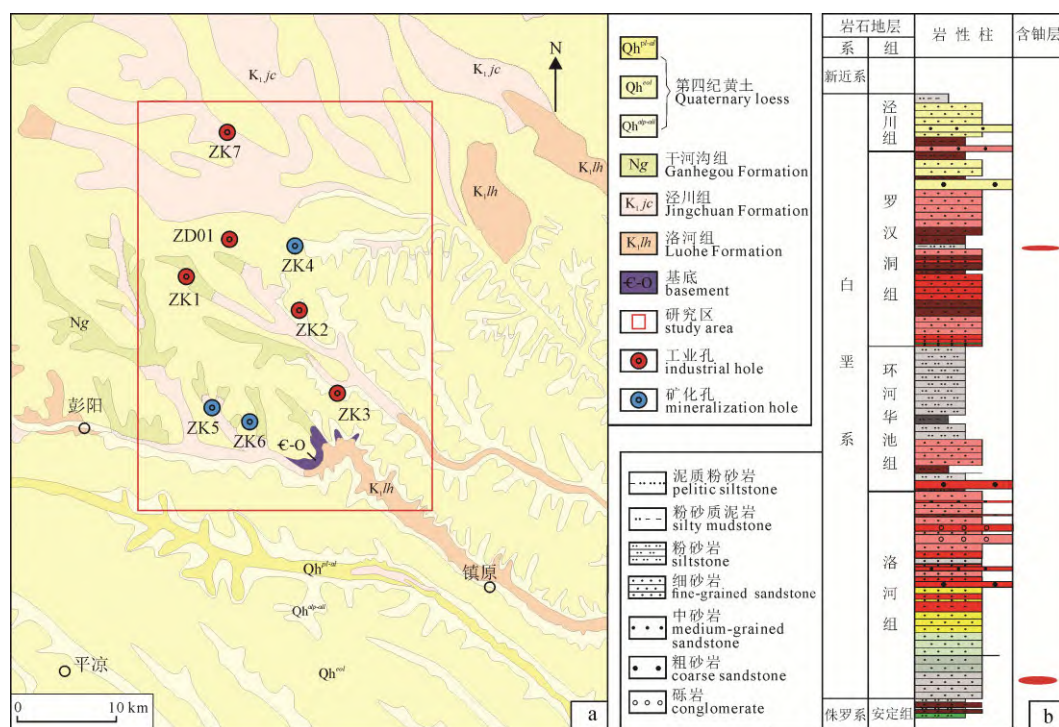


图2 彭阳铀矿地质图及综合柱状图

Fig. 2 Geological map and comprehensive histogram of Pengyang uranium deposit

研究区范围内无洛河组露头, 仅在深部钻孔中可见。鄂尔多斯盆地西南部镇原地区的洛河组分布较稳定, 厚度处于 150~400 m 之间(赵华雷等, 2020), 岩性主要为棕红色及紫红色的巨厚层细-粗粒砂岩, 夹中薄层含砾砂岩、粉砂岩和泥岩等。在盆地尺度上可见洛河组砂体主要发育风成沙丘, 以沙波层和垮塌层为主, 可见条纹层、风蚀砾以及大型高角度交错层理等典型沙漠沉积现象(乔大伟等, 2020), 局部见沙漠湖及早谷沉积。总之, 根据岩性、颜色、沉积构造等特征, 认为鄂尔多斯盆地西南部洛河组风成沉积体系是一套以风成沉积和与其相伴生的水成沉积共同构成的多成因类型的沉积组合。

### 2.3 矿体特征

研究区钻孔资料及编图成果显示彭阳铀矿共发育 1~3 层矿体, 最大厚度可达 50 余 m。研究区 5 个工业钻孔的矿石平均品位均大于 0.01%, 平米铀量介于 3.05~9.78 kg/m<sup>3</sup> 之间(Ren et al., 2022), 因钻孔间距较大, 推测矿体总体呈单层板状, 大致呈北东—南西向展布, 与区域断层的方向基本一致。矿石类型较为单一, 主要为砂岩型, 矿化岩性含铀矿石主要为浅灰色、灰白色、绿灰色细砂岩、中砂岩(图 3), 局部地段发育少量砾砂岩、砾岩。矿石总体上表现为细-中粒砂状结构, 块状构造。矿石大多较疏松, 孔隙度整体较高, 在 6%~25% 之间, 以 10%~25% 为主。铀储层渗透率较好, 主要集中在 0.01~1 000 mD 之间, 集中于 10~1 000 mD。与其他砂岩型铀矿不同的是, 彭阳铀矿的矿石极少含炭质碎屑, 黄铁矿含量也较低。



a, b—灰色含铀砂岩(ZD01, 1 415.1 m); c—烃类流体沿裂缝蚀变形成的灰色砂体; d—灰色含铀砂岩镜下特征。

a, b—grey sandstone uranium-bearing(ZD01, 1 415.1 m); c—gray sand body formed by the upward alteration of fluid containing hydrocarbon along the fracture; d—microscopic features of gray uranium-bearing sandstone.

图3 含铀砂体宏观、微观照片  
Fig. 3 Macro and micro photos of uranium-bearing sandstone

依据铀矿体赋存位置及研究区钻孔资料信息,洛河组砂体在垂向具有较明显的颜色分带,自上而下分为三套砂体,第一套砂体整体呈红色-浅红色和黄色,为氧化环境形成;第二套砂体呈灰色-深灰色,是铀矿的主要赋存位置,为还原环境形成,上部为氧化-还原过渡带;第三套砂体为红色、灰色混杂带。含矿砂岩位于第二层,主体上为灰色中(细)粒长石岩屑砂岩。陆源碎屑主要由石英、长石、岩屑组成,呈次棱角状,分选一般,杂乱分布(图 3d)。石英颗粒表面干净,部分具次生加大边。长石主要为斜长石,钾长石次之,少数为花岗岩。岩屑成分为火山岩、高变岩、千枚岩、片岩、板岩、变质砂岩、少量灰岩等,另见少量黑、白云母,呈片状,零星分布。粒间填隙物以孔隙式胶结为主,填充于陆源碎屑间,平均约占 5%~10%,低于国内其它矿床的含矿砂岩,主要由白云质胶结物、钙质胶结物、硅质胶结物、铁质胶结物等组成。

### 3 成矿规律

#### 3.1 物源及铀源

砂岩型铀矿赋铀层砂岩主要源自盆地周缘蚀源区,沉积物的物源研究对于铀源的追索、铀元素的迁移及富集规律研究尤为重要。受多期构造事件的制约,鄂尔多斯盆地中生代的物源体系及沉积中心发生了多次演化(邓军等, 2005; 刘池洋等, 2006; Zhao et al., 2009, 2020)。Chen et al.(2021)以鄂尔多斯盆地西南部白垩系为研究对象,开展碎屑锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素分析,结果显示,下白垩统志丹群具有统一的物源体系,主要为盆地西部白垩纪古隆起和下伏老地层,具有多期次旋回沉积特征,这表明研究区白垩系不同组之间具有统一的物源,为连续沉积体系,且其最原始的物源区为阿拉善地块、华北克拉通和祁连造山带。洛河组风成砂岩中常量元素、稀土元素含量分析表明物源区为被动大陆边缘构造背景占主导地位的再旋回造山带(朱欣然等, 2018)。综合上述研究成果,认为鄂尔多斯盆地西南部白垩系沉积物源主要为盆地西部白垩纪古隆起和下伏老地层,具有多期次旋回沉积特征。

一般认为砂岩型铀矿铀源主要是盆缘造山带含铀岩石单元内的铀元素随着富氧水淋滤渗入含矿层,或者是由于含矿层物源区发育大量富铀岩石单元,铀元素随着沉积物进入盆地,造成了含矿目的层的原始预富集,后期随着流体的活动而发生富集作用(Jin et al., 2019)。盆地西缘阿拉善地块内发育大量的海西期富铀侵入体,是鄂尔多斯盆地重要的铀源,晚侏罗一早白垩世古隆起内的岩石单元继承

了大量阿拉善和祁连造山带的属性,为盆地提供了大量的铀源。同时,盆地西缘陇县—歧山一带的辛集组含铀磷块岩层、北秦岭的元古代、古生代中酸性岩浆岩等变质岩具有很好的铀源条件(张字龙等, 2018)。彭阳铀矿含矿层位主要为长石石英砂岩,岩屑含量较少,砂岩本身铀含量低,因此该地区的铀源主要为外部铀源。结合鄂尔多斯盆地周缘的铀元素具有南高北低的特征,彭阳铀矿铀源主要来源于盆缘六盘山(西缘断褶带或造山带)的富氧含铀水。尽管深部富铀烃源岩提供铀源的可能性已经被证实(王苗等, 2022),深部三叠纪延长组烃类物质顺断裂通道上升至洛河组,铀也会随含烃流体以复杂络合物的形式上涌进入含矿层,但是研究区深部流体的供铀能力还有待进一步研究。

#### 3.2 铀的赋存状态

彭阳铀矿铀的赋存状态可分为铀矿物和吸附铀两大类。铀矿物主要是沥青铀矿(图 4),其次是含铀矿物及少量铀石。吸附铀主要为黏土矿物吸附,极少数为有机质吸附。通过利用扫描电镜观察含铀样品的微观形态及背散射图像,铀矿物共(伴)生组合类型通常有如下几种:沥青铀矿+锐钛矿、沥青铀矿+黄铁矿、沥青铀矿/铀石+磷灰石、沥青铀矿+方解石、沥青铀矿+黏土矿物等。其中,与锐钛矿、磷灰石共(伴)生的铀矿物占大多数。沥青铀矿呈星点状或团块状与锐钛矿共生,部分铀矿物颗粒可见围绕着锐钛矿边部产出。沥青铀矿沿黄铁矿边缘呈条带状交代黄铁矿或充填裂隙,这类沥青铀矿通常形成晚于黄铁矿(张博等, 2021)。星点状沥青铀矿或铀石与细晶磷灰石分布于颗粒碎屑表面及粒间。砂岩碎屑填隙部位疏松多孔,是含铀成矿流体运移的主要通道,也是铀沉淀成矿的良好储存空间。

此外, Zhao et al.(2022)利用逐级化学提取实验法,从定量的角度对彭阳铀矿吸附铀的存在形式进行研究,结果表明主要是碳酸盐态和残渣态,其次是有机质及硫化物态(22.73%)、铁锰氧化态(1.78%)及可交换离子态因此,彭阳铀矿铀的赋存状态主要以铀矿物和吸附铀两种赋存形式存在,且铀矿物比例明显大于吸附铀。

#### 3.3 蚀变矿物特征

含铀岩系主要是风成沉积成因,受原始风成沉积特征影响,蚀变矿物含量总体较少;但受后期流体注入及成矿作用影响,仍发育一系列蚀变现象。微观研究及岩心光谱扫描结果显示,彭阳铀矿的蚀变矿物主要有含铁氧化物(赤铁矿、褐铁矿)、碳酸盐(方解石、铁白云石)、石膏、锐钛矿、细小磷灰石、黏土矿物以及石英加大边等。其中与铀成矿密切相关的蚀变矿物主要是铁氧化物、石膏、磷灰石

等。洛河组砂岩中黏土矿物和黄铁矿等有机质含量均很少,但若二者出现在矿段,具有明显的铀富集现象。

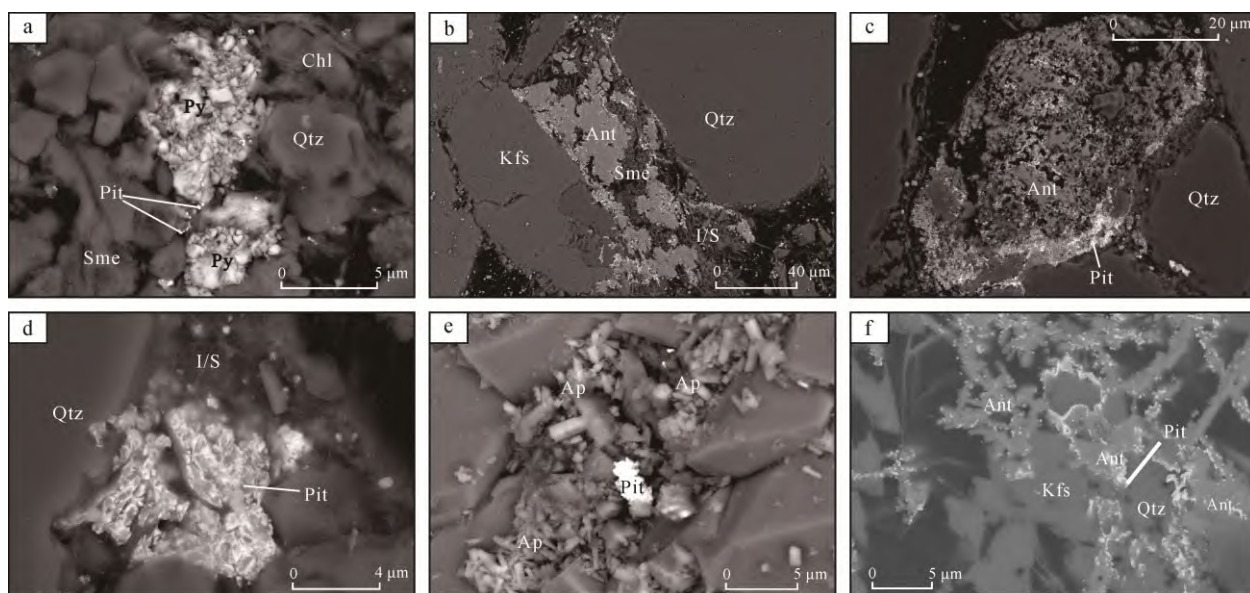
利用岩心红外光谱扫描技术对研究区钻孔中的矿物进行分析,识别出洛河组的矿物主要包括伊利石、高岭石、绿泥石、碳酸盐、石膏、铁氧化物、蒙脱石(极少量)等(图 5)。与地质编录及其他实验方法相比,该结果更精细地展示了剖面中纵向各种矿物的分布特征,反映了矿物在各个层位的相对丰度。尽管洛河组整体是一套红色氧化地层,但在含铀矿段最明显的变化就是褪色蚀变,红色砂岩被蚀变为灰色、绿灰色,在矿物上最明显的表现就是三价铁氧化物的减少。针状磷灰石常与铀矿物伴生,铀矿物通常以分散状或集合体状吸附在磷灰石的周缘,元素地球化学数据也表明磷与铀有很强的相关性(Ren et al., 2022)。黄铁矿仅在矿段附近局部发育,呈条带状、结核状、浸染状、团块状、胶状等,他形粒状产出为主,其中胶状黄铁矿与沥青铀矿伴生关系最为紧密。钛铁矿遭受不同程度的氧化蚀变,蚀变程度较低时,颗粒中间部位仍保留为钛铁矿,蚀变强烈时,则完全转变为含钛铀矿物,没有钛铁矿的残留(图 4)。黏土矿物在铀成矿过程中主要起吸附作用,岩心红外光谱扫描(图 5)及 X 射线衍射(朱强等, 2020)结果均表明,在彭阳铀矿主要含铀矿段

洛河组,黏土矿物以伊利石+伊/蒙混层为主,基本未见蒙脱石,高岭石在含矿段明显升高,绿泥石在含矿段略有降低。

### 3.4 烃类流体参与成矿

鄂尔多斯盆地是我国重要的油气勘查区,彭阳铀矿正处于长庆油田地块,二叠、三叠、侏罗纪等均有烃源岩分布,面积广且稳定,目前发现的铀含矿层主体均位于烃源岩层上部,这就为烃类流体上涌进入铀矿层提供了地质基础。在彭阳铀矿洛河组新鲜岩心中可见到油斑、油迹等现象,洛河组灰色砂岩解析气分析结果显示气体成分主要为  $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{C}_3\text{H}_8$ 、 $\text{H}_2$  及  $\text{CO}_2$  等,激光拉曼光谱分析也证实了含铀岩系烃类确有甲烷组分存在。在砂岩胶结物中蓝色荧光照下的黄绿色荧光和紫色荧光照下的蓝色荧光,两种荧光均呈弥散状且分布形态一致,这可作为有机流体注入碎屑颗粒裂隙中的有力证据。对彭阳地区含矿砂岩烃类饱和烃开展色谱-质谱分析结果显示,含铀岩系砂岩烃类的饱和烃中正构烷烃既有  $\text{C}_{15} \sim \text{C}_{22}$  低碳数的无环类异戊二烯烷烃,也有  $\text{C}_{23} \sim \text{C}_{40}$  高碳数的无环类异戊二烯烷烃,且丰度很高(Si et al., 2021)。

值得注意的是,研究区含矿层洛河组主要是风成沉积,局部存在沙漠湖等沉积环境,且有机质含量极低,从生烃成熟度的角度来看还处于未



a—沥青铀矿与黄铁矿共生,周边发育绿泥石、蒙脱石等黏土矿物; b—星点状沥青铀矿周边发育锐钛矿、蒙脱石、伊/蒙混层; c—沥青铀矿发育在蚀变锐钛矿的边部; d—铀矿物呈颗粒状发育在碎屑颗粒间,边部环绕伊蒙混层; e—星点状沥青铀矿分布于细晶柱状磷灰石的周围; f—星点状沥青铀矿围绕锐钛矿边缘产出。Ant—锐钛矿; Ap—磷灰石; Chl—绿泥石; Kfs—钾长石; I/S—伊/蒙混层; Pit—沥青铀矿; Py—黄铁矿; Qtz—石英; Sme—蒙脱石。

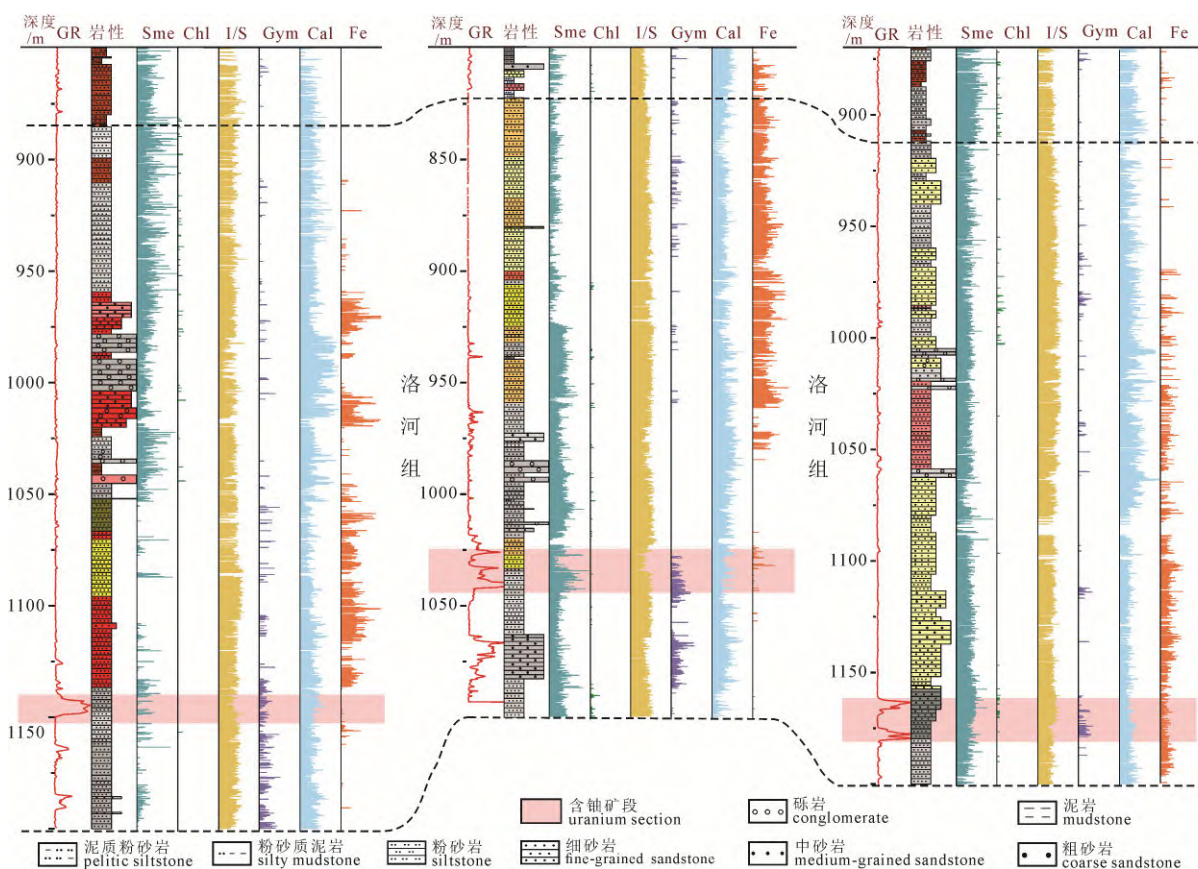
a—pitchblende associated with pyrite, with clay minerals such as Chl and Sme developed around it; b—pitchblende surrounded by anatase, Sme and I/S; c—pitchblende on the edge of altered anatase; d—granular uranium-bearing minerals between the detrital particles; the edge is adsorbed to the I/S; e—stellate pitchblende distributed around fine columnar apatite; f—stellate pitchblende around the edge of anatase.

Ant—anatase; Ap—apatite; Chl—Chlorite; Kfs—K-feldspar; I/S—illite/smectite mixed layer;

Pit—pitchblende; Py—pyrite; Qtz—quartz; Sme—smectite.

图 4 铀矿物的微观特征

Fig. 4 Microscopic characteristics of uranium minerals



GR—自然伽马; Sme—蒙脱石; Chl—绿泥石; I/S—伊蒙混层; Gym—石膏; Cal—碳酸盐; Fe—铁氧化物。

GR—natural gamma; Sme—smectite; Chl—chlorite; I/S—illite/smectite; Gym—gypsum; Cal—carbonate; Fe—iron oxide.

图 5 彭阳铀矿的蚀变矿物分布趋势图(基于岩心光谱扫描技术)

Fig. 5 Trend of altered mineral distribution in Pengyang Uranium Deposit (based on core spectral mapping)

成熟期, 不具备生烃条件, 所以地层中的烃类物质均来源于外部。鄂尔多斯盆地西南部的烃源岩主要分布在二叠系山西组(付金华等, 2019; 蒙晓灵等, 2021)、三叠系延长组(刘联群等, 2010; 兰朝利等, 2014)及侏罗系延安组(韩宗元等, 2007)等, 根据含铀岩系烃类的生物标志物参数结合研究区不同层位烃源岩热演化与沉积环境特征, 认为研究区含铀岩系烃类应该主要来自三叠系延长组烃源岩。

### 3.5 成矿年龄

以往确定砂岩型铀矿成矿年龄主要使用全岩 U-Pb 法, 但是这种方法测试的是碎屑锆石的年龄, 而砂岩型铀成矿是后期成因, 故该方法并不能真实反映铀成矿年龄。Zhao et al.(2021)尝试利用微区原位 fs-LA-MC-ICP-MS 对彭阳铀矿粒度较大的铀矿物开展了年龄测定, 结果为 0.4 Ma。另外, 在鄂尔多斯盆地宁东地区, 铀石单矿物定年结果为 10.7 ~ 3.9 Ma(Wang et al., 2018), 毗邻彭阳铀矿的国家湾铀矿床的沥青铀矿单矿物微区定年结果也在 10 Ma 左右。上述结果反映了该地区铀成矿年龄集中在上新世甚至更新世, 是在研究区黄土地貌形成后成矿, 该成矿时代对应构造事件的间歇期, 尤其 10 Ma 以后的喜山期构造运动(Chen et al., 2021)。纵观整个

盆地, 铀成矿时代多为 110 ~ 6.2 Ma(陈祖伊等, 2010)。因此, 中新世到更新世应该是彭阳铀矿乃至鄂尔多斯盆地西南部砂岩型铀成矿的主要时期。

## 4 成矿模式及找矿标志

砂岩型铀成矿过程的主导因素包括富铀的源区、流体循环系统、厚大的砂体、还原性介质及有利成矿部位等(刘红旭等, 2015; 焦养泉等, 2015, 2018; 苗培森等, 2017; Jin et al., 2019)。彭阳铀矿位于鄂尔多斯盆地三级构造单元天环向斜内, 向斜西翼是贺兰山褶皱冲断带, 构造变形强烈, 东翼为陕北斜坡, 构造变形较弱。向斜内不同层位都发育有一些小型褶皱和断层, 褶皱比较宽缓且幅度小, 断层以正断层为主, 断距不大、延伸短。下白垩统沉积地层倾向较平缓, 一般为  $1^{\circ} \sim 5^{\circ}$ , 有利于富氧含铀流体长期顺层流动, 形成铀成矿有利的补-径-排体系。

研究区深部铀矿赋矿层位洛河组为中细砂岩和砾岩, 洛河组总体埋深大于 700 m, 砂体累计厚度 50~400 m, 并偶夹有薄层泥岩, 发育巨型交错层理, 粒度韵律层理显著和区域红层为特征, “泥-砂-泥”结构明显; 浅部赋矿层位罗汉洞组的岩性

为细粒砂岩、泥质粉砂岩、泥岩与薄层钙质砂岩互层，罗汉洞组埋深总体小于 500 m，砂体累计厚度 20~100 m，局部夹泥岩、含钙质结核，形成了有利于铀成矿的“泥-砂-泥”结构。洛河组广泛发育风成沙漠沉积，罗汉洞组发育三角洲相沉积，洛河组沉积相的变化反映沉积环境由典型的干旱沙漠环境逐渐过渡到相对潮湿的沙漠环境，在罗汉洞组期间，又彻底转变为湖相为主体的沉积环境(谢渊等, 2005)。上述研究表明鄂尔多斯盆地西南缘铀成矿地质条件非常有利，找矿目的层含矿性好，找矿潜力较大。但由于风成沉积体系中缺乏大规模的还原剂，不利于砂岩型铀成矿，受含矿层位深度及含矿层本身严重缺乏还原性介质的影响，长期以来白垩统洛河组、罗汉洞组未被当作铀矿找矿目的层。

结合前述彭阳铀矿地质特征及成矿规律，进一步梳理了成矿要素(表 1)，成矿要素也可作为找矿标志。按照各成矿要素与矿床成矿作用关联的重要性，将成矿要素划分为必要要素和重要要素两类。

通过对砂岩型铀矿的成矿要素的研究梳理，结合砂岩型铀成矿过程中盆地构造演化、物源铀源、构造触发、流体蚀变等因素，建立了彭阳铀矿成矿模式，也可以作为勘查找矿的预测模型(图 6)，这一成矿过程可以简称为流体耦合成矿作用的成矿模式。总体来看，彭阳铀矿的成矿过程可以概括为两个阶段：原始预富集阶段和流体耦合成矿阶段。在原始预富集阶段，即晚侏罗世—早白垩世，鄂尔多斯盆地整体处于坳陷沉降阶段，沉积中心向西迁移，在研究区发育大规模风成沉积，形成洛河组巨厚的红色氧化砂层，同时，盆地的沉降也使得深部烃源岩开始生烃、成藏。晚白垩世以来，盆地西缘遭受强烈的构造挤压，发育大规模的褶皱及逆冲断层，形成西缘冲断带和天环坳陷。褶皱冲断造成盆缘六

盘山脉的隆升，在大气降水的持续淋滤和萃取下，盆地西缘六盘山及周缘岩石中的铀沿着渗透性极好的洛河组风成砂岩顺层向盆地中心迁移，为研究区洛河组提供了稳定的富氧含铀流体。在流体耦合作用阶段，断裂构造的发育触发了深部油气藏的大规模排烃事件，沿断裂上涌。来自于盆缘山脉的富氧含铀水在洛河组深大断裂周边与深层含烃流体相遇，富氧含铀流体中的铀离子与烃类流体中的还原剂发生强烈的氧化还原作用，导致铀沉淀成矿。古近纪、新近纪以来的构造运动，进一步诱发深大断裂的活化，加剧了流体的运移和相互作用，导致铀的大规模沉淀、巨量富集。该成矿模式及上述找矿标志对鄂尔多斯盆地西南缘的砂岩型铀矿找矿工作具有重要指示意义。

表 1 彭阳地区铀成矿要素一览表  
Table 1 Uranium metallogenic elements in Pengyang area

| 成矿要素   | 内容                                             | 重要性 |
|--------|------------------------------------------------|-----|
| 铀源     | 蚀源区大面积分布富铀变质岩或花岗岩，且铀易浸出                        | 必要  |
| 含矿层位   | 深部：洛河组；浅部：罗汉洞组                                 | 必要  |
| 构造     | 可为铀成矿提供宽缓的构造斜坡带或深部构造断裂附近                       | 必要  |
| 沉积建造   | 具有发育稳定、厚度适中、渗透性好的容矿砂体，其上下发育有稳定的泥岩隔挡层，形成泥-砂-泥结构 | 必要  |
| 沉积相    | 洛河组沙漠相发育区、环华池组三角洲相发育区                          | 重要  |
| 层间氧化作用 | 层间氧化作用时间长、发育规模大、分带性好                           | 必要  |
| 铀矿化信息  | 自然伽玛异常强度越高、厚度越大，异常高值越集中区                       | 重要  |
| 油气还原作用 | 铀成矿之前或成矿同期，油气主要沿断裂渗出，为铀成矿作用提供还原容量              | 重要  |
| 水文地质   | 补-径-排体系完善                                      | 必要  |

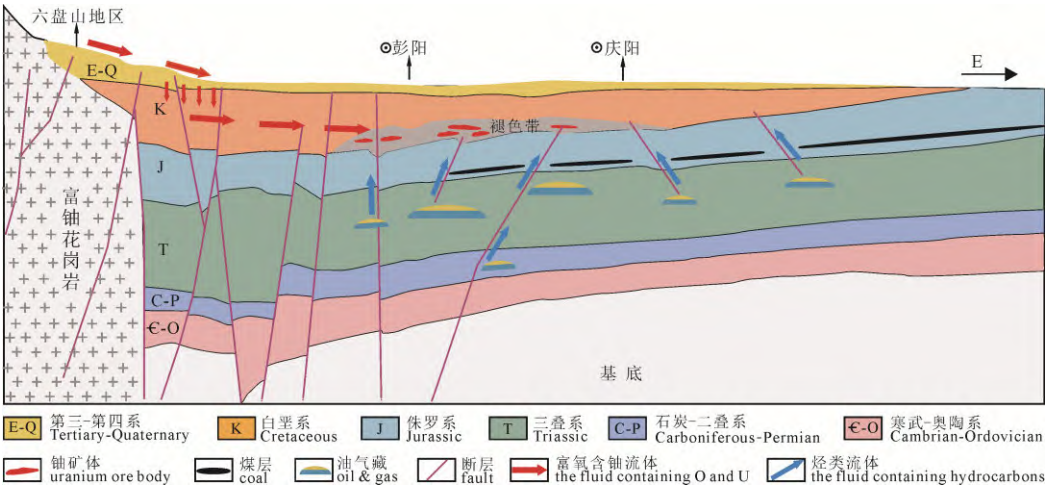


图 6 彭阳铀矿成矿模式简图  
Fig. 6 Schematic diagram of metallogenic model of Pengyang uranium deposit

## 5 结论

(1)彭阳铀矿处于鄂尔多斯盆地西南缘, 周边发育深大断裂、拥有厚大砂体及稳定的“泥-沙-泥”结构, 对砂岩型铀成矿极为有利。

(2)研究区有稳定的铀源供给, 浅层富含铀流体顺层流动、下渗, 深部烃类流体沿断裂上升至洛河组, 导致红色砂岩褪色蚀变, 为铀成矿提供还原剂, 中新世到更新世的构造活动进一步触发了富含铀流体和深层含烃流体的耦合作用, 最终导致铀成矿。

(3)通过分析铀源、含矿层位、构造、沉积建造、沉积相、层间氧化作用、铀矿化信息、油气还原作用、水文地质等成矿要素, 综合地质特征、成矿规律等内容, 进而建立了彭阳铀矿成矿模式, 对鄂尔多斯盆地西南缘砂岩型铀矿找矿及其它地区相似地质条件下找矿具有重要指示意义。

## Acknowledgements:

This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 92162212), National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFC0604200), China Geological Survey (No. DD20221678), and International Geoscience Program (No. IGCP675).

## 参考文献:

- 陈刚, 孙建博, 周立发, 章辉若, 李向平, 李向东. 2007. 鄂尔多斯盆地西南缘中生代构造事件的裂变迹年龄记录[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 37(S1): 110-118.
- 陈祖伊, 陈戴生, 古抗衡, 王亚婧. 2010. 中国砂岩型铀矿容矿层位、矿化类型和矿化年龄的区域分布规律[J]. 铀矿地质, 26(6): 321-330.
- 邓军, 王庆飞, 高帮飞, 黄定华, 杨立强, 徐浩, 周应华. 2005. 鄂尔多斯盆地演化与多种能源矿产分布[J]. 现代地质, 19(4): 538-545.
- 冯晓曦, 金若时, 司马献章, 李建国, 赵华雷, 陈印, 陈路路, 汤超, 奥琮, 王心华. 2017. 鄂尔多斯盆地东胜铀矿田铀源示踪及其地质意义[J]. 中国地质, 44(5): 993-1005.
- 付金华, 牛小兵, 谈卫东, 冯胜斌, 梁晓伟, 辛红刚, 尤源. 2019. 鄂尔多斯盆地中生界延长组长 7 段页岩油地质特征及勘探开发进展[J]. 中国石油勘探, 24(5): 601-614.
- 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(4): 697-709.
- 韩宗元, 苗建宇, 布占琦. 2007. 鄂尔多斯盆地镇原地区中生界延长组、延安组烃源岩地球化学特征对比分析[J]. 现代地质, 21(3): 532-537.
- 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(1): 189-205.
- 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.

- 金若时, 滕雪明. 2022. 中国北方砂岩型铀矿大规模成矿作用[J]. 华北地质, 45(1): 42-57.
- 兰朝利, 王建国, 周晓峰, 代金友, 杨明慧, 崔志员. 2014. 彭阳油田延长组长 3 段砂岩储层质量控制因素研究[J]. 岩石学报, 30(6): 1828-1840.
- 李建国, 张博, 金若时, 司庆红, 苗培森, 里宏亮, 曹民强, 魏佳林, 陈印. 2020. 钱家店铀矿床表生含氧含铀流体与深层酸性含烃流体的耦合成矿作用——来自岩心蚀变矿物填图的证据[J]. 大地构造与成矿学, 44(4): 576-589.
- 李文辉, 高锐, 王海燕, 李英康, 李洪强, 侯贺晟, 熊小松, 郭晓玉, 徐啸, 邹长桥, 梁宏达. 2017. 六盘山断裂带及其邻区地壳结构[J]. 地球物理学报, 60(6): 2265-2278.
- 刘池洋, 赵红格, 谭成仟, 王健强. 2006. 多种能源矿产赋存与盆地成藏(矿)系统[J]. 石油与天然气地质, 27(2): 131-142.
- 刘池洋, 赵红格, 王锋, 陈洪. 2005. 鄂尔多斯盆地西缘(部)中生代构造属性[J]. 地质学报, 79(6): 737-747.
- 刘红旭, 张晓, 丁波, 潘澄雨. 2015. 伊犁盆地南缘砂岩型铀矿成矿模式与找矿方向[J]. 铀矿地质, 31(S1): 198-205, 212.
- 刘联群, 刘建平, 李勇, 魏敏珠. 2010. 鄂尔多斯盆地彭阳地区侏罗系延安组油气成藏主控因素分析[J]. 地球科学与环境学报, 32(3): 263-267.
- 蒙晓灵, 艾庆琳, 王金成, 卞晓燕, 朱长荣, 安文宏, 谢珊, 夏守春, 蒋培明. 2021. 鄂尔多斯盆地庆阳气田深层致密砂岩气藏成藏条件[J]. 天然气勘探与开发, 44(1): 104-110.
- 苗培森, 陈印, 程银行, 赵华雷, 陈路路, 李建国, 金若时, 汤超, 俞初安, 杨涛, 胡永兴. 2020. 中国北方砂岩型铀矿深部探测新发现及其意义[J]. 大地构造与成矿学, 44(4): 563-575.
- 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.
- 乔大伟, 旷红伟, 柳永清, 彭楠, 刘燕学, 许欢, 崔立伟, 李佐强. 2020. 鄂尔多斯盆地风成含铀岩系的识别——以 XX 井为例[J]. 大地构造与成矿学, 44(4): 648-666.
- 孙建博, 陈刚, 章辉若, 白国娟, 李向东, 李向平. 2006. 鄂尔多斯盆地中生代构造事件的峰值年龄及其沉积响应[J]. 西北地质, 39(3): 91-96.
- 王飞飞, 刘池洋, 邱欣卫, 郭佩, 张少华, 程相虎. 2017. 世界砂岩型铀矿探明资源的分布及特征[J]. 地质学报, 91(9): 2021-2046.
- 王贵玲, 刘志明, 蔺文静. 2004. 鄂尔多斯周缘地质构造对地热资源形成的控制作用[J]. 地质学报, 78(1): 44-51.
- 王琳琳. 2014. 煤储层节理发育非均质性评价的构造动力学方法及其应用——以鄂东临汾地区为例[D]. 徐州: 中国矿业大学.
- 王苗, 吴柏林, 李艳青, 刘池阳, 郝欣, 刘明义, 张婉莹, 李琪, 姚璐航, 张效瑞. 2022. 鄂尔多斯盆地深部富铀烃源岩提供铀源可能性的实验研究[J]. 地球科学, 47(1): 224-239.
- 吴柏林, 张婉莹, 宋子升, 寸小妮, 孙莉, 罗晶晶, 李艳青, 程相虎, 孙斌. 2016. 鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿地质地球化学特征及其成因意义[J]. 地质学报, 90(12): 3393-3407.
- 谢渊, 王剑, 江新胜, 李明辉, 谢正温, 罗建宁, 侯光才, 刘方, 王永和, 张茂省, 朱桦, 王德潜, 孙永明, 曹建科. 2005. 鄂尔多斯盆地白垩系沙漠相沉积特征及其水文地质意义[J].

沉积学报, 23(1): 73-83.

- 薛春纪, 薛伟, 康明, 涂其军, 杨友运. 2008. 鄂尔多斯盆地流体动力学过程及其砂岩型铀矿化[J]. 现代地质, 22(1): 1-8.
- 杨俊杰. 2002. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 杨晓勇, 凌明星, 赖小东, 孙卫, 刘池洋. 2009. 鄂尔多斯盆地东胜-黄龙地区砂岩型铀矿矿物赋存状态研究[J]. 地质学报, 83(8): 1167-1177.
- 张博, 李建国, 苗培森, 赵龙, 司庆红, 里宏亮, 曹民强, 朱强, 魏佳林. 2021. 开鲁盆地钱家店铀矿床的赋存状态及成因探讨[J]. 地质调查与研究, 44(2): 40-48.
- 张嘉冕, 张玉龙. 2022. 甘肃陇东地区国家湾砂岩型铀矿床特征及控矿因素[J]. 甘肃地质, 31(01): 41-45.
- 张金带, 李友良, 简晓飞. 2008. 我国铀资源勘查状况及发展前景[J]. 中国工程科学, 10(1): 54-60.
- 张宇龙, 范洪海, 贺锋, 刘鑫扬, 李卫红, 李亚锋, 衣龙升, 杨梦佳, 贾翠. 2018. 鄂尔多斯盆地西南缘下白垩统铀成矿条件分析[J]. 铀矿地质, 34(4): 193-200.
- 赵华雷, 李建国, 苗培森, 陈路路, 张博, 朱强, 司庆红, 陈印, 胡永兴, 郭虎. 2020. 鄂尔多斯盆地西南缘彭阳铀矿区矿物学研究及其对区域成矿的指示[J]. 大地构造与成矿学, 44(4): 607-618.
- 朱宏权, 张哨楠. 2004. 鄂尔多斯盆地北部上古生界储层成岩作用[J]. 天然气工业, 24(2): 29-32.
- 朱强, 李建国, 苗培森, 司庆红, 赵华雷, 肖鹏, 张博, 陈印, 赵博文. 2019. 鄂尔多斯盆地西南部洛河组储层特征和深部铀成矿地质条件[J]. 地球科学与环境学报, 41(6): 675-690.
- 朱强, 李建国, 苗培森, 张博, 赵华雷, 司庆红, 陈印, 肖鹏. 2020. 鄂尔多斯盆地镇原地区洛河组黏土矿物特征及找铀意义[J]. 大地构造与成矿学, 44(4): 619-632.
- 朱欣然, 刘立, 贾士璐, 李睿祺, 宫昀迪. 2018. 鄂尔多斯盆地白垩系洛河组风成砂岩地球化学与物源区特征: 以靖边县龙洲乡露头为例[J]. 世界地质, 37(3): 702-711.

## References:

- AKHTAR S, YANG Xiao-yong, PIRAJNO F. 2017. Sandstone type uranium deposits in the Ordos Basin, Northwest China: A case study and an overview[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 146: 367-382.
- CHEN Yin, LI Jian-guo, MIAO Pei-sen, CHEN Lu-lu, ZHAO Hua-lei, WANG Cong. 2021. U-Pb ages and Hf isotopes of detrital zircons from the Cretaceous succession in the southwestern Ordos Basin, Northern China: Implications for provenance and tectonic evolution[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 219: 104896.
- CHEN Yin, LI Jian-guo, MIAO Pei-sen, CHEN Lu-lu, ZHAO Hua-lei, WANG Cong, YANG Jun. 2022a. Relationship between the tectono-thermal events and sandstone-type uranium mineralization in the southwestern Ordos Basin, Northern China: Insights from apatite and zircon fission track analyses[J]. Ore Geology Reviews, 143: 104792.
- CHEN Yin, MIAO Pei-sen, LI Jian-guo, JIN Ruo-shi, ZHAO Hua-lei, CHEN Lu-lu, WANG Cong, YU Hao-yu, ZHANG Xiao-ru. 2022b. Association of sandstone-type uranium mineralization in the northern China with tectonic movements and hydrocarbons[J]. Journal of Earth Science, 33(2): 289-307.
- CHEN Gang, SUN Jian-bo, ZHOU Li-fa, ZHANG Hui-ruo, LI Xiang-ping, LI Xiang-dong. 2007. Fission Track Age Records of Mesozoic Tectonic Events in The Southwestern Margin of Ordos Basin[J]. Science in China, 37(S1): 110-118(in Chinese).
- CHEN Zu-yi, CHEN Dai-sheng, GU Kang-heng, WANG Ya-jing. 2010. The regional distribution regularities of ore-hosting horizon, deposit type and mineralization age of China's sandstone-hosted uranium deposits[J]. Uranium Geology, 26(6): 321-330(in Chinese with English abstract).
- DENG Jun, WANG Qing-fei, GAO Bang-fei, HUANG Ding-hua, YANG Li-qiang, XU Hao, ZHOU Ying-hua. 2005. Evolution of Ordos Basin and Its Distribution of Various Energy Resources[J]. Geoscience, 19(4): 538-545(in Chinese with English abstract).
- FENG Xiao-xi, JIN Ruo-shi, SIMA Xian-zhang, LI Jian-guo, ZHAO Hua-lei, CHEN Yin, CHEN Lu-lu, TANG Chao, AO Cong, WANG Xin-hua. 2017. Uranium source analysis and its geological significance to Uranium metallogenic evolution in Dongsheng Uranium Ore Field[J]. Geology in China, 44(5): 993-1005(in Chinese with English abstract).
- FU Jin-hua, NIU Xiao-bing, DAN Wei-dong, FENG Sheng-bin, LIANG Xiao-wei, XIN Hong-gang, YOU Yuan. 2019. The geological characteristics and the progress on exploration and development of shale oil in Chang7 Member of Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 24(5): 601-614(in Chinese with English abstract).
- HAN Xiao-zhong, WU Zhao-jian, LIN Zhong-xiang, JIANG Zhe, HU Hang, YIN Dong-fa, JI Hui, LI Zi-nan. 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[J]. Geotectonica et Metallogenia, 44(4): 697-709(in Chinese with English abstract).
- HAN Zong-yuan, MIAO Jian-yu, BU Zhan-qi. 2007. The Comparative Study on Organic Geochemical Characters of the Mesozoic Source Rocks in T<sub>3y</sub> and J<sub>2y</sub> of Zhenyuan in Ordos Basin[J]. Geoscience, 21(3): 532-537(in Chinese with English abstract).
- IAEA. 2020. Uranium Resources: Production and Demand[R]. IAEA.
- JAIRETH S, MCKAY A, LAMBERT I. 2008. Association of large sandstone uranium deposits with hydrocarbons[J]. AusGeo News, 89: 1-6.
- JIAO Yang-quan, WU Li-qun, PENG Yun-biao, RONG Hui, JI Dong-min, MIAO Ai-sheng, LI Hong-liang. 2015. Sedimentary-tectonic setting of the deposition-type uranium deposits forming in the Paleo-Asian tectonic domain, North China[J]. Earth Science Frontiers, 22(1): 189-205(in Chinese with English abstract).
- JIN Ruo-shi, TENG Xue-ming. 2022. Large scale sandstone-type uranium mineralization in northern China[J]. North China Geology, 45(1): 42-57(in Chinese with English abstract).
- JIN Ruo-shi, YU Reng-an, YANG Jun, ZHOU Xiao-xi, TENG Xue-ming, WANG Shan-bo, SI Qing-hong, ZHU Qiang, ZHANG Tian-fu. 2019. Paleo-environmental constraints on

- uranium mineralization in the Ordos Basin: Evidence from the color zoning of U-bearing rock series[J]. *Ore Geology Reviews*, 104: 175-189.
- LAN Chao-li, WANG Jian-guo, ZHOU Xiao-feng, DAI Jin-you, YANG Ming-hui, CUI Zhi-yuan. 2014. Impacts on sandstone reservoir quality of the Third Member of Upper Triassic Yanchang Formation, Penyang oilfield of Ordos Basin, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1828-1840(in Chinese with English abstract).
- LI Jian-guo, ZHANG Bo, JIN Ruo-shi, SI Qing-hong, MIAO Pei-sen, LI Hong-liang, CAO Min-qiang, WEI Jia-lin, CHEN Yin. 2020. Uranium Mineralization of Coupled Supergene Oxygen-Uranium Bearing Fluids and Deep Acidic Hydrocarbon Bearing Fluids in the Qianjiadian Uranium Deposit, Kailu Basin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(4): 576-589(in Chinese with English abstract).
- LI Wen-hui, GAO Rui, WANG Hai-yan, LI Ying-kang, LI Hong-qiang, HOU He-sheng, XIONG Xiao-song, GUO Xiao-yu, XU Xiao, ZOU Chang-qiao, LIANG Hong-da. 2017. Crustal structure beneath the Liupanshan fault zone and adjacent regions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(6): 2265-2278(in Chinese with English abstract).
- LIU Chi-yang, ZHAO Hong-ge, TAN Cheng-qian, WANG Jian-qiang. 2006. Occurrences of multiple energy mineral deposits and mineralization/reservoiring system in the basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 27(2): 131-142(in Chinese with English abstract).
- LIU Chi-yang, ZHAO Hong-ge, WANG Feng, CHEN Hong. 2005. Attributes of the Mesozoic Structure on the West Margin of the Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 737-747(in Chinese with English abstract).
- LIU Hong-xu, ZHANG Xiao, DING Bo, PAN Cheng-yu. 2015. Metallogenic Model and Prospecting Oreintation of Sandstone Type Uranium Deposits in the Southern Margin of Yili Basin[J]. *Uranium Geology*, 31(S1): 198-205, 212(in Chinese with English abstract).
- LIU Lian-qun, LIU Jian-ping, LI Yong, WEI Min-zhu. 2010. Main Factors Influencing Oil Reservoir in Jurassic Yan'an Formation in Pengyang Area, Ordos Basin[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 32(3): 263-267(in Chinese with English abstract).
- MENG Xiao-ling, AI Qing-lin, WANG Jin-cheng, BIAN Xiao-yan, ZHU Chang-rong, AN Wen-hong, XIE Shan, XIA Shou-chun, JIANG Pei-ming. 2021. Reservoir-forming conditions of deep tight sandstone gas reservoirs, Qingyang gasfield, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 44(1): 104-110(in Chinese with English abstract).
- MIAO Pei-sen, CHEN Yin, CHENG Yin-hang, ZHAO Hua-lei, CHEN Lu-lu, LI Jian-guo, JIN Ruo-shi, TANG Chao, YU Reng-an, YANG Tao, HU Yong-xing. 2020. New Deep Exploration Discoveries of Sandstone-type Uranium Deposits in North China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(4): 563-575(in Chinese with English abstract).
- MIAO Pei-sen, JIN Ruo-shi, LI Jian-guo, ZHAO Hua-lei, CHEN Lu-lu, CHEN Yin, SI Qing-hong. 2020. The first discovery of a large sandstone-type uranium deposit in aeolian depositional environment[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 94(2): 583-584.
- MIAO Pei-sen, LI Jian-guo, TANG Chao, JIN Ruo-shi, CHENG Yin-hang, ZHAO Long, XIAO Peng, WEI Jia-lin. 2017. Metallogenic condition and prospecting orientation for deep sandstone-hosted uranium deposits in Mesozoic-Cenozoic basins of North China[J]. *Geological Bulletin of China*, 36(10): 1830-1840(in Chinese with English abstract).
- QIAO Da-wei, KUANG Hong-wei, LIU Yong-qing, PENG Nan, LIU Yan-xue, XU Huan, CUI Li-wei, LI Zuo-qiang. 2020. Identification of Eolian Sandstone in Cretaceous Uraniferous Sandstone in Ordos Basin, China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(4): 648-666(in Chinese with English abstract).
- REN Yi-su, YANG Xiao-yong, MIAO Pei-sen, HU Xiao-wen, CHEN Yin, CHEN Lu-lu, ZHAO Hua-lei. 2022. Mineralogical and geochemical research on Pengyang deposit: A peculiar eolian sandstone-hosted uranium deposit in the southwest of Ordos basin[J]. *Ore Geology Reviews*, 141: 104571.
- SI Qing-hong, LI Jian-guo, MIAO Pei-sen, ZHANG Chao, ZHU Qiang, ZHAO Hua-lei. 2021. Characteristics and mechanism of hydrocarbon alteration of faded sandstone in the uranium-bearing Luohe Formation, Pengyang area, southwestern Ordos Basin[J]. *Ore Geology Reviews*, 139: 104500.
- SUN Jian-bo, CHEN Gang, ZHANG Hui-ruo, BAI Guo-juan, LI Xiang-dong, LI Xiang-ping. 2006. Peak Ages and Sedimentary Responses of the Mesozoic-Cenozoic Tectonic Events in Ordos Basin[J]. *Northwestern Geology*, 39(3): 91-96(in Chinese with English abstract).
- WANG Fei-fei, LIU Chi-yang, QIU Xin-wei, GUO Pei, ZHANG Shao-hua, CHENG Xiang-hu. 2017. Characteristics and Distribution of World's Identified Sandstone-type Uranium Resources[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(9): 2021-2046(in Chinese with English abstract).
- WANG Gui-ling, LIU Zhi-ming, LIN Wen-jing. 2004. Tectonic Control of Geothermal Resources in the Peripheral of Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 44-51(in Chinese with English abstract).
- WANG Lin-lin. 2014. Evaluation of Joint Development Heterogeneity of Coal Reservoir Based on Structural Dynamics and Its Application: An Example from Linfen, the Eastern Margin of the Ordos Basin[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology(in Chinese with English abstract).
- WANG Miao, WU Bai-lin, LI Yan-qing, LIU Chi-yang, HAO Xin, LIU Ming-yi, ZHANG Wan-ying, LI Qi, YAO Lu-hang, ZHANG Xiao-rui. 2022. Experimental Study on Possibility of Deep Uranium-Rich Source Rocks Providing Uranium Source in Ordos Basin[J]. *Earth Science*, 47(1): 224-239(in Chinese with English abstract).
- WANG Fei-fei, LIU Chi-yang, NIU Hai-qing, ZHOU Ning-chao, LI Xiu-hua, LUO Wei, ZHANG Dong-dong, ZHAO Yan. 2018. In-situ chemical age of the sandstone-hosted uranium deposit in Ningdong area on the western margin of the Ordos Basin, North China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(1): 406-407.
- WU Bai-lin, ZHANG Wan-ying, SONG Zi-sheng, CUN Xiao-ni, SUN Li, LUO Jing-jing, LI Yan-qing, CHENG Xiang-hu,

- SUN Bin. 2016. Geological and Geochemical Characteristics of Uranium Minerals in the Sandstone-type Uranium Deposits in the North of Ordos Basin and Their Genetic Significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(12): 3393-3407(in Chinese with English abstract).
- XIE Yuan, WANG Jian, JIANG Xin-sheng, LI Ming-hui, XIE Zheng-wen, LUO Jian-ning, HOU Guang-cai, LIU Fang, WANG Yong-he, ZHANG Mao-sheng, ZHU Hua, WANG De-qian, SUN Yong-ming, CAO Jian-ke. 2005. Sedimentary Characteristics of the Cretaceous Desert Facies in Ordos Basin and Their Hydrogeological Significance[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(1): 73-83(in Chinese with English abstract).
- XUE Chun-ji, XUE Wei, KANG Ming, TU Qi-jun, YANG You-yun. 2008. The Fluid Dynamic Processes and Its Uranium Mineralization of Sandstone-type in the Ordos Basin, China[J]. *Geoscience*, 22(1): 1-8(in Chinese with English abstract).
- YANG Jun-jie. 2002. Tectonic Evolution and Oil-Gas Reservoirs Distribution in Ordos Basin[M]. Beijing: China Petroleum Industry Press(in Chinese).
- YANG Xiao-yong, LING Ming-xing, LAI Xiao-dong, SUN Wei, LIU Chi-yang. 2009. Uranium Mineral Occurrence of Sandstone-Type Uranium Deposits in the Dongsheng-Huanglong Region, Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(8): 1167-1177(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Bo, LI Jian-guo, MIAO Pei-sen, ZHAO Long, SI Qing-hong, LI Hong-liang, CAO Min-qiang, ZHU Qiang, WEI Jia-lin. 2021. The occurrence state and origin of uranium in Qianjiadian uranium deposit, Kailu Basin[J]. *Geological Survey and Research*, 44(2): 40-48(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Jia-mian, ZHANG Yu-long. 2022. Characteristics and Ore-Controlling Factors of Guojiawan Sandstone Type Uranium Deposit in East Region of Gansu Province[J]. *Gansu Geology*, 31(1): 41-45(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Jin-dai, LI You-liang, JIAN Xiao-fei. 2008. Situation and Development Prospect of Uranium Resources Exploration in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 10(1): 54-60(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Tian-fu, CHENG Xian-yu, WANG Shao-yi, MIAO Pei-sen, AO Cong. 2022. Middle Jurassic-Early Cretaceous drastic paleoenvironmental changes in the Ordos Basin: Constraints on sandstone-type uranium mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 142: 104652.
- ZHANG Zi-long, FAN Hong-hai, HE Feng, LIU Xin-yang, LI Wei-hong, LI Ya-feng, YI Long-sheng, YANG Meng-jia, JIA Cui. 2018. Analysis of Sandstone Type Uranium Metallogenic Conditions of Lower Cretaceous in the Southwest Margin of Ordos Basin[J]. *Uranium Geology*, 34(4): 193-200(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Hua-lei, AO Cong, LI Jian-guo, CHEN Lu-lu, ZHANG Bo, MIAO Pei-sen, SI Qing-hong, ZHU Qiang, YU Reng-an, CHEN Yin. 2022. Occurrence and mechanism of uranium enrichment with a unique eolian sedimental environment in the Pengyang uranium deposit, Ordos Basin[J]. *Ore Geology Reviews*, 141: 104641.
- ZHAO Hua-lei, LI Jian-guo, MIAO Pei-sen, CHEN Lu-lu, ZHANG Bo, ZHU Qiang, SI Qing-hong, CHEN Yin, HU Yong-xing, GUO Hu. 2020. Mineralogical Study of Pengyang Uranium Deposit and its Significance of Regional Mineral Exploration in Southwestern Ordos Basin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(4): 607-618(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Hua-lei, LI Jian-guo, XIAO Zhi-bin, MIAO Pei-sen, SI Qing-hong, CHEN Lu-lu, YU Reng-an, CHEN Yin. 2021. Determination of formation age(0.14 Ma) of the Pengyang sandstone-type uranium deposit in the Ordos Basin, China: Using pitchblende in situ femtosecond LA-MC-ICP-MS method[J]. *China Geology(English Edition)*, (4): 747-748.
- ZHAO Jun-feng, LIU Chi-yang, HUANG Lei, ZHANG Dong-dong, WANG Dong, WANG Di. 2020. Paleogeography reconstruction of a multi-stage modified intra-cratonic basin—a case study from the Jurassic Ordos Basin, Western North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 190: 104191.
- ZHAO Jun-feng, LIU Chi-yang, WANG Xiao-mei, ZHANG Can. 2009. Migration of Depocenters and Accumulation Centers and its Indication of Subsidence Centers in the Mesozoic Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(2): 278-294.
- ZHU Hong-quan, ZHANG Shao-nan. 2004. Diageneses of Upper Paleozoic Reservoirs in North Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 24(02): 29-32(in Chinese with English abstract).
- ZHU Qiang, LI Jian-guo, MIAO Pei-sen, SI Qing-hong, ZHAO Hua-lei, XIAO Peng, ZHANG Bo, CHEN Yin, ZHAO Bo-wen. 2019. Reservoir Characteristics of Luohe Formation and Metallogenic Geological Conditions of Deep Uranium in the Southwestern Margin of Ordos Basin, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 41(6): 675-690(in Chinese with English abstract).
- ZHU Qiang, LI Jian-guo, MIAO Pei-sen, ZHANG Bo, ZHAO Hua-lei, SI Qing-hong, CHEN Yin, XIAO Peng. 2020. Characteristics of Clay Minerals in the Luohe Formation in Zhenyuan Area, Ordos Basin, and its Uranium Prospecting Significance[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(4): 619-632(in Chinese with English abstract).
- ZHU Qiang, LI Jian-guo, WEN Si-bo, LI Guang-yao, YU Reng-an, MIAO Pei-sen, ZHANG Bo. 2021. Alteration, uranium occurrence state, and enrichment mechanism of the Cretaceous Luohe Formation, southwestern Ordos Basin, western China[J]. *Ore Geology Reviews*, 139: 104486.
- ZHU Xin-ran, LIU Li, JIA Shi-ju, LI Rui-qi, GONG Yun-di. 2018. Geochemical and provenance characteristics of eolian sandstone of Cretaceous Luohe Formation in Ordos Basins: an example from outcrop in Longzhou, Jingbian[J]. *Globe Geology*, 37(3): 702-711(in Chinese with English abstract).