

鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿成矿地质条件和 关键控矿要素分析

俞初安^{1, 2, 3)}, 金若时^{2, 3)}, 李彤^{2, 3)}, 杨彤旭^{2, 3)}, 朱强^{2, 3)}, 唐永香⁴⁾

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2) 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170;
3) 中国地质调查局铀矿地质重点实验室, 天津 300170; 4) 天津地热勘查开发设计院, 天津 300250

摘要: 鄂尔多斯盆地是我国北方重要的产铀盆地之一, 具有优越的成矿地质条件和找矿前景。本文通过总结该盆地的砂岩型铀矿调查研究成果, 系统梳理铀矿成矿地质条件, 探讨关键控矿要素和找矿潜力。结果表明, 鄂尔多斯盆地外部蚀源区铀源丰富, 北部造山带地质体的 Th/U 比值和 ΔU 铀迁移量相对最大, 对盆内的铀源贡献率最高; 盆缘斜坡带发育的微隆起带构造控制了铀矿床的空间定位, 断裂构造对盆地西缘和西南缘地区的铀成矿发挥了控制和改造作用; 古气候、沉积环境决定了由盆地东南部向西北部地区, 含铀层位由直罗组下段下亚段逐渐演变成直罗组下段上亚段, 表现了明显的迁移规律性; 直罗组下段的煤线和碳质泥岩发育特征制约了铀矿层的空间分布; 铀矿体主要发育在辫状河主河道边部和辫状河三角洲分流河道, 优先富集于有机质丰富、非均质性强、岩性多变的部位。在此基础上, 建立了 6 个关键控矿要素和相关找矿判别指标, 针对盆内 5 个铀矿(矿化)集中区分析了砂岩型铀矿的找矿潜力, 提出了下一步找矿方向。

关键词: 砂岩型铀矿; 铀源条件; 控矿构造; 关键控矿要素; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: P571 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.122902

Analysis of Metallogenic Condition and Key Ore-controlling Factor of Sandstone-hosted Uranium Deposits in the Ordos Basin

YU Reng-an^{1, 2, 3)}, JIN Ruo-shi^{2, 3)}, LI Tong^{2, 3)}, YANG Tong-xu^{2, 3)}, ZHU Qiang^{2, 3)}, TANG Yong-xiang⁴⁾

1) *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;*
2) *Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170;*
3) *Key Laboratory of Uranium Geology, China Geological Survey, Tianjin 300170;*
4) *Tianjin Geothermal Exploration Institute, Tianjin 300250*

Abstract: The Ordos Basin is an important uranium-bearing basin in the north of China. It has superior metallogenic geological conditions and prospecting potential. Based on the summary of investigation and research results of sandstone-type uranium deposits in the basin, we systematically analyzed the geological conditions of uranium mineralization. Moreover, herein we discuss the key ore control factors and prospecting potential. The results showed that the outer source area of the Ordos Basin is rich in uranium, and the high thorium/uranium ratio and uranium migration of the northern orogenic belt geological body indicated that it provides the greatest contribution rate to the uranium source in the basin. The micro uplift structure developed in the slope zone of the margin controls of the basin, the spatial positioning of the uranium deposits, and the fault structure control and reform uranium mineralization in the western and southwestern margins of the basin. The paleoclimate and sedimentary environment indicated that, from the southeast to the northwest region of the basin, the uranium-bearing horizon gradually evolved from a lower sub member of the lower Zhiluo Formation to an upper sub member of the lower Zhiluo Formation, showing evident migration regularity. The development characteristics

本文由国家自然科学基金委重点支持项目(编号: 92162212)和中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20230045 和 DD20221678-05)联合资助。

收稿日期: 2022-11-12; 改回日期: 2022-12-24; 网络首发日期: 2023-01-02。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 俞初安, 男, 1980年生。硕士, 教授级高级工程师, 硕士生导师。从事铀矿勘查与研究。E-mail: 121181748@qq.com。

of the coal line and carbonaceous mudstone in the lower part of the Zhiluo Formation restricted the spatial distribution of the uranium deposits. Uranium ore bodies primarily developed at the edge of the braided river main channel and the braided river delta distributary channel, with preferential enrichment in areas rich in organic matter and with strong heterogeneity and variable lithology. On this basis, six key ore control factors and related prospecting discrimination indices were established. The prospecting potential of sandstone-type uranium deposits was analyzed for five uranium ore (mineralization) concentration areas in the basin, and the next prospecting orientation was proposed.

Key words: sandstone-type uranium deposit; uranium source conditions; ore controlling structure; key ore controlling factors; Ordos Basin

鄂尔多斯盆地是我国重要的煤炭、油气和铀矿等多能源共存盆地之一(Jiao et al., 2016; 刘池洋等, 2016)。进入 21 世纪以来, 核地质系统、原国土资源部中央地质勘查基金管理中心和地质调查局等不同行业部门在该盆地取得了一系列重要铀矿找矿成果(张金带等, 2010, 2015; Jin et al., 2018; 金若时, 2019; 李子颖等, 2021), 提交了皂火壕砂岩型铀矿、纳岭沟铀矿、大营等多个大型、特大型铀矿床以及塔然高勒、宁东、黄陵、泾川等多个新发现矿产地, 为鄂尔多斯盆地成矿理论研究和铀资源基地的建设提供了重要基础。

无论是国内还是国外, 砂岩型铀矿成矿地质条件的研究主要都是从沉积环境、成矿流体、控矿构造以及还原介质等几个方面出发。前人已针对鄂尔多斯盆地典型铀矿床的成矿地质条件和成矿规律开展了大量研究, 建立了不同矿床特有的成矿模型, 但主要是针对某个矿床或某个矿带开展相关的研究, 如盆地东北部铀矿床地质特征和成矿地质条件方面(杨建新和陈安平, 2008; 王飞飞, 2013; 孙莉, 2016; Jiao et al., 2016; Zhang et al., 2018)、盆地南部铀矿床成矿条件和找矿预测方面(鲁宝龙, 2013; 胡俊华和郭科锋, 2017)、西北部铀矿床层间氧化特征方面(龚斌利等, 2008; 郭宏伟和戴明建, 2012; 高贺伟, 2018)、西南缘铀矿床成矿地质条件方面(张宇龙等, 2018; Miao et al., 2020), 对整个盆地尺度的铀矿成矿地质条件缺少相关系统的总结对比研究。随着煤铀兼探、油铀兼探工作的快速推进, 大量的煤田、油田勘查资料被广泛应用于铀矿找矿和成矿理论研究, 为成矿地质条件研究从以单个矿床为单元向以盆地为单元进行综合分析研究提供了重要资料支撑。

本文以鄂尔多斯盆地 2012 年以来的铀矿调查成果和以往煤田、油田勘查成果资料为基础, 结合前人的铀矿勘查成果和理论认识, 从整个盆地的视角, 对盆地内不同铀矿集区的控矿地质条件和它们的差异性进行梳理分析, 总结鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿的形成环境和铀矿体形成的主控因素, 进而探讨铀矿成矿潜力和找矿方向, 以期对后续的找矿部署和理论研究有所裨益。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地是一个由中、古生界组成轴向近南北的大型向斜式沉积盆地, 南北长约 640 km, 东西宽约 400 km(Zhang et al., 2019)。向斜轴部偏西, 东西翼极不对称, 东翼为缓倾单斜, 西翼由几个南北向延伸的断裂褶皱带组成。根据其内部结构、构造特征可分为六个次级构造单元, 分别为伊盟隆起、渭北隆起、西缘逆冲带、天环坳陷、晋西挠褶带和陕北斜坡(Li and Li, 2011; Akhtar et al., 2017)(图 1)。其中, 伊盟隆起位于盆地北缘, 内部缺失了下古生界地层, 两端由边缘断层和大青山前新生代河套断陷盆地连接, 新生代河套盆地断陷下沉, 将阴山与伊盟隆起分开, 形成现今伊盟隆起的构造面貌; 渭北隆起位于盆地南缘, 隆起南部则以断块向汾渭断陷盆地呈阶梯状降落, 其发育的地层具有两端古老、中间年轻的特征(Yue et al., 2020); 西缘逆冲构造带为一南北向展布的狭长地区, 以冲断褶皱作用为主, 成排成带分布, 表现为一系列的西倾冲断层; 天环坳陷为一个东翼缓西翼陡的不对称性向斜, 在古生代为西倾斜坡, 晚侏罗世才开始坳陷, 早白垩世时成为盆地的沉积中心和沉降中心, 接受了巨厚沉积; 晋西挠褶带整体上为一西倾单斜, 东临吕梁隆起, 向西过渡为陕北斜坡, 其北段走向近南北向, 南段转为西南走向; 伊陕斜坡位于盆地中部, 分布面积较大, 总体呈向西倾斜的平缓单斜, 区内发育幅度较小的鼻状构造(金若时等, 2019)。

鄂尔多斯盆地具有“双重”基底的结构特征, 即盆地结晶基底和直接基底。盆地盖层由中、新生界陆相碎屑岩组成, 以中生界为主, 各地层在横向和纵向上发育差异较大, 整个盆地在中生代时期表现为东部抬升, 西部相对下陷的特征。三叠系、侏罗系和下白垩统是盆地沉积的主体, 侏罗系地层自下而上分为延安组、直罗组、安定组, 为盆地重要的含煤和含铀地层, 在盆地东部一带呈南北向带状出露; 下白垩统地层自下而上为宜君组、洛河组、环河华池组、罗汉洞组、泾川组, 在盆地北部广泛出露; 古近系和新近系在盆地内零星出露, 主要分布

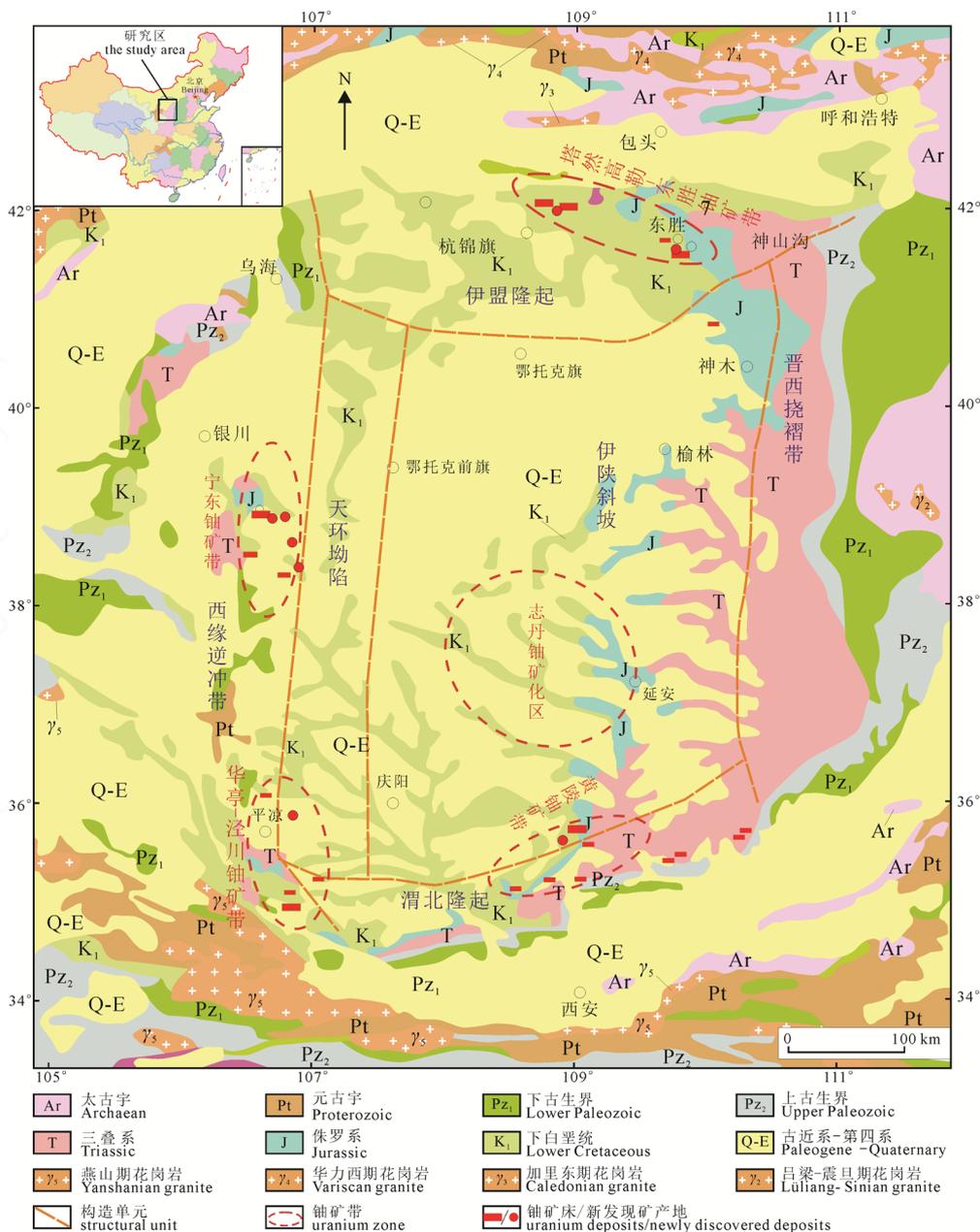


图 1 鄂尔多斯盆地地质简图(据孙立新等, 2017; 金若时等, 2019 修改)

Fig. 1 Geological sketch of the Ordos Basin (modified from SUN et al., 2017; JIN et al., 2019)

于周缘的外围盆地中。

中侏罗统直罗组作为盆地的重要含铀层位, 根据其岩性变化特征, 可将其分为上段(J_{2z}^2)和下段(J_{2z}^1)两段, 下段又可进一步细分为上(J_{2z}^{1-2})、下(J_{2z}^{1-1})两个亚段(焦养泉等, 2015)。直罗组沉积时经历了一个完整的湖盆发育、扩张、萎缩演化过程。直罗组下段沉积早期, 为该期盆地的初始发育阶段, 盆地周缘地貌高差较大, 早期以辫状河沉积为主, 岩性以灰色、灰绿色中粗粒砂岩为主; 中晚期以曲流河沉积为主, 岩性以灰绿色中细粒砂岩、棕红色泥岩、粉砂岩为主。直罗组地层平行不整合于下伏延安组煤系地层之上, 由于盆地边缘的安定组遭受不同程度剥蚀, 上覆的下白垩统地层与直罗组呈侵蚀不整合接触。

下白垩统洛河组作为含铀层位之一, 沉积相以风成沉积为主, 发育沙丘、沙席沉积, 局部见沙漠湖及早谷沉积(Si et al., 2021), 其岩性整体为紫红色-棕红色巨厚层中细粒砂岩, 夹薄层含砾砂岩、粉砂岩和泥岩等。

2 含铀岩系分布特征

鄂尔多斯盆地已发现的砂岩型铀矿床(点)主要分布在盆内周缘, 可大致分为东北缘塔然高勒—东胜铀矿带、西缘宁东铀矿带、东南缘黄陵铀矿带、西南缘华亭—泾川铀矿带等四个铀矿(化)集区, 盆内的主要含铀层位为中侏罗统直罗组, 次要层位为延安组。另外近几年在盆地西南部泾川油田区下白垩统洛河组、罗汉洞组中发现了多处工业矿体(苗培

森等, 2020), 盆地中部的志丹、定边油田区侏罗系安定组中发现了铀矿化线索(汤超等, 2021), 进一步拓宽了铀矿找矿空间(图 2)。盆内主要典型砂岩型铀矿床和新发现铀矿产地的含矿特征见表 1。

东北缘塔然高勒—东胜铀矿带主要由皂火壕、纳岭沟和大营等大型、特大型铀矿床及塔然高勒新发现矿产地组成。这些铀矿床具有相似的区域铀成矿条件及铀成矿规律(李西得等, 2016; 易超等,

2018; 李瑞霜等, 2020)。铀矿体主要分布于中侏罗统直罗组下段灰色砂岩和绿色砂岩的过渡部位。该铀矿带东部的铀矿体埋藏较浅, 平均 200 m 左右, 向西逐渐加深, 西部大营铀矿床含矿目的层埋深大部分在 600 m 以上(图 2a)。

西缘宁东铀矿带主要由瓷窑堡、惠安堡中小型铀矿床(龚斌利等, 2008; 郭庆银等, 2010; 荆国强等, 2017)及石槽村、麦垛山、金家渠、羊肠湾 4 个新发

表 1 盆地主要典型铀矿床和新发现矿产地特征统计(数据来源于张金带等, 2015; 金若时等, 2019)
Table 1 Characteristics of the main typical uranium deposits and newly discovered ore areas in the Ordos Basin (data from ZHANG et al., 2015; JIN et al., 2019)

地区	典型铀矿床、新发现矿产地	构造位置	含矿层位	岩性、岩相	矿体规模	矿体埋深/m
东北缘	大营	伊盟隆起	直罗组 J _{2z}	河流相浅灰色粗碎屑岩建造	特大型规模矿床	600~750
	纳岭沟		直罗组 J _{2z}	河流相浅灰色粗碎屑岩建造	特大型规模矿床	315~630
	皂火壕		直罗组 J _{2z}	河流相浅灰色粗碎屑岩建造	特大型规模矿床	60~220
	呼斯梁		直罗组 J _{2z}	河流相浅灰色粗碎屑岩建造	大型规模矿床	<350
	塔然高勒		直罗组 J _{2z}	河流相浅灰色粗碎屑岩建造	特大型规模矿产地	440~680
	乌定布拉格		直罗组 J _{2z}	河流相浅灰色粗碎屑岩建造	小型规模矿产地	500~630
	乌兰西里		直罗组 J _{2z}	河流相浅灰色粗碎屑岩建造	小型规模矿产地	50~400
东南缘	双龙	渭北隆起	直罗组 J _{2z}	河流相浅灰色粗碎屑岩建造	大型矿床	200~500
	黄陵	渭北隆起	直罗组 J _{2z}	河流相浅灰色粗碎屑岩建造	中型规模矿产地	350~500
西缘	瓷窑堡	西缘逆冲带	直罗组 J _{2z}	河流相浅灰色粗碎屑岩建造	大型规模矿床	160~400
	惠安堡		直罗组 J _{2z}	河流相浅灰色粗碎屑岩建造	中型规模矿床	120~450
	羊肠湾		直罗组+延安组 J _{2z} +J _{2y}	河流相浅灰色粗碎屑岩建造	大型规模矿产地	150~500
	金家渠		直罗组+延安组 J _{2z} +J _{2y}	河流相浅灰色粗碎屑岩建造	中型规模矿产地	190~520
	石槽村		直罗组+延安组 J _{2z} +J _{2y}	河流相浅灰色粗碎屑岩建造	中型规模矿产地	200~500
	麦垛山		直罗组 J _{2z}	河流相浅灰色粗碎屑岩建造	中型规模矿产地	250~520
西南缘	国家湾	天环坳陷	泾川组 K _{1j}	河流沉积相志丹群泾川组杂色砂岩和泥岩	中型规模矿床	<350
	彭阳	天环坳陷	洛河组 K _{1l}	风成沉积相志丹群洛河组红色-杂色碎屑建造	大型规模矿产地	700~1100
中部	定边	陕北斜坡	安定组 J _{2a}	湖泊相沉积紫灰色泥灰岩	矿化点	700~800

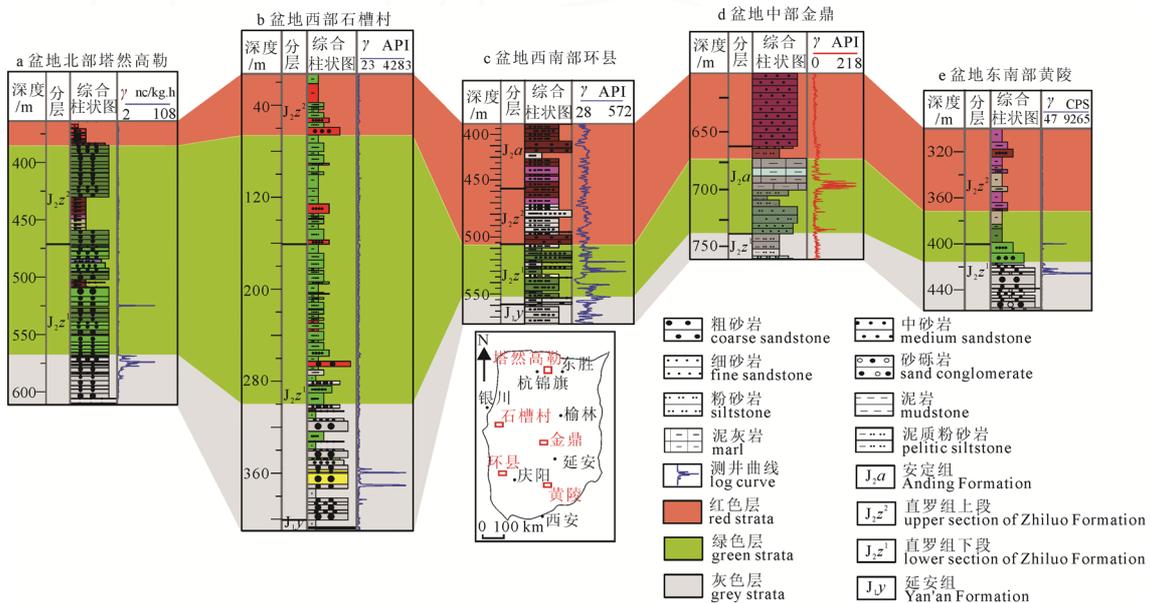


图 2 鄂尔多斯盆地铀矿区含矿地层分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of ore-bearing strata in uranium deposits of the Ordos Basin

现矿产地等组成。受南北向逆冲断褶带构造控制,区内铀矿化总体呈南北向展布,矿体产在直罗组下段及延安组地层砂体中。平面上,铀矿(化)体发育于背斜翼部的氧化-还原过渡带内,矿体形态呈带状,走向与背斜轴向一致;垂向上,分布了多层铀矿体,主要赋存于中侏罗统直罗组底部灰白色粗砂岩和延安组上部砂岩中(图 2b)。

西南缘华亭—泾川铀矿带主要由陇县国家湾(901)铀矿床、华亭(943)铀矿床(张宇龙等, 2018)、环县矿化点以及彭阳新发现矿产地组成(Miao et al., 2020; 俞初安等, 2020; Zhao et al., 2022)。其中,环县铀矿化点位于天环拗陷和西缘逆冲带交汇部位,矿体平面上呈不规则蛇曲状分布,垂向上呈多层分布于直罗组下段底部,各矿层间距较小(图 2c);彭阳铀矿产地位于天环拗陷内,铀矿体主要产于下白垩统洛河组中,岩性主要为风成沉积的浅红色、浅黄色、灰色细-中粒长石砂岩,发育大型楔状交错层理、板状层理等特征。矿体发育 1-3 层,在洛河组的顶、底和中部均有产出,矿层埋深大于 700 m,最大厚度可达 50 m。

东南缘黄陵—北极铀矿带主要由双龙铀矿床、焦坪和庙湾矿点以及黄陵新发现矿产地等组成,它们主要分布于渭北隆起西北部构造斜坡带(Zhang et al., 2021; Sun et al., 2021; Yu et al., 2022),含矿层位为直罗组下段。直罗镇—店头镇一带矿体底板埋深较小(一般为 100~300 m),地层倾角一般小于 10°,砂体厚度最大,达 50~80 m;在柳县地区,砂体形态呈朵形分布,厚度为 20~50 m;边缘其它地区的砂体较小,厚约 5~20 m。黄陵一带的铀矿体埋深在 400 m 左右,矿体厚度较稳定,宽度相对较小,矿体形态以板状、似层状为主(图 2e)。

中部志丹一定边铀矿化区位于陕北斜坡带,安定组为含矿层位,岩性以浅灰色泥灰岩为主,夹紫灰色泥岩、浅灰色砂岩。高自然伽马异常层主要分布在安定组顶部,岩性主要为泥灰岩。金鼎地区安定组泥灰岩放射性异常规模大、横向连通性好,异常埋深 200~1000 m,异常值为 240~1838 API,异常厚度 0.5~8.5 m(图 2d)。异常高值对应沉积中心,越靠近当时的湖盆中央,铀异常越发育(汤超等, 2021)。

3 成矿地质条件

鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿的形成,受到铀源、构造、流体、气候、有机质、沉积相等多个条件的共同制约,缺少某一项将难以成矿或限制成矿的规模。

3.1 铀源条件

目前,铀成矿物质的来源主要有三种观点。一种认为是直接源于周缘造山带富铀的花岗质岩石,

经淋滤富集成矿;第二种是初始富集铀的含铀岩系,经流体的萃取、迁移、沉淀成矿;第三种是认为深部流体带来了深部含铀物质(金若时和滕雪明, 2022)。

我们根据铀元素地球化学以及钍铀比值能够综合分析出铀元素的迁移量,从而能够判别蚀源区是否为铀矿床提供初始的铀源。从鄂尔多斯盆地周缘铀元素地球化学分布特征可以看出(图 3),北部阴山—狼山、西部阿拉善和南部秦岭地区均显示了较高的 U 元素异常,其中盆地南缘相对具有更高的铀元素总量。地壳中铀和钍有着密切的伴生关系,正常情况下 $Th/U=3.3\sim 3.5$,如果 $Th/U<2$ 则可认为本区存在铀矿化, $Th/U>8\sim 10$ 则可认为发生了钍矿化。在氧化条件下蚀源区的铀被淋滤、迁移,而 Th 被保留下来。因为现代钍含量与原始钍含量相近(甚至相等),所以通过现测的铀、钍含量可以求得原始铀含量,并计算出蚀源区铀的迁移量($\Delta U=[(U-U_0)/U_0\times 100\%]$,U 为现测铀含量, U_0 为原始铀含量)。

由图 4 可以看出,盆地北部的乌拉山—狼山地区的不同地质体总体显示了相对较高的 U 丰度值,蚀源区内分布有大面积的太古宙、早元古代结晶岩系和不同时代的花岗岩类岩体,铀地球化学数据的平均值为 2.48×10^{-6} ,Th/U 比值为 9.36, ΔU 为-38%;盆地西侧阿拉善地区出露地质体的铀地球化学数据平均值为 2.61×10^{-6} ,Th/U 比值为 4.48, ΔU 为-22%;盆地南侧秦岭地区出露地质体的铀地球化学数据平均值为 2.43×10^{-6} ,Th/U 比值为 5.53, ΔU 为-38%;盆地东侧吕梁山地区的铀地球化学数据平均值为 2.58×10^{-6} ,Th/U 比值为 7.48, ΔU 为-37%。

因此,由上述可以看出,盆地周缘四个地区地质体的铀丢失均较为明显,盆地北部造山带地质体的 Th/U 比值和 ΔU 铀迁移量相对最高,西侧阿拉善地区 Th/U 比值和铀迁移量偏小。说明盆地北部阴山造山带对盆内的铀源贡献率最高。铀源只是作为控制铀成矿作用的条件之一,只有当铀源供给的含矿流体运移方向与物源供给的成岩物质运移方向相同时,往往更加有利于大型层间氧化带型砂岩铀矿床的形成(焦养泉等; 2015),物源的方向和铀源供给的方向是否一致对形成大矿至关重要。前人对直罗组下段的物源研究(雷开宇等, 2017; Yu et al., 2021)认为,盆地东北部铀矿区的物源主要来自北部造山带,西部铀矿区的物源来自北部造山带和西侧阿拉善陆块,南部的物源来自北部造山带、西侧阿拉善陆块以及南部秦岭造山带。因此,目前只有鄂尔多斯盆地北部的铀源和物源都是同一个方向,而其他的铀矿集区铀源和物源来自多个方向,也就形成了流体场面貌迥异的新成矿系统,从而制约了大规模铀集区的形成。

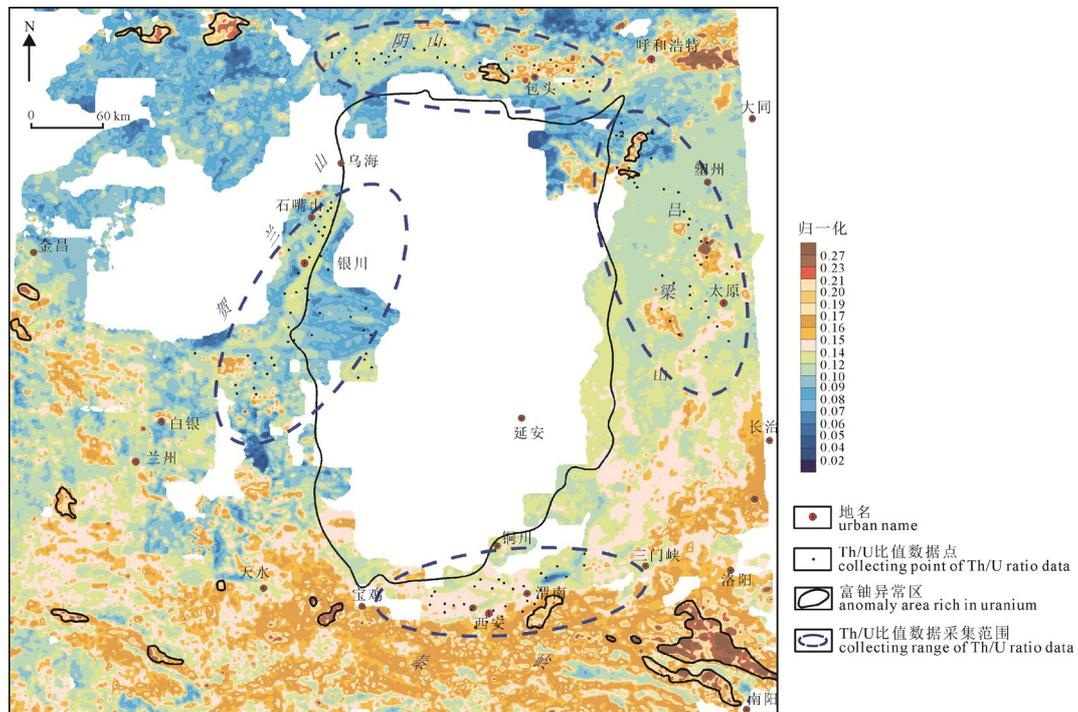
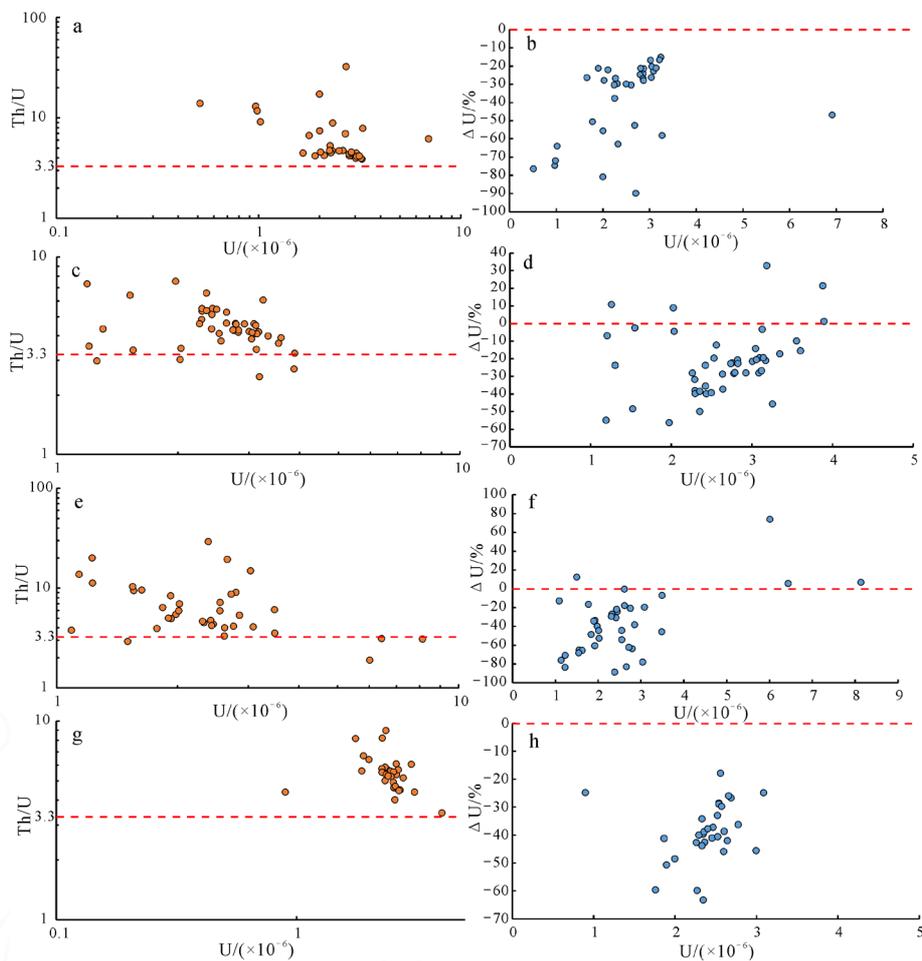


图3 鄂尔多斯盆地及周缘铀地球化学图(据金若时等, 2019 修改)

Fig. 3 Geochemistry map of uranium in the Ordos Basin and surrounding areas (modified from JIN et al., 2019)



a, b—阴山地区; c, d—贺兰山地区; e, f—秦岭地区; g, h—吕梁地区。

a, b—Yinshan area; c, d—Helan Mountain area; e, f—Qinling area; g, h—Lüliang area.

图4 鄂尔多斯盆地周边造山带 Th/U 和铀迁移分析(数据来源于天津地调中心内部资料)

Fig. 4 Analysis map of the thorium/uranium ratio and uranium migration in orogenic belts around the Ordos Basin (data from the China Geological Survey, Tianjin Center)

另外, 前人通过对鄂尔多斯盆地侏罗系和白垩系的伽马曲线进行初步对比统计, 认为直罗组砂岩沉积期发生了明显的铀元素预富集作用, 直罗组砂体存在自身铀被迁出现象, 可能构成重要的铀源(刘鑫扬等, 2022)。

因此, 鄂尔多斯盆地的外部和内部铀源条件都非常丰富。“源”只是作为初始条件, 能否顺利的经历“运”和“储”, 铀储层作为运载的“管道”是否通畅, 成矿物质运移方向和古水流场方向是否一致将极大制约成矿作用的规模。

3.2 控矿构造条件

鄂尔多斯盆地总体为一构造相对稳定的大型克拉通盆地, 但边缘构造活动明显, 因燕山运动构造影响发生了明显的褶皱和断裂(程银行等, 2020)。

盆地边缘斜坡带各处有利于铀成矿的条件基本相同, 铀矿床的空间定位受隆起带等正向构造控制较为明显。正向构造包括平缓产出的斜坡带上的隆起部分, 褶皱构造中的背斜构造(有时被剥蚀为构造窗), 断裂构造引起的牵引背斜、挠曲构造, 断块构造中的上升断块等(古抗衡和陈祖伊, 2010)。鄂尔多斯盆地的铀矿床或矿点并未连续出现, 而是呈间隔性地分布在构造斜坡带的某个部位。原因在于斜坡带各段分布了不同的次级构造, 导致了铀矿化空间分布规模和形态的差异。

3.2.1 盆地东北缘东胜微隆起控矿特征

鄂尔多斯盆地东北部铀矿区位于北西—南东延伸近 120 km 的东胜隆起构造斜坡带南侧, 分布了大营、塔然高勒、纳岭沟、柴登、阿不亥和皂火

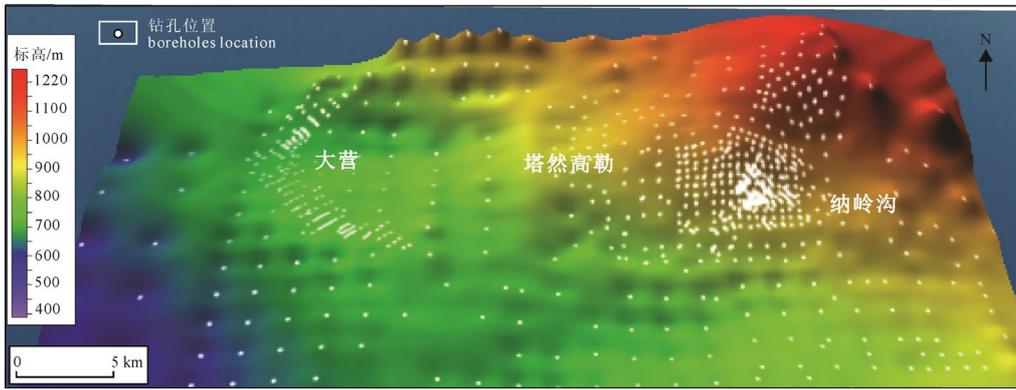
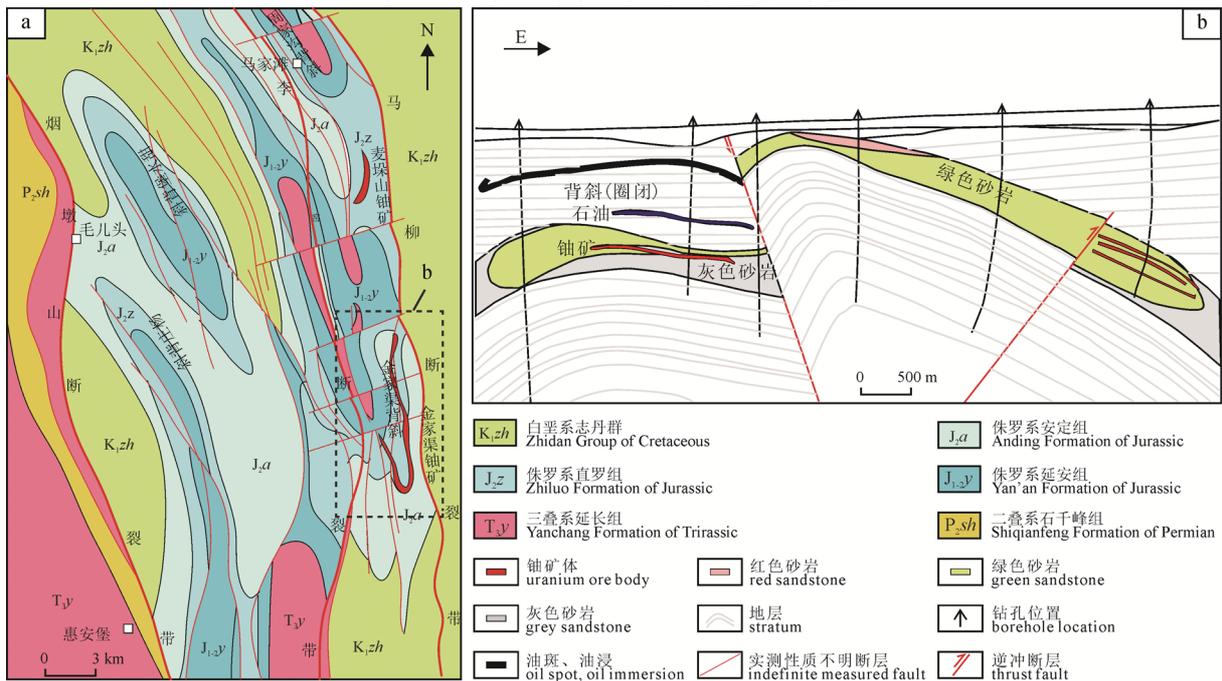


图 5 鄂尔多斯盆地东北部直罗组底板标高及钻孔分布图

Fig. 5 Floor elevation of the Zhiluo Formation and the distribution of boreholes in the northeast area of the Ordos Basin



a—鄂尔多斯盆地西缘宁东地区构造分布图; b—金家渠铀矿区钻孔剖面图。

a—structural distribution map of Ningdong area on the western edge of Ordos basin; b—borehole profile map of Jinjiaqu uranium mining area.

图 6 鄂尔多斯盆地西缘宁东地区构造与铀矿分布关系

Fig. 6 Relationship between geological structure and uranium ore distribution in the Ningdong area on the western margin of the Ordos Basin

壕等不同规模的铀矿床。其中大营、塔然高勒和纳岭沟铀矿床的矿体产出相对集中,已经初步形成世界级的铀矿田。从直罗组底板标高等值线图(图 5)可以看出,三个铀矿床均位于北西向隆起带西南侧,矿区的分布受隆起构造(窗)控制。其中,纳岭沟铀矿分布于近北东次级背斜带的东南侧,塔然高勒铀矿位于北东向微隆起带的西侧,而大营铀矿床相对远离东部微隆起带,呈弧状沿斜坡带外侧分布。因此,盆地东北缘北西向东胜微隆起带控制了三个铀矿床总体呈南西或近东西方向的空间展布。

伊盟隆起带的隆升始于晚白垩世,而鄂尔多斯盆地北部铀矿床主体成矿时间为白垩纪—古近纪晚期(刘汉彬等, 2012; Zhang et al., 2018; 张婉莹等, 2019)。说明铀成矿作用在伊盟隆起带形成之前已经发生,但是隆起带的构造隆升对之前形成的铀矿体重新改造迁移,同时这个地质时期由北东向南西倾斜的构造格局,造就了大气氧化降水在重力驱动力作用下流入盆地内砂岩层中,与盆内的还原物质相互作用形成铀的富集沉淀。

3.2.2 盆地西缘断褶控矿特征

鄂尔多斯盆地西缘宁东冲断带由一系列走向 NNW 和近 SN 向的宽缓褶皱群及与之相伴的断层组成,延伸长度大于 50 km。其中,石槽村铀矿位于鸳鸯湖背斜东翼,麦垛山和金家渠铀矿分别位于周家沟背斜和金家渠背斜东翼(图 6)。铀矿体走向与褶皱构造方向基本一致,含矿地层为延安组顶部 2 煤上部和直罗组下段。因此,盆地西缘近南北向的断褶带控制了羊肠湾、石槽村等 4 个新发现矿产地的产出。

宁东地区周边发育深断裂,因断裂的切割作用,使得深部还原性流体向上运移,当含氧含铀地下水迁移至断裂附近时,被还原沉淀并富集形成铀矿床。同时因断裂上隆和剥蚀作用,可将原来的埋深较大的矿体抬升甚至剥露地表,有利于地浸开采。而断层发展的晚期,因受盆地 NE 向挤压,使得断裂体系发生左旋走滑,造成断层东盘矿体向北错动,遭受剥蚀破坏,使得铀矿化体连续性相对较差。

3.2.3 盆地东南缘渭北隆起控矿特征

鄂尔多斯盆地东南缘黄陵—北极铀矿区位于渭北隆起的西侧(图 7),渭北隆起是一个向北西倾斜、倾角平缓的单斜构造。该隆起带长 40 km,宽 13 km,中部焦坪—庙湾东侧剥蚀,出露三叠系构造天窗。中侏罗统直罗组下段下亚段是该地区主要含矿层位,出露于天窗西侧。其中,黄陵—双龙铀矿分布于渭北隆起带的北倾伏端,矿体规模达到中大型;而彬县、北极、旬邑等铀矿点、矿化点主要位于渭北

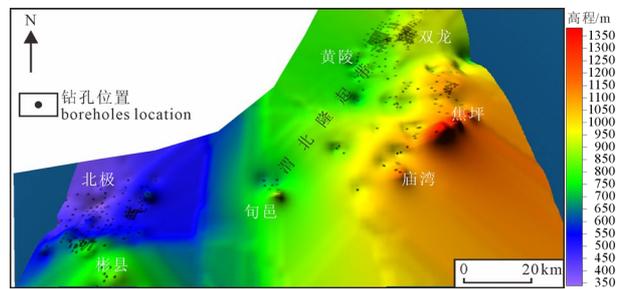


图 7 鄂尔多斯盆地东南部直罗组底板标高等及钻孔分布图
Fig. 7 Floor elevation of the Zhiluo Formation and the distribution of boreholes in the southeast area of the Ordos Basin

隆起带最南端的彬旬凹陷。因此,渭北隆起控制了双龙矿床和焦坪、北极等铀矿点呈北东向的空间展布。

早白垩世末之前,渭北隆起为鄂尔多斯盆地的一部分,以沉降沉积为主,尚未隆起(肖晖等, 2013);晚白垩世,受控于秦岭造山带中晚燕山期的抬升而整体隆升,该隆起带的隆升时间大致与鄂尔多斯盆地的消亡时间同步;始新世以来,又经历了断块翘倾剥蚀阶段(王建强等, 2015)。黄陵、双龙等铀矿床的成矿时代主要为始新世(金若时等, 2019),渭河断陷盆地形成于始新世。综上可以推测始新世以来东南缘铀矿区的外部铀源主要来自于渭北隆起而不是秦岭地区,秦岭地区地质体可能为直罗组地层始新世之前的铀预富集提供了初始铀源。因此,呈北东向分布的渭北隆起斜坡带成为了砂岩型铀成矿的有利场所,喜山期的抬升冷却和南缘断陷使得铀矿得以保存和富集沉淀。

3.2.4 盆地西南缘断裂凹槽控矿特征

鄂尔多斯盆地西南缘彭阳矿区的含铀储层为下白垩统洛河组,它与其它地区不同的是,含铀储层的沉积相为风成沉积。从图 8 可以看出,洛河组底部在空间位置上剧烈起伏,在研究区的北部尤其明显,而南部相对平缓。矿区已发现的工业钻孔均落在洛河组底板的凹陷或斜坡的局部凹陷处。洛河组风成沉积时,砂体易在沉积时期形成的凹陷部位富集。在矿区的北部和中部,存在多处凹陷,凹陷的方向也反映了北西—南东断裂构造控制的特征,矿体明显反映出沟槽断裂控矿的特征。原理是含铀氧化水在沟槽部位流速缓慢,增加了化学反应的时间,有利于铀矿的还原吸附富集;同时断裂沟通了下部油气藏,使富含烃类和硫化物的轻质组分沿断裂向上逸散,既可以丰富断裂周边的还原介质,也能增加断裂周边的保矿能力(万军等, 2020)。

因此,鄂尔多斯盆地前三叠纪时期“内静外动”的构造演化过程,造就了稳定大型构造斜坡带和盆内含矿建造的形成。而三叠纪以来,直罗组等含矿建造受到多期次中小幅度的差异构造抬升运动,形

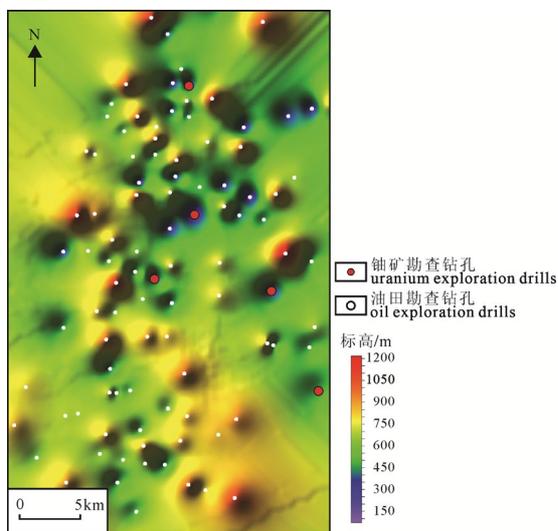


图 8 鄂尔多斯盆地西南缘洛河组底板标高及钻孔分布图
Fig. 8 Floor elevation of the Luohe Formation and the distribution of boreholes in the southwest area of the Ordos Basin

成适度的掀斜或微隆起等正向构造, 掀斜形成的地层产状以 $5^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 为宜(韩效忠等, 2018), 过于平缓不利于含氧含铀地下水在目标层内渗流, 过陡则不利于含氧含铀流体与还原性介质的充分作用和沉淀富集, 而这些缓坡带则是铀成矿的有利场所; 相反, 如果构造活动过程中产生强烈的地层变形现象, 形成了逆冲、倒转、强烈褶皱等现象, 则不利于大规模铀成矿作用, 矿体的连续性和稳定性则相对较差。

3.3 成矿流体条件

铀成矿作用的主要流体动力学机制就是重力流驱动的含铀流体与深部油气成藏过程中油气扩散作用的耦合, 铀矿化优先定位于还原渗出流和氧化渗入流两种流体系统的混合界面(薛春纪等, 2011)。苗培森等(2020)认为构造活动触发地表含氧含铀流体和深层含烃流体的运移, 在古油气藏(断裂)边缘(顶

部)形成的斜坡带, 流体相互作用而耦合成矿, 形成较为完善的流体成矿系统(图9)。

目前不同来源的流体在成矿过程中所起的作用存在一定争议, 成矿流体的捕捉及运移轨迹的判别一直是砂岩型铀矿床成矿作用研究的难题, 但却是铀矿研究关注的重点(Cuney and Kyser, 2009; Owen et al., 2016; Hou et al., 2017)。当前研究流体的工作手段主要包括流体包裹体、蚀变矿物、地球化学分析、岩心光谱扫描技术等。其中, 研究流体包裹体可以窥视砂岩型铀矿床形成的热历史(杨晓勇等, 2006), 而成矿作用过程中形成的黏土蚀变矿物, 是捕捉成矿作用信息的最好的研究矿物。

3.3.1 流体包裹体特征

虽然盆内的砂岩型铀矿床是产于现代地表以下仅几百米的深度, 但是前人通过地质学、岩相学和流体包裹体研究指出, 铀矿化温度在 $60\sim 180^{\circ}\text{C}$ (杨晓勇等, 2006; 李荣西等, 2006; 张宇龙等, 2020), 指示埋藏或热液环境而不是早成岩环境。

鄂尔多斯盆地已发现的铀矿床如塔然高勒铀矿床、大营铀矿、纳岭沟铀矿、皂火壕及黄陵矿区的包裹体总体包含盐水包裹体和烃类包裹体, 以气液两相包裹体为主, 少数为单相液态包裹体。流体主要以大气降水为主, 部分为原生的岩浆水和大气降水形成的混合变质水和建造水; 岩石硅质胶结物中流体的均一温度主要为 $90\sim 110^{\circ}\text{C}$, 盐度主要为 $2.5\%\sim 5.5\%$ 。通过流体包裹体分析表明, 含矿层流体中可见卤水和有机还原性流体(金若时等, 2020)。

其中, 盆地东北部铀矿床的包裹体氢-氧同位素分析 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $9.8\%\sim 12.3\%$, δD 值为 $-5\%\sim -48.6\%$, 认为成矿流体来自原生的岩浆水和大气降水混合; 硫同位素分析 ^{34}S 值(-58.0% 至 -33.4% V-CDT)表明其来源于烃类生物降解过程中

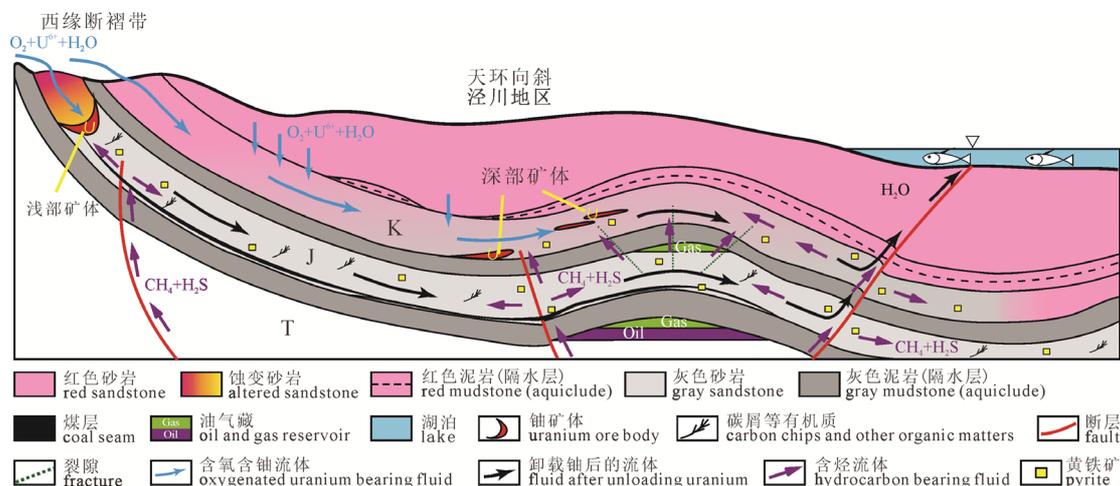


图 9 砂岩型铀矿含氧含铀流体与含烃流体耦合成矿模式简图(据苗培森等, 2020 修改)

Fig. 9 Schematic diagram of the coupling mineralization model of oxygen-bearing uranium fluid and hydrocarbon-bearing fluid in the sandstone-type uranium deposit (modified from MIAO et al., 2020)

的细菌硫酸盐还原(Zhang et al., 2019)。盆地南部双龙地区铀矿化与油气流体活动密切相关, 盐度变化范围较宽, 反映了不同性质的流体经历了混合与演化(张宇龙等, 2020; 邱林飞等, 2020; Jiu et al., 2020)。Zhang(2021)认为双龙铀矿床铀矿物的酸解烃组分以甲烷为主, 天然气为油型气。

由此可见, 油气充注与铀成矿关系密切, 随着烃类流体的注入, 铀成矿物质同时也被带入, 在低温热流体活动的作用下液态油气发生裂解, 铀石(部分为沥青铀矿)、黄铁矿、方铅矿等金属矿物与沥青同时析出形成于砂岩粒间孔隙或微裂隙中。

由于鄂尔多斯盆地油气比较富足, 在晚白垩世以后, 油气充注过程携带的铀形成了初步的铀成矿作用, 生烃效应在盆地流体超压力形成过程中发挥重要作用, 其提供驱动力使得渗出流与地势差控制的渗入流相遇, 因而有利于铀矿化较长时间地保持在同一个层位(薛春纪等, 2011)。在充注过程中还伴随有热液流体作用的叠加, 对前期形成的铀矿化进一步的改造富集进而发生二次成矿作用(邱林飞等, 2020)。而如果深部流体压力减弱, 而地势差没有减小, 则含氧渗入流体将流向盆地更深部, 萃取或活化盆地上部(尤其是侏罗系)预富集的铀元素。

3.3.2 蚀变矿物特征

利用岩心观察、显微镜下观察、扫描电镜、电子探针分析以及岩心光谱扫描等手段, 可以系统研究含铀砂岩的铀矿物种类、赋存特征及典型矿物伴生组合类型, 从而探讨铀成矿机理。

盆地东北部塔然高勒矿区直罗组下段地层最主要的铀矿物类型为铀石, 蚀变矿物主要有高岭石、蒙脱石、绿泥石、伊利石、碳酸盐、 Fe^{3+} 矿物等; 铀矿物的富集可以分为 5 个阶段: ①早期预富集的碎屑铀; ②石英颗粒边缘富集的沥青铀矿; ③莓球状、它形、胶状黄铁矿、高岭石、钛铁矿边缘沉淀富集, 与酸性还原流体有关的铀石; ④与石英、方解石、蒙脱石/伊蒙混层等伴生, 与碱性还原流体有关的铀石; ⑤与莓球状黄铁矿、胶状黄铁矿、方解石伴生的受中低温热液改造的铀石(金若时等, 2020)。

盆地西南部彭阳铀矿区的铀矿物以沥青铀矿为主, 其次为含钛铀矿物和铀石。铀矿物主要与锐钛矿、黄铁矿和磷灰石(胶磷矿)等共生, 多以星点浸染状或星点状集合体为特征。由于洛河组为风成沉积产物, 地层本身缺乏炭屑、有机质及黄铁矿等内部还原介质, 因此认为主要是烃类流体等外部还原介质参与氧化还原作用成矿(赵华雷等, 2020)。

3.4 古气候条件

古气候是铀成矿氧化-还原地化环境形成的重要条件。沉积期相对潮湿的古气候是砂体及围岩中还原介质形成的有利条件, 干旱-半干旱气候条件是铀成矿物质从蚀源区氧化搬运迁移至还原地带的必要条件。

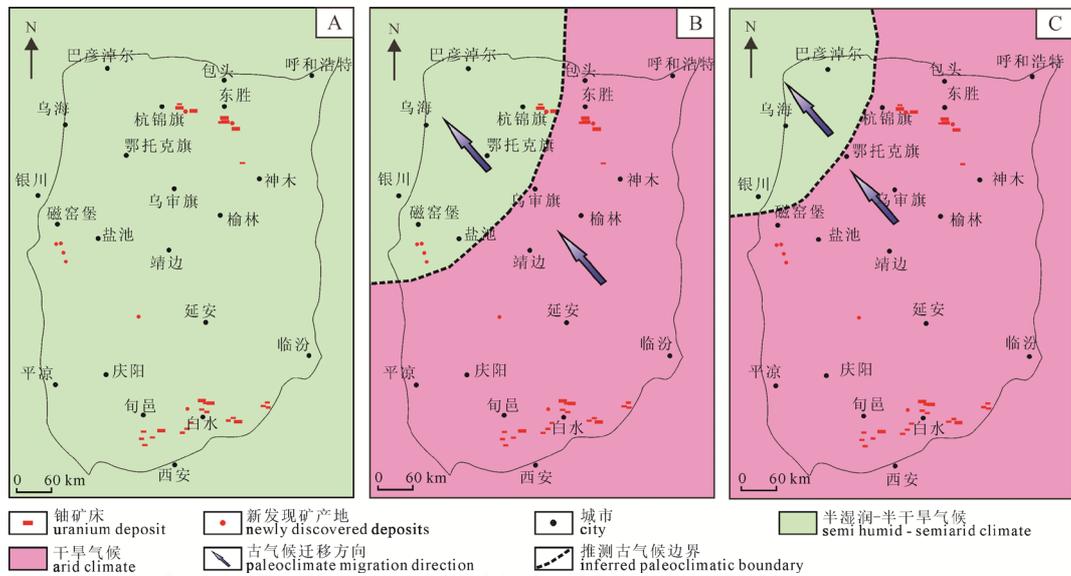
侏罗纪是鄂尔多斯盆地煤层和铀储层的重要层位。在直罗组下段下亚段沉积时期, 以发育薄煤层、煤线和碳质泥岩为特征, 前人通过地质、元素地球化学、古植物及其孢粉化石分析认为, Bathonian 期鄂尔多斯盆地总体处于由潮湿向干旱转变的古气候背景中(焦养泉等, 2021), 也反映燕山运动早期中侏罗世一次重要的古气候变化事件(孙立新等, 2017)。

由温湿向干旱转变的古气候变化既有利于氧化-还原序列的形成, 也有利于富有机质、黄铁矿等还原性砂体的形成及铀的预富集。其原理是中侏罗世以后炎热干旱、半干旱的交替气候, 有利于富含游离氧渗入水的形成和顺层流动; 岩石在旱季强烈机械风化, 有利于地表水的淋滤, 植被发育差, 黏土矿物少, 水中的铀易于分散, 地下水位较低, 氧化作用和水的淋滤作用较强, 大量铀转入地下水中, 并能以较稳定的铀酰碳酸络合物进行长距离迁移; 由于蒸发作用水中铀含量增高, 当高铀含量的水溶液进入潮湿气候下形成的还原性砂体, 经过长期持续作用形成后生铀矿床。

鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿主要赋存于直罗组下段辫状河道碎屑沉积建造中, 沉积碎屑以粗砂至中粗砂为主, 孔隙度相对较大, 砂岩层中含有大量的煤屑及黄铁矿, 这表明当时的沉积环境为富含有机质碎屑的还原性环境, 直罗组上段以红色碎屑沉积为主, 形成于干旱氧化的沉积环境, 这干旱、潮湿的古气候条件创造了铀成矿有利的地球化学环境。

从图 10 可以看出, 在直罗组下段下亚段沉积期, 属于聚煤事件演化的衰退消亡期, 早期的古气候已经演变为半湿润-半干旱型; 直罗组下段上亚段沉积期, 除了盆地西北部外, 聚煤作用在盆地其它地区已大面积消亡, 并接受了杂色细粒碎屑岩沉积。例如盆地东南部黄陵一带的含煤层段为三叠系瓦窑堡组, 侏罗系未发育煤层, 干旱古气候出现的相对最早, 并持续向西北方向迁移。

另外, 从上述图 3 可以看出, 从盆地的西北部至东南部, 直罗组的绿色层逐渐变薄, 按照盆地含铀岩系沉积垂向分带的认识(Jin et al., 2019), 绿色



A—直罗组下段下亚段沉积期; B—直罗组下段上亚段沉积期; C—直罗组中上段沉积期。
A—sedimentary period of lower sub segment of lower Zhiluo Formation; B—sedimentary period of upper sub segment of lower Zhiluo Formation; C—sedimentary period of middle upper segment of Zhiluo Formation.

图 10 鄂尔多斯盆地直罗组沉积期(Bathonian 期)古气候演变迁移规律(据焦养泉等, 2021 修改)
Fig. 10 Evolution and migration of the paleoclimate of the Zhiluo Formation (Bathonian stage) in the Ordos Basin (from JIAO et al., 2021)

层代表了弱还原沉积环境产物, 而不是仅代表氧化层经油气二次改造还原的产物, 说明由盆地东南部向西北部地区, 含铀层位由直罗组下段下亚段向上亚段、中段和中上段逐渐抬升, 古气候由干旱向潮湿演变, 同样表现了明显的迁移规律性。

除了直罗组地层具有上述的特征外, 鄂尔多斯盆地西南缘彭阳矿区的下白垩统洛河组同样作为含矿地层, 其古气候特征表现为: 以干燥气候的风成沉积体系为主, 同时也发育有湿润的河流体系, 以及风成、水成交互的半干旱沉积体系。这些沉积旋回和相组合的垂向排列揭示了沙漠形成、沙漠沉积和沙漠萎缩三个阶段。但这种气候上的变化是在一个较小的尺度内发生的, 与早白垩世华北地区整体干旱炎热的气候背景并不矛盾, 属于在整体“温室作用”背景下发生的有限规模的气候震荡(Chen et al., 2021)。而彭阳矿区西部的草庙地区在延安组和直罗组地层中形成了铀富集作用, 阻挡了含氧含铀水继续向盆地内部行进到泾川地区。而上部下白垩统的洛河组是风成沉积体系形成的红色建造, 里面缺少炭屑、有机质和黏土矿物, 均质性较强, 使得含氧含铀水能够从盆地边缘出露区较为畅通的顺层到达泾川油气田区上部, 在深部含烃流体沿断裂的排逸通道处还原富集成矿。

因此, 盆缘地区仍是以半潮湿时期侏罗系砂岩层为找矿目的层, 而靠近盆地内部, 含矿地层将逐渐变为更加偏向干旱的上覆地层。盆地古气候、沉积环境决定了盆内含铀岩系矿层的空间分布和形态。

3.5 炭屑、有机质条件

鄂尔多斯盆地侏罗系煤层形成于内陆盆地鼎盛时期, 在全盆普遍发育, 煤层分布总体与盆地拗陷形态一致, 即聚煤区环带状围绕盆地沉降中心展布, 西北厚而东南薄。直罗组微弱的聚煤作用是砂岩型铀矿形成的重要制约因素。它不仅在一定程度上限制了砂岩型铀矿的成矿层位, 而且直接参与了铀成矿的全过程。

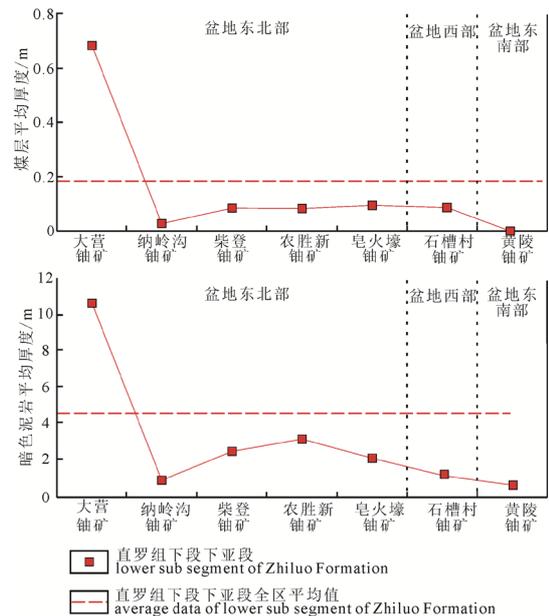


图 11 鄂尔多斯盆地铀矿区直罗组下段下亚段煤层和暗色泥岩分布特征(据焦养泉等, 2021 修改)
Fig. 11 Distribution characteristics of coal seams and dark mudstone in the lower sub segment of the Zhiluo Formation in the uranium deposits of the Ordos Basin (modified from JIAO et al., 2021)

当含铀岩系具备砂岩型铀矿的成矿条件时,煤层(线)以及代表泥炭沼泽发育信息的碳质泥岩均可大大地增强含铀岩系的还原能力(焦养泉等, 2021),矿层与相邻的薄煤层或碳质泥岩经常相伴出现,二者在含煤盆地的耦合产出具有区域性和普遍性规律。

直罗组含矿层位中的碳质碎屑总体演化程度较低,处于低成熟阶段, R_o 成熟度为 0.37%~0.58%。前人研究发现赋矿层位的煤屑有机质都具有较高的铀含量,该类有机质活性大,孔隙度高,比表面积大,常具有多种活性官能团分布,因此具有较强的吸附能力。煤炭与砂岩型铀矿的关系主要体现在有机质与砂岩型铀矿的关系。研究表明,有机物中聚铀能力最强的是腐植质,其次是腐泥质。煤屑的腐殖酸对铀的富集具有明显的作用(杨殿忠和夏斌, 2004; 曾江萍等, 2016),这就是为什么煤屑表面和植物包腔铀含量较高的缘由。

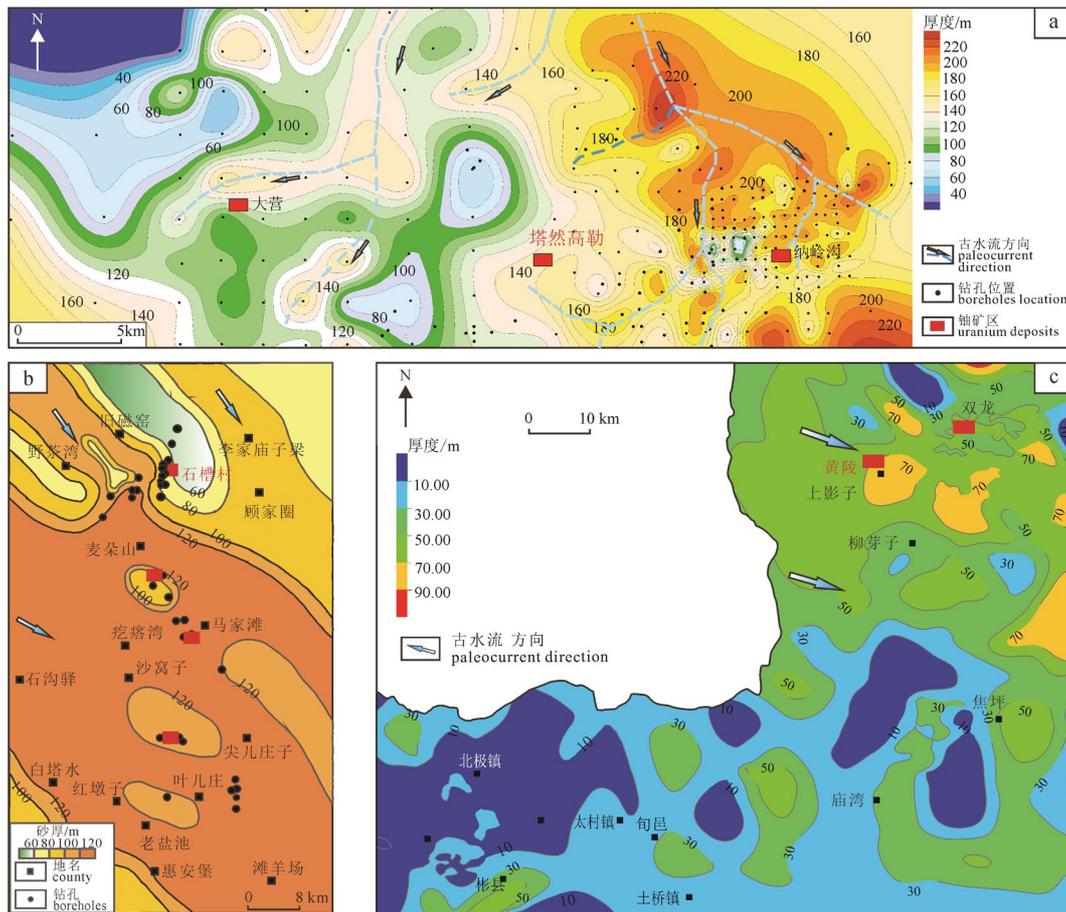
含铀地层中“碳质泥岩-铀矿-煤线”具有一定的空间配置关系。从图 11 可以看出,盆地边缘直罗组下段下亚段的薄煤层和碳质泥岩分布不太均衡。其中,盆地北缘的薄煤层和碳质泥岩相对发育,以大营铀矿区最为发育,平均厚度分别为 0.7 m 和

10.5 m,而位于中部纳岭沟铀矿床的厚度较小,这可能是由于该区恰好位于乌拉山大型物源-沉积朵体的中心轴部区域,受控于该沉积体系的影响而使薄煤层和碳质泥岩的厚度变小;而盆地东南缘的薄煤层和碳质泥岩厚度发育最小,钻孔中甚少见到薄煤层,部分钻孔的碳质泥岩平均厚度为 0.5 m,因而限制了该区铀矿体的成矿环境和规模。

上述情况说明,直罗组下段中煤线和碳质泥岩的发育制约了铀成矿发育的空间,同沉积期微弱聚煤作用通过冲刷作用等为铀储层提供了充足的内部还原介质,成岩期一成矿期一成矿期后,有机质的煤化作用为铀储层砂体提供了足量的含烃流体。

3.6 沉积相条件

含铀目的层的沉积相和砂体空间展布是制约铀矿体规模和是否经济可采的重要因素。鄂尔多斯盆地直罗组的主要沉积相类型为河流相、湖泊相沉积,在河湖过渡地区发育小规模三角洲沉积,在盆地边缘局部发育冲积扇沉积(赵俊峰等, 2008)。前人已做大量论述认为直罗组下段辫状河道砂岩具有良好的渗透性、连通性和成层性,是砂岩型铀矿的良好储层。



a—盆地北缘塔然高勒地区; b—盆地西缘宁东地区; c—盆地东南缘黄陵地区。

a—Tarangaole area in the north margin of the basin; b—Ningdong area in the west margin of the basin;

c—Huangling area in the southeast margin of the basin.

图 12 鄂尔多斯盆地铀矿区直罗组下段砂体分布图

Fig. 12 Distribution map of sand bodies in the lower Zhiluo Formation of uranium deposits in the Ordos Basin

盆地北缘大营与纳岭沟地区直罗组下段砂体较为发育,分布两条从北至南的河道砂体,且向南不断分岔,演化成多条规模较小的分支河道(图12a)。其中纳岭沟—塔然高勒地区辫状河道长约20 km,宽5~10 km,厚度最大可达260 m,含砂率高达85%,为辫状河道沉积特征。而塔然高勒地区的西部和大营地区砂体宽度明显减弱,河道分叉增多,且河道周边发育大面积泛滥平原,说明其开始向辫状河三角洲沉积体系过渡。总体上看大营—纳岭沟地区辫状河三角洲平原构成了该地区的主体,富铀矿带主要赋存于侏罗系直罗组辫状河主河道与分支河道的分叉部位。

盆地西缘宁东地区直罗组下段下亚段发育河道充填、泛滥平原、心滩等沉积微相。其中石沟驿—叶儿庄为主河道方向,并在马家滩一带发生分叉,沿张家圈方向向东继续延伸。河道宽度大、弯度低,砂地比大于80%,为典型的辫状河沉积特征(图12b)。

盆地东南部黄陵—双龙地区直罗组下段的砂体厚度为30~70 m,平均厚度约45 m(图12c),砂体分布较稳定,辫状河砂体沉积体系发育;而北极—庙湾地区砂体厚度较薄,砂体厚度为10~50 m,砂体连续性差,呈现泥岩夹层和泥砂互层的现象增多,说明其开始向辫状河三角洲沉积体系过渡。

因此,由上述可总结为:铀矿体主要发育在辫状河主河道边部和辫状河三角洲分流河道部位,沉积物粒度由粗变细、砂体厚度明显发生变化,泥质杂基含量相对较高,有机质丰富,非均质性增强,在这些岩性变化的过渡部位则有利于铀的沉淀和富集。

4 讨论

4.1 关键控矿要素

综上所述,鄂尔多斯盆地具有优越的成矿地质条件。铀源丰富、古气候条件适宜,含铀储层砂体大规模发育,补—径—排体系完整,构造活动触发地表含氧含铀流体和深层含烃流体的运移,在适当角度的斜坡带或断裂构造附近,流体相互作用而耦合成矿。通过总结鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿床形成的有利条件,可以初步归纳出几个关键的控制铀成矿要素:

(1)铀源要素:外部蚀源区存在广泛剥露的富铀地质体,区域上表现为大面积的地球化学高场区或航放异常;内部源区如含矿目标层非矿段的测井曲线相对其它层位表现出偏高的曲线特征。地壳的平均铀质量分数为 2.5×10^{-6} ,一般认为蚀源区现测铀的含量为大于 4×10^{-6} ,为有利的铀源条件(张宇龙

等,2006);但更重要的是蚀源区岩石原始铀含量高,而且发生了一定迁移亏损,才能够真正说明为铀成矿提供了铀源。因此,根据前文的铀源论述内容,鄂尔多斯盆地的蚀源区岩石原始铀含量大于 10×10^{-6} ,迁出率大于30%,说明可作为相对可靠的有利铀源条件。

(2)控矿构造要素:鄂尔多斯盆地北缘、东南缘的宽缓斜坡带及斜坡带上发育的微隆起构造有利于铀的成矿富集;鄂尔多斯盆地西缘褶皱带和西南缘油气穹窿周边发育的多组断裂的交汇部位往往是深部还原流体向上排逸通道或者是地下水的排泄区。封志兵等(2022)认为隆起区翼部的坡度大小决定了表生成矿流体的水力坡度,提出了隆起区翼部坡度的计算公式(坡度=目标层高差/斜坡带两点距离 $\times 100\%$)。按照此公式,本次估算了鄂尔多斯盆地东北部塔然高勒北部的微隆起带的坡度为4%,东南部黄陵东部微隆起带的坡度为2.5%,基本符合坡度为3%~5%时对铀成矿有利(别列里曼 A N, 1995)的观点。同时,断裂构造需要切穿有机质层(包括煤层、油气层)或基底,才能为深部铀源和油气上升提供通道,是表生流体的排泄通道。由于断层错动、岩性破碎,也是重要的岩石物性变化界面。

(3)成矿流体要素:蚀变矿物作为研究成矿流体的重要示踪对象,朱强(2019)认为鄂尔多斯盆地东北部含矿砂岩中的黏土矿物以高岭石+伊/蒙混层+蒙皂石为主,具有酸性-碱性的过渡变化特征。

(4)炭屑、有机质要素:鄂尔多斯盆地河流沉积体系的含矿砂岩发育薄煤层(厚度0.1 m)、有机质(含量0.3%~0.6%)、碳质泥岩(厚度2 m)、黄铁矿(主要为莓球状、胶状)等特征。

(5)沉积相、岩相要素:砂岩型铀成矿的有利沉积相为辫状河-辫状河三角洲相以及低弯度的曲流河相区。含矿地层具有稳定的“泥-砂-泥”结构,含矿地层产状为 $5^\circ \sim 30^\circ$;含矿岩性为灰色中粗粒砂岩、砂砾岩等,砂体疏松(渗透系数 $> 0.1 \text{ m/d}$),砂体厚度为25~60 m,泥砂厚度比在0.5~0.7之间时最有利于铀成矿。而对于盆内赋存于风成沉积相中的铀矿,与砂体的厚度及泥砂比暂时未发现具有相关性。目前盆缘河流沉积相铀矿体的埋深在50~700 m不等,需要注意靠近盆内,目标层位可能变成上覆地层。

(6)地球物理要素:含矿地层综合测井曲线的自然伽马异常数值为大于150 API或3.5 PA/Kg,异常厚度大于2 m可提供重要的直接找矿指标。

4.2 找矿潜力分析

根据上述的六个关键控矿指标,按照由已知到

未知,盆缘到盆内、由浅至深的原则,认为鄂尔多斯盆地仍然具有较大的找矿潜力。

鄂尔多斯盆地北缘具有相对稳定的构造环境,仍是盆内砂岩型铀矿找矿的重点地区。以中侏罗统直罗组下段和下白垩统环河—华池组地层为主要找矿目的层,以大营—塔然高勒—纳岭沟矿床的已知矿(化)体外围延伸方向为重点,重视利用遥感、重磁、钻井资料综合分析含矿目的层底板构造,圈定斜坡和断裂构造带;利用钻井资料编制目的层砂体厚度和砂地比等图件分析沉积相特征,圈定辫状河和辫状河三角洲的有利沉积相带。尽管铀矿集区的南部纳林西里—神木中鸡一带靠近盆内,目标层的埋深增大,渗透性减弱,但不能受人为划定的前锋线所限制,该地区仍具有较好的找矿潜力。

鄂尔多斯盆地西缘宁东地区,以中侏罗统直罗组下段、延安组地层为主要找矿目的层,由于该地区受南北向逆冲构造挤压影响,构造改造使得矿体的连续性不太好或者遭受剥蚀,地下水补、径、排系统受到一定破坏,水动力减弱,找矿潜力受到一定影响。但是仍需要重视区内鸳鸯湖背斜构造的两翼、倾伏端和背斜轴部断裂的两侧都是铀成矿的有利部位。同时宁东地区的东部作为油气田的探采区,具备较好的氧化还原条件,下白垩统地层将具有较大的找矿空间。

鄂尔多斯盆地西南缘环县—泾川地区,以直罗组、下白垩统洛河组和罗汉洞组为主要找矿目的层,其中环县地区的直罗组发育铀矿化特征,彭阳—泾川地区风成沉积的洛河组和湖沼相沉积的罗汉洞组发现了工业矿体,断裂构造控矿特征明显,通过重磁和地震资料解译寻找断裂构造交叉等有利部位将是成矿的有利地区。另外,彭阳矿区东部的油气穹窿的周边是铀成矿重要的氧化还原场所,可作为重要的找矿方向。

鄂尔多斯盆地东南缘黄陵—彬县地区,以直罗组下段为主要找矿目的层,黄陵—双龙一带目的层砂体较为发育,渭北隆起带决定了区域成矿带呈北东向的展布特征,结合区内已有的煤田、油田钻孔资料加大对双龙矿床南部的延伸方向进行追索,可扩大矿体规模。

鄂尔多斯盆地中部志丹一定边地区安定组发现了铀矿化线索,但埋藏较深,渗透性差,不适宜地浸开采;区内油田钻孔放射性异常特征成片、成带特征明显,可作为非可地浸砂岩型铀矿的找矿前景区。

5 结论

(1)鄂尔多斯盆地的铀矿具有多层赋矿、多期次

成矿的特点。通过综合对比鄂尔多斯盆地东北缘、西缘、西南缘、东南缘、中部等不同矿区的成矿地质条件,认为鄂尔多斯盆地的主要含铀层位为中侏罗统直罗组下段,沉积体系主要为辫状河流相;盆地外部蚀源区以北部造山带地质体的 Th/U 比值和 ΔU 铀迁移量相对最大,说明对盆内的铀源贡献率最高。

(2)鄂尔多斯盆地铀矿的富集主要受盆缘斜坡带的控制,断裂对盆地西缘和西南缘的控矿改造明显;由盆地东南部向西北部,古气候由于干旱向潮湿演变,铀的富集层位由直罗组下段下亚段向上亚段逐渐抬升,具有明显的迁移规律性;含铀岩系中“碳质泥岩—铀矿—煤线”具有一定的空间配置关系,碳质泥岩和煤线的发育程度限制了铀矿体的成矿环境和规模;铀矿体优先富集于辫状河沉积体系中富含有机质、非均质性强和岩性多变的部位。

(3)鄂尔多斯盆地具有优越的成矿地质条件,但不同矿集区铀的富集条件有所差异,在确定研究区含矿目的层的前提下,根据控制铀矿富集的相关指标,综合评价不同区域的找矿潜力,盆地边缘按照从已知到未知的原则,已知铀矿床的周边仍然具有较大找矿潜力;盆地内部铀矿工作程度偏低,但却是寻找深部铀矿资源的重要潜力地区。

致谢:中国地质科学院矿产资源研究所王登红研究员、天津地质调查中心和其他项目承担单位的项目组同志在成文过程中给予了帮助,在此致以诚挚的谢意。

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 92162212), and China Geological Survey (Nos. DD20230045 and DD20221678-05).

参考文献:

- 别列里曼 A И. 1995. 水成铀矿床[M]. 咸阳:核工业西北地质局二〇三研究所科技情报室.
- 曾江萍,安树清,徐铁民,刘义博,张莉娟. 2016. 腐殖酸对 U(VI)的吸附性能研究[J]. 地质学报, 90(12): 3563-3569.
- 程银行,张天福,曾威,胡鹏,刘行,杨君,曲凯,王少轶,程先钰,奥琮,金若时,苗培森. 2020. 中国北方中生代盆地砂岩型铀超常富集的驱动力[J]. 大地构造与成矿学, 44(4): 590-606.
- 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.
- 高贺伟. 2018. 内蒙古鄂尔多斯盆地西北缘砂岩型铀成矿条件分析[D]. 长春:吉林大学.
- 龚斌利,徐高中,李卫红. 2008. 鄂尔多斯盆地西缘HAB地区层间氧化带铀矿化特征[J]. 中国地质, 35(1): 95-100.

- 古抗衡,陈祖伊. 2010. 正向构造对层间氧化带砂岩型铀矿成矿和定位的控制[J]. 铀矿地质, 26(6): 361-364.
- 郭宏伟,戴明建. 2012. 鄂尔多斯盆地银东地区层间氧化带特征分析[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 14(01): 41-43, 51.
- 郭庆银. 2010. 鄂尔多斯盆地西缘构造演化与砂岩型铀矿成矿作用[D]. 北京: 中国地质大学: 39-64.
- 韩效忠. 2018. 砂岩型铀矿有利成矿构造识别技术研究[J]. 中国煤炭地质, 30(4): 8-11, 16.
- 胡俊华,郭科锋. 2017. 鄂尔多斯盆地南缘砂岩型铀矿找矿潜力分析[J]. 铀矿地质, 33(03): 137-143.
- 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,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(7): 2331-2345.
- 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.
- 金若时. 2019. 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿成矿地质背景[M]. 北京: 科学出版社.
- 金若时. 2020. 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿成矿作用[M]. 北京: 科学出版社.
- 荆国强,胡菲菲,李磊. 2017. 鄂尔多斯盆地西缘惠安堡铀矿成矿特征及控矿因素[J]. 新疆地质, 35(2): 178-183.
- 雷开宇,刘池洋,张龙,吴柏林,王强建,寸小妮,孙莉. 2017. 鄂尔多斯盆地北部中生代中晚期地层碎屑锆石 U-Pb 定年与物源示踪[J]. 地质学报, 91(7): 1522-1541.
- 李荣西,赫英,李金保,李继宏,李鑫. 2006. 东胜铀矿流体包裹体同位素组成与成矿流体来源研究[J]. 地质学报, 80(5): 753-760.
- 李瑞霜,刘战庆,杨胜富. 2020. 鄂尔多斯盆地东北部中侏罗统延安组地质特征及铀成矿条件[J]. 地球科学与环境学报, 42(6): 833-848.
- 李西得,易超,高贺伟,陈心路,张康,王明太. 2016. 鄂尔多斯盆地东北部直罗组古层间氧化带形成机制探讨[J]. 现代地质, 30(4): 739-747.
- 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(4): 845-857, 1001.
- 刘池洋,郑孟林,杨兴科,何碧竹,任战利,郭佩. 2016. 羌塘中生代海相盆地演化与后期改造及油气赋存[J]. 地质学报, 90(11): 3259-3281.
- 刘汉彬,李子颖,秦明宽,孙晔,韩娟,金贵善,李军杰. 2012. 鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿地球化学研究进展[J]. 地学前缘, 19(3): 139-146.
- 刘鑫扬,贺锋,剡鹏兵,张宇龙,鲁超,任志勇,骆效能,张艳. 2022. 鄂尔多斯盆地东北部铀成矿地质特征与区域成矿规律[J]. 铀矿地质, 38(3): 373-393.
- 鲁宝龙. 2013. 鄂尔多斯盆地南部铀成矿条件及远景预测[D]. 西安: 西北大学.
- 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.
- 邱林飞,张宇龙,孙祥,贺锋. 2020. 流体包裹体在砂岩型铀矿成矿流体研究中的应用——以鄂尔多斯南部铀矿化区为例[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 43(4): 301-312.
- 孙立新,张云,张天福,程银行,李艳峰,马海林,杨才,郭佳成,鲁超,周晓光. 2017. 鄂尔多斯北部侏罗纪延安组、直罗组孢粉化石及其古气候意义[J]. 地质论评, 24(1): 32-51.
- 孙莉. 2016. 鄂尔多斯盆地大营砂岩型铀矿地质特征及其成因探讨[D]. 西安: 西北大学.
- 汤超,肖鹏,魏佳林,徐增连,刘华建,赵丽君. 2021. 鄂尔多斯盆地志丹地区安定组铀矿化地质地球化学特征[J]. 华北地质, 44(2): 4-13.
- 万军,陈振岩,李清春,邵建欣,曹民强,肖程,王衡. 2020. 钱家店地区油铀成矿(藏)条件对比及综合勘探意义[J]. 中国石油勘探, 25(6): 13-25.
- 王飞飞. 2013. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区砂岩型铀矿形成环境及其主控因素[D]. 西安: 西北大学.
- 王强建,刘池洋,郭真,张东东. 2015. 鄂尔多斯盆地中南部晚三叠世延长期区域构造环境转变的沉积响应[J]. 地学前缘, 22(3): 194-204.
- 肖晖,李建新,韩伟,杨琼警. 2013. 鄂尔多斯盆地南缘渭北隆起中生代构造抬升及演化[J]. 西安科技大学学报, 33(5): 576-582, 593.
- 薛春纪,池国祥,薛伟,曹纪虎. 2011. 鄂尔多斯盆地生烃过程与流体流动及铀矿化关系[J]. 地学前缘, 18(5): 19-28.
- 杨殿忠,夏斌. 2004. 砂岩铀矿成矿过程中有机质作用的实验研究——以吐鲁番—哈密盆地十红滩铀矿床为例[J]. 地质论评, 50(2): 218-222.
- 杨建新,陈安平. 2008. 鄂尔多斯盆地呼斯梁地区可地浸砂岩型铀矿地质特征及找矿前景[J]. 铀矿地质, (02): 96-100.
- 杨晓勇,凌明星,孙卫,苗建宇,刘池洋. 2006. 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿流体包裹体特征[J]. 石油学报, 27(6): 28-33.
- 易超,王贵,李西得,张康,王永君. 2018. 鄂尔多斯盆地东北部直罗组铀富集特征及铀成矿模式探讨[J]. 矿床地质, 37(4): 835-852.
- 俞初安,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(3): 829-843.
- 张金带,李子颖,徐高中,彭云彪,王果,李怀渊. 2015. 我国铀矿勘查的重大进展和突破——进入新世纪以来新发现和探明的铀矿床实例[M]. 北京: 地质出版社: 1-429.
- 张金带,徐高中,林锦荣,彭云彪,王果. 2010. 中国北方6种新的砂岩型铀矿对铀资源潜力的提示[J]. 中国地质, 37(5): 1434-1449.
- 张婉莹. 2019. 砂岩型铀矿 SIMS 和 fs-LA-ICP-MS 原位微区 U-Pb 定年——以鄂尔多斯盆地和伊犁盆地为例[D]. 西安: 西北大学.
- 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.
- 张宇龙,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(2): 67-72, 77.
- 张宇龙,贺锋,邱林飞,范洪海,蔡煜琦,衣龙升,刘红旭,贾翠. 2020. 鄂尔多斯盆地店头地区直罗组流体包裹体特征及油气与铀成矿关系[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 43(4): 313-322.
- 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.
- 赵俊峰,刘池洋,喻林,王晓梅. 2008. 鄂尔多斯盆地中生代沉积和堆积中心迁移及其地质意义[J]. 地质学报, 82(4):

540-552.

朱强, 李建国, 俞初安, 司马献章, 文思博, 李光耀, 司庆红. 2019. 鄂尔多斯盆地塔然高勒地区直罗组上、下段的岩性-岩相特征及对铀成矿的差异性控制作用[J]. 地球学报, 40(3): 456-468.

References:

- БЕРРИМАН А И. 1995. Hydrogenic uranium deposit[M]. Xianyang: No.203 Research Institute of Nuclear Industry(in Chinese).
- 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.
- CHENG Yin-hang, ZHANG Tian-fu, ZENG Wei, HU Peng, LIU Xing, YANG Jun, QU Kai, WANG Shao-yi, CHENG Xian-yu, AO Cong, JIN Ruo-shi, MIAO Pei-sen. 2020. Driving forces for sandstone-type uranium super-enrichment in Mesozoic basins, North China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 44(4): 590-606(in Chinese with English abstract).
- CUNEY M, KYSER K. 2009. Recent and not-so-recent developments in uranium deposits and implications for exploration[C]/Mineralogical Association of Canada Short Course Series, 39: 1-257.
- FENG Zhi-bing, NIE Feng-jun, NING Yuan-li, JIANG Li, XIA Fei, HE Jian-feng, SHENG Zhou-ning. 2022. Discussion and design of exploration technology for sandstone-type uranium deposits in the interior of the sedimentary basins[J]. Acta Geologica Sinica, 96(6): 2217-2229(in Chinese with English abstract).
- GAO He-wei. 2018. Analysis of Sandstone Type Uranium Mineralization Conditions in the Northwest Margin of the Ordos Basin, Inner Mongolia[D]. Changchun: Jilin University(in Chinese with English abstract).
- GONG Bin-li, XU Gao-zhong, LI Wei-hong. 2008. Characteristics of uranium mineralization in the interlayer oxidation zone of the HAB area on the western margin of the Ordos basin[J]. Geology in China, 35(1): 95-100(in Chinese with English abstract).
- GU Kang-heng, CHEN Zu-yi. 2010. The controlling role of positive structures over the metallogenesis and emplacement of inter layer oxidation sandstone type uranium deposits[J]. Uranium Geology, 26(6): 361-364(in Chinese with English abstract).
- GUO Hong-wei, DAI Ming-jian. 2012. Characteristics of interlayer oxidation zones in the Yindong area of the Ordos Basin[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 14(01): 41-43, 51(in Chinese with English abstract).
- GUO Qing-yin. 2010. Tectonic evolution at the western margin of Ordos basin with respect to metallogenesis of sandstone type uranium deposits[D]. Beijing: China University of Geosciences: 39-64(in Chinese with English abstract).
- HAN Xiao-zhong. 2018. Advantageous metallogenic structure identification technology for sandstone-type uranium deposit[J]. Coal Geology of China, 30(4): 8-11, 16(in Chinese with English abstract).
- HOU Bao-hong, KEELING J, LI Zi-ying. 2017. Paleovalley-related uranium deposits in Australia and China: A review of geological and exploration models and methods[J]. Ore Geology Reviews, 88: 201-234.
- HU Jun-hua, GUO Ke-feng. 2017. Potential analysis of sandstone type uranium deposits in the southern margin of the Ordos Basin[J]. Uranium Geology, 33 (03): 137-143(in Chinese with English abstract).
- 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).
- JIAO Yang-quan, WU Li-qun, RONG Hui, PENG Yun-biao, MIAO Ai-sheng, WANG Xiao-ming. 2016. The relationship between Jurassic coal measures and sandstone-type uranium deposits in the Northeastern Ordos Basin, China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 90(6): 2117-2132.
- JIAO Yang-quan, WU Li-qun, RONG Hui, ZHANG Fan. 2021. Coal accumulation regularity of Zhiluo Formation and its indication to paleoclimate and uranium metallogenic environment, Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 46(7): 2331-2345(in Chinese with English abstract).
- JIN Ruo-shi, MIAO Pei-sen, SIMA Xian-zhang, YU Reng-an, CHENG Yin-hang, TANG Chao, ZHANG Tian-fu, AO Cong, TENG Xue-ming. 2018. New prospecting progress using information and big data of coal and oil exploration holes on sandstone-type uranium deposit in North China[J]. China Geology, 1(1): 167-168.
- 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.
- JIN Ruo-shi. 2019. Geological background of uranium mineralization in Ordos Basin[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- JIN Ruo-shi. 2020. Metallogenesis of sandstone type uranium deposits in Ordos Basin[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- JING Guo-qiang, HU Fei-fei, LI Lei. 2017. Metallogenic characteristics and ore-controlling factors of Huianbu Uranium Deposit in west margin of Ordos Basin[J]. Xinjiang Geology, 35(2): 178-183(in Chinese with English abstract).
- JIU Bo, HUAN Wen-hui, LI Yuan. 2020. The effect of hydrothermal fluids on Ordovician carbonate rocks, southern Ordos Basin, China[J]. Ore Geology Reviews, 126: 103803.
- LEI Kai-yu, LIU Chi-yang, ZHANG Long, WU Bo-lin, WANG Jian-qiang, CUN Xiao-ni, SUN Li. 2017. Detrital zircon U-Pb

- dating of Middle-Late Mesozoic strata in the Northern Ordos Basin: Implications for tracing sediment sources[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(7): 1522-1541(in Chinese with English abstract).
- LI Rong-xi, HE Ying, LI Jin-bao, LI Ji-hong, LI Xin. 2006. Isotope composition of fluid inclusion and tracing to the source of mineralization fluid in Dongsheng Uranium Deposit, North Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(5): 753-760(in Chinese with English abstract).
- LI Rong-xi, LI You-zhu. 2011. The geologic features of mineralization at the Dongsheng uranium deposit in the northern Ordos Basin (Central China)[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 52(6): 593-602.
- LI Rui-shuang, LIU Zhan-qing, YANG Sheng-fu. 2020. Geological characteristics and uranium metallogenic conditions of Middle Jurassic Yan'an Formation in the Northeastern of Ordos Basin, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 42(6): 833-848(in Chinese with English abstract).
- LI Xi-de, YI Chao, GAO He-wei, CHEN Xin-lu, ZHANG Kang, WANG Ming-tai. 2016. Study on formation mechanism of Epigenetic Altered Zone in Zhiluo Formation, Northeastern Ordos Basin, North China[J]. *Geoscience*, 30(4): 739-747(in Chinese with English abstract).
- LI Zi-ying, QIN Ming-kuan, FAN Hong-hai, CAI Yu-qi, CHENG Ji-xing, GUO Dong-fa, YE Fa-wang, FAN Guang, LIU Xiao-yang. 2021. Main progresses of uranium geology and exploration techniques for the past decade in China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 40(4): 845-857, 1001(in Chinese with English abstract).
- LIU Chi-yang, ZHENG Meng-lin, YANG Xing-ke, HE Bi-zhu, REN Zhan-li, GUO Pei. 2016. Evolution and late modification of Mesozoic marine Qiangtang Basin and its hydrocarbon occurrence[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(11): 3259-3281(in Chinese with English abstract).
- LIU Han-bin, LI Zi-ying, QIN Ming-kuan, SUN Ye, HAN Juan, JIN Gui-shan, LI Jun-jie. 2012. Progress in geochemistry of sandstone-type uranium deposit in North Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(3): 139-146(in Chinese with English abstract).
- LIU Xin-yang, HE Feng, YAN Peng-bing, ZHANG Zi-long, LU Chao, REN Zhi-yong, LUO Xiao-neng, ZHANG Yan. 2022. Geological characteristics and regional metallogenic pattern of uranium mineralization in Northeastern Ordos Basin[J]. *Uranium Geology*, 38(3): 373-393(in Chinese with English abstract).
- LU Bao-long. 2013. Uranium mineralization conditions and prospect prediction in the southern Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwestern University(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.
- OWEN A, HARTLEY A J, WEISSMANN G S, NICHOLS G J. 2016. Uranium distribution as a proxy for basin-scale fluid flow in distributive fluvial systems[J]. *Journal of the Geological Society*, 173(4): 569-572.
- QIU Lin-fei, ZHANG Zi-long, SUN Xiang, HE Feng. 2020. Research and demonstration of fluid inclusions in sandstone-type uranium ore-forming fluid—A case of study in uranium mineralization area of southern Ordos[J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 43(4): 301-312(in Chinese with English abstract).
- 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 Li. 2016. Geological characteristics and genesis of the Daying sandstone type uranium deposit in the Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwestern University(in Chinese with English abstract).
- SUN Li-xin, ZHANG Yun, ZHANG Tian-fu, CHENG Yin-hang, LI Yan-feng, MA Hai-lin, YANG Cai, GUO Jia-cheng, LU Chao, ZHOU Xiao-guang. 2017. Jurassic sporopollen of Yan'an Formation and Zhiluo Formation in the northeastern Ordos Basin, Inner Mongolia, and its paleoclimatic significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(1): 32-51(in Chinese with English abstract).
- SUN Yu-han, JIAO Yang-quan, WU Li-qun, RONG Hui. 2022. Relations of uranium enrichment and metal sulfides within the Shuanglong uranium deposit, southern Ordos Basin[J]. *Journal of Earth Science*, 2: 395-408.
- TANG Chao, XIAO Peng, WEI Jia-lin, XU Zeng-lian, LIU Hua-jian, ZHAO Li-jun. 2021. Geological and geochemical characteristics of uranium mineralization in Anding Formation in Zhidan Area, Ordos basin[J]. *North China Geology*, 44(2): 4-13(in Chinese with English abstract).
- WAN Jun, CHEN Zhen-yan, LI Qing-chun, SHAO Jian-xin, CAO Min-qiang, XIAO Cheng, WANG Heng. 2020. Comparative study on metallogenic conditions of uranium deposits and hydrocarbon accumulation conditions of oil reservoirs in the Qianjadian area and its significance on comprehensive exploration[J]. *China Petroleum Exploration*, 25(6): 13-25(in Chinese with English abstract).
- WANG Fei-fei. 2013. Formation environment and main controlling factors of sandstone type uranium deposits in the Hangjinqi area of the Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwestern University(in Chinese with English abstract).
- WANG Jian-qiang, LIU Chi-yang, GUO Zhen, ZHANG Dong-dong. 2015. Sedimentary response of regional tectonic transformation in Late Triassic Yanchang period at the central and southern Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(3): 194-204(in Chinese with English abstract).
- XIAO Hui, LI Jian-xin, HAN Wei, YANG Qiong-jing. 2013. The tectonic uplift time and evolution characteristics of Weibei uplift in the south edge of Ordos Basin[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 33(5): 576-582, 593(in Chinese with English abstract).
- XUE Chun-ji, CHI Guo-xiang, XUE Wei, CAO Ji-hu. 2011. Rela-

- tionship between hydrocarbon generation and basinal fluid flow and uranium mineralization in the Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(5): 19-28(in Chinese with English abstract).
- YANG Dian-zhong, XIA Bin. 2004. An experiment study on the role of organic materials in ore-forming of sandstone-type uranium deposit-A case study of the Shihongtan Deposit, Turpan-Hami Basin[J]. *Geological Review*, 50(2): 218-222(in Chinese with English abstract).
- YANG Jian-xin, CHEN An-ping. 2008. Geological characteristics and prospecting prospects of in-situ leachable sandstone type uranium deposits in the Husiliang area of the Ordos Basin[J]. *Uranium Geology*, (02): 96-100(in Chinese with English abstract).
- YANG Xiao-yong, LING Ming-xing, SUN Wei, MIAO Jian-yu, LIU Chi-yang. 2006. Characteristics of fluid inclusions in sandstone-type uranium deposits in Ordos Basin[J]. *Acta Petroli Sinica*, 27(6): 28-33(in Chinese with English abstract).
- YI Chao, WANG Gui, LI Xi-de, ZHANG Kang, WANG Yong-jun. 2018. A tentative discussion on uranium enrichment characteristics and metallogenic model in Zhiluo Formation, northeastern Ordos Basin[J]. *Mineral Deposits*, 37(4): 835-852(in Chinese with English abstract).
- YU Reng-an, WANG Shan-bo, ZHU Qiang, SI Qing-hong, TENG Xue-ming, LIU Xiao-xue, LIU Hou-ning, TANG Yong-xiang. 2021. Zircon U-Pb ages and provenance characteristics of the Zhiluo Formation sand stones and the formation background of the uranium deposit in Huangling area, Ordos Basin, China[J]. *China Geology*, (4): 600-615.
- YU Reng-an, ZHU Qiang, WEN Si-bo, TU Jia-run, PENG Sheng-long, SI Qing-hong, TANG Yong-xiang. 2020. Tectonic setting and provenance analysis of Zhiluo Formation sandstone of Tarangaole Area in the Ordos Basin[J]. *Earth Science*, 45(3): 829-843(in Chinese with English abstract).
- YUE Liang, JIAO Yang-quan, WU Li-qun, RONG Hui, FAYEK M, XIE Hui-li. 2020. Evolution and origins of pyrite in sandstone-type uranium deposits, northern Ordos Basin, north-central China, based on micromorphological and compositional analysis[J]. *Ore Geology Reviews*, 118: 103334.
- ZENG Jiang-ping, AN Shu-qing, XU Tie-min, LIU Yi-bo, ZHANG Li-juan. 2016. On adsorption performance of humic acid on uranium[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(12): 3563-3569(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Chuang, YI Chao, DONG Qian, CAI Yu-Qi, LIU Hong-Xu. 2018. Geological and geochronological evidence for the effect of Paleogene and Miocene uplift of the Northern Ordos Basin on the formation of the Dongsheng uranium district, China[J]. *Journal of Geodynamics*, 114: 1-18.
- ZHANG Fan, WANG Shuang-ming, JIAO Yang-quan, WU Li-qun, RONG Hui. 2021. Trapping of uranium by organic matter within sandstones during mineralization process: A case study from the Shuanglong uranium deposit, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 138: 104296.
- ZHANG Jin-dai, LI Zi-ying, XU Gao-xue, PENG Yun-biao, WANG Guo, LI Huai-yuan. 2015. Significant progress and breakthroughs in uranium exploration in China - examples of newly discovered and explored uranium deposits since the new century[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-429(in Chinese)..
- ZHANG Jin-dai, XU Gao-zhong, LIN Jin-rong, PENG Yun-biao, WANG Guo. 2010. The implication of six kinds of new sandstone-type uranium deposits to uranium resources potential in North China[J]. *Geology in China*, 37(5): 1434-1449(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Long, LIU Chi-yang, LEI Kai-yu. 2019. Green altered sandstone related to hydrocarbon migration from the uranium deposits in the northern Ordos Basin, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 109: 482-493.
- ZHANG Wan-ying. 2019. SIMS and fs LA-ICP-MS in-situ U-Pb dating of sandstone-type uranium deposits—Taking Ordos Basin and Yili Basin as examples[D]. Xi'an: Northwest University(in Chinese with English abstract).
- 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).
- ZHANG Zi-long, HANG Xiao-zhong, YAO Chun-ling. 2006. Discussion on evaluation methods of uranium source conditons for sandstone-type uranium deposits[J]. *World Nuclear Geoscience*, 23(2): 67-72, 77(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zi-long, HE Feng, QIU Lin-fei, FAN Hong-hai, CAI Yu-qí, YI Long-sheng, LIU Hong-xu, JIA Cui. 2020. Characteristics of fluid inclusion and relationship between oil-gas charging and uranium metallogenesis in the Zhiluo Formation in Diantou, Ordos Basin[J]. *Journal of East China University of Technology(Natural Science)*, 43(4): 313-322(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 Jun-feng, LIU Chi-yang, YU Lin, WANG Xiao-mei. 2008. The transfer of depocenters and accumulation centers of Ordos Basin in Mesozoic and its meaning[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 540-552(in Chinese with English abstract).
- ZHU Qiang, LI Jian-guo, YU Reng-an, SIMA Xian-zhang, WEN Si-bo, LI Guang-yao, SI Qing-hong. 2019. Lithologic-lithographic characteristics of the upper and lower members of the Zhiluo Formation and their differential control of uranium mineralization in the Tarangaole Area, Ordos Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 40(3): 456-468(in Chinese with English abstract).