

王果,刘波,白一鸣,等.鄂尔多斯盆地北部下白垩统环河组铀成矿地质特征及成矿机理研究[J].世界核地质科学,2025,42(3):485-503. doi:10.3969/j.issn.1672-0636.2025.03.002

WANG Guo, LIU Bo, BAI Yiming, et al. Geological characteristics and metallogenic mechanism of Lower Cretaceous uranium mineralization in northern Ordos basin[J]. World Nuclear Geoscience, 2025, 42(3):485-503(in Chinese).

鄂尔多斯盆地北部下白垩统环河组铀成矿地质特征及成矿机理研究

王果,刘波,白一鸣,王龙辉,李华明,芦帅帅

核工业二〇八大队, 内蒙古 包头 014000

摘要 鄂尔多斯盆地为我国第二大能源盆地,发现了多个大型、特大型铀矿床。盆地内下白垩统环河组上段为主要的找矿层位。通过铀成矿地质特征、蚀变矿物组合和岩石地球化学等方法研究鄂尔多斯盆地北部下白垩统环河组的铀矿化特征、成矿机理,建立成矿模式。下白垩统环河组3个叠加体系域组成细-粗-细的地层结构,为后期铀成矿流体的运移提供建造基础。在成矿早期氧化带的规模有限,主要的蚀变矿物为赤铁矿、褐铁矿、黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方解石和铀石等,成矿环境的还原能力较强,成矿流体的碱性较强,发生强烈的水-岩作用。在成矿作用中晚期,氧化带向盆地内推进,发生强烈的氧化-还原反应,原矿石带、还原带被氧化,成矿环境保持早期的较强还原性。该时期主要蚀变矿物为赤铁矿、褐铁矿、黄铁矿、蒙脱石、绿泥石和铀石等。随着成矿流体的混合,成矿流体逐渐转为弱碱性,硅酸铀酰离子分解,形成大量铀石。

关键词 下白垩统环河组; 蚀变矿物组合; 成矿流体; 成矿模式; 鄂尔多斯盆地北部

中图分类号 P619.14 文献标志码 A 文章编号 1672-0636(2025)03-0485-19

Geological characteristics and metallogenic mechanism of Lower Cretaceous uranium mineralization in northern Ordos basin

WANG Guo, LIU Bo, BAI Yiming, WANG Longhui, LI Huaming, LU Shuaishuai

Geologic Party No. 208, CNNC, Baotou 014000, China

Abstract: The Ordos basin is the second largest energy basins in China, and several large uranium ore deposits have been discovered. The upper member of Lower Cretaceous Huanhe formation in the basin is the main prospecting horizon. In this paper, the uranium mineralization characteristics and metallogenic

基金项目: 中国核工业地质局项目“鄂尔多斯盆地北部鄂托克前旗-东胜地区铀矿资源调查评价与勘查”(编号:202201)、内蒙古自治区“草原英才”项目“鄂尔多斯盆地北部铀资源成矿理论创新和铀矿大基地资源保障能力提升”和中国工程科技发展战略内蒙古研究院项目“内蒙古铀矿大基地资源保障能力研究”(编号:2024NMYB-07)联合资助

收稿日期: 2024-12-02 **改回日期:** 2025-04-11

第一作者: 王果,男,1969年生,正高级工程师,主要从事铀矿地质勘查与科研工作。E-mail: 363395265@qq.com

通信作者: 刘波,男,1984年生,正高级工程师,主要从事铀矿勘查及铀矿床学研究。E-mail: 304110991@qq.com

Supported by China Nuclear Geology Bureau Project “Investigation, Evaluation and Exploration of Uranium Resources in Etoke Qianqi-Dongsheng Area, Northern Ordos Basin” (No. 202201); the Inner Mongolia Autonomous Region “Grassland Talents” project “Uranium resource mineralization theory innovation in the north of Ordos basin and the improvement of resource support capacity of large uranium mine base”; the Inner Mongolia Research Institute of Engineering Science and Technology Development Strategy project “Inner Mongolia Uranium Mine Resource Support Capacity” (No. 2024NMYB-07)

Received date: 2024-12-02 **revised date:** 2025-04-11

First author: WANG Guo, male, born in 1969, senior engineer, PhD, focusing on uranium exploration and scientific research. E-mail: 363395265@qq.com.

Corresponding author: LIU Bo, male, born in 1984, senior engineer, PhD, focusing on uranium exploration and research of deposits. E-mail: 304110991@qq.com

mechanism of Lower Cretaceous Huanhe formation in northern Ordos basin are studied by means of geological characteristics, altered mineral association, rock geochemistry and the metallogenic model is established. The three superimposed system domains of Lower Cretaceous Huanhe formation formed a fine-coarse-fine stratigraphic structure, which provided a foundation for the migration of uranium ore-forming fluids in the later period. In the early stage of mineralization, the scale of the oxidation zone was limited, and the main alteration minerals were hematite, limonite, pyrite, chalcopyrite, sphalerite, calcite and coffinite, etc. The metallogenic environment were of strong reducing capacity, the ore-forming fluid were strongly alkaline, and intense water-rock interaction occurred. In the middle and late stage of mineralization, the oxidation zone advanced into the basin, a strong REDOX reaction developed, the primary ore zone and reduction zone were formed, and the metallogenic environment maintained the early strong reducibility. The main altered minerals in this period were hematite, limonite, pyrite, montmorillonite, chlorite and uranite. With the mixing of ore-forming fluids, ore-forming fluids gradually turn to weak alkaline, uranyl silicate ions decomposed, and a large amount of uranite was formed.

Keywords: Lower Cretaceous Huanhe formation; altered mineral association; ore-forming fluid; ore-forming model; northern Ordos basin

鄂尔多斯盆地是我国北方重要的能源盆地。2000年以来,在鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿找矿取得重要的突破,在中侏罗统直罗组发现皂火壕、纳岭沟、大营和巴音青格利等多个大型、特大型砂岩型铀矿床^[1]。矿床矿体主要赋存于中侏罗统直罗组下亚段辫状河砂体中,矿体多呈板块,受古层间氧化带控制^[2]。伴随着铀矿床的发现,许多学者在成矿物质来源、铀储层、沉积体系、成矿流体及成矿模式方面开展详细研究,建立了铀成矿模式^[3]。近年来,随着侏罗系找矿深度、难度的逐渐加大,核工业二〇八大队在收集资料和编图研究的基础上,重新编图和优选成矿有利地区,认为鄂尔多斯北部下白垩统存在有利的地层砂体、氧化带和铀矿化条件,具有一定的找矿前景^[4]。在编图研究基础上,于2019年对优选的有利地区进行查证,在下白垩统环河组发现工业矿孔,取得下白垩统铀矿找矿的重大突破,落实盆地北部下白垩统环河组首个铀矿床——特拉敖包铀矿床和系列矿产地^[5]。同时,针对白垩系的研究和找矿工作在鄂尔多斯盆地也相继展开。贺锋等^[6]研究鄂尔多斯盆地北部沉积环境、矿体特征和铀矿物学特征,将成矿作用划分沉积期、渗入-渗出成矿和渗出保矿3个阶段,并建立成矿模式。张宇龙等^[5]较为系统地研究了鄂尔多斯盆地西北部特拉敖包铀矿床的沉积环境和铀矿石的物质组成,认为矿体主

要赋存于辫状河三角洲沉积体系中,灰绿色砂岩经历了还原、氧化和再还原的改造,成矿流体具有复杂的多来源的特点。邱林飞等^[7]研究鄂尔多斯盆地北部含矿砂岩中有机质与铀成矿的关系,认为铀矿化与深部渗出的有机流体密切相关,成矿元素可能以有机络合物形式迁移。

前人对盆地北部中侏罗统直罗组开展大量的研究工作^[8-15],对直罗组的沉积体系、地球化学特征、物质来源和构造背景等进行较为深入的分析,相对于直罗组的研究,下白垩统环河组的沉积环境、铀储层、铀成矿机理和成矿模式等的研究开展较少,且缺乏系统性。鄂尔多斯盆地下白垩统环河组铀成矿环境、矿体特征与直罗组存在明显差异,环河组铀矿体位于巨厚层砂岩内部,泥-砂-泥地层结构不明显^[6]。本文在前人研究基础上,针对鄂尔多斯盆地北部下白垩统环河组铀成矿地质特征和成矿机理等进行研究,完善砂岩型铀成矿理论,同时为鄂尔多斯盆地白垩系铀矿找矿成果的扩大提供支撑。

1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地处于华北地台西部,北部为中亚造山带南部的阴山造山带和河套断陷,西部为阿拉善地块南缘和贺兰山造山带,东部为吕梁山造山带^[16-17]。盆地可划分为伊盟隆起

区、渭北隆起区、晋西挠褶区、伊陕斜坡、天环坳陷和西缘逆冲带6个二级构造单元^[18]。研究区横跨西部的天环向斜和北部的伊盟隆起(图1a)。

盆地中新生代的基底主要为太古代、元古代和古生代的海相和海陆交互沉积。盆地在三叠世转为中生代的陆相沉积,接受更加广泛的河流-湖泊相碎屑岩沉积^[19]。中生代三叠系、侏罗系和白垩系构成鄂尔多斯盆地中生代的沉积主体。三叠系主要发育干旱-半干旱气候条件下的三角洲-湖泊相碎屑岩沉积^[20]。侏罗系主要发育下侏罗统富县组、中侏罗统延安组与直罗组 and 上侏罗统安定组的河流相、三角洲-湖泊相的灰色、灰绿色和杂色的碎屑岩沉积。盆地内白垩系主要为下白垩统,缺失上白垩统沉积。下白垩统主要发育洛河组(K₁l)、环河组(K₁h)、罗汉洞组(K₁lh)和泾川组(K₁j)(图

1b),在盆地的东部为东胜组(K₁d)和伊金霍洛组(K₁y)。下白垩统洛河组角度不整合于侏罗系安定组或直罗组之上,主要发育干旱条件下的冲积扇、河流-湖泊相和沙漠相的碎屑岩沉积。下白垩统环河组分布于盆地的大部,与下伏的洛河组呈平行不整合接触。环河组主要发育辫状河、辫状河三角洲-湖泊相的粗碎屑岩沉积,局部可见沙漠相沉积的碎屑岩。下白垩统罗汉洞组发育于盆地的西部和北部,主要发育冲积扇、河流和沙漠相的碎屑岩沉积^[21]。盆地北部NEE向断裂发育,其中主要的断裂为泊江海子断裂、三眼井断裂和乌兰吉林庙断裂。这些断裂切穿了中侏罗统延安组、直罗组,上侏罗统安定组,下白垩统洛河组、环河组,可为下白垩统提供大量的还原性气体,而这些还原性气体形成了还原障,有利于后期铀矿体的富集^[12]。

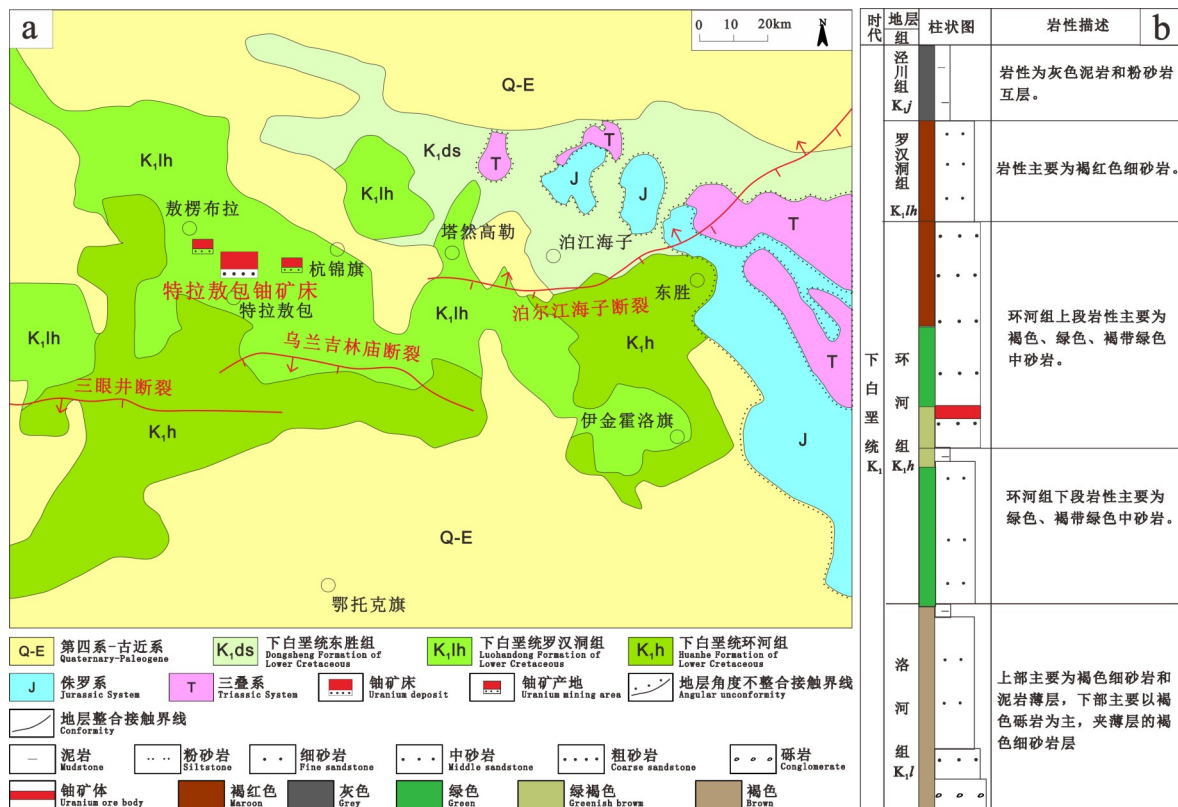


图1 鄂尔多斯盆地北部地质图(a)、下白垩统柱状图(b)

Fig. 1 Geological map of northern Ordos basin (a), stratigraphic column of Lower Cretaceous (b)

2 研究方法及样品采集与分析测试

2.1 研究方法及样品采集

在地层划分和对比的基础上,将鄂尔多斯盆

地北部的下白垩统环河组分为环河组上段和环河组下段。在此基础上,编制目的层下白垩统环河组上段的地层厚度、砂体厚度、含砂率、氧化率等值线图及沉积体系图等系列图件,研究铀矿化

赋存的有利沉积相、氧化分带及氧化带对矿床和矿体的控制作用,判断沉积、成矿物质及铀成矿流体的来源、性质等特征。在钻孔岩心编录的基础上,对采自特拉敖包矿床中的红色砂岩、灰褐色和灰色含矿砂岩中的 15 件岩矿鉴定、扫描电镜样品进行岩石的类型、物质来源及蚀变矿物的共生组合特征的研究。

52 件主量元素、微量元素和稀土元素样品采自鄂尔多斯盆地北部特拉敖包铀矿床典型的钻孔氧化带、矿石带和还原带中的红色、红褐色砂岩,绿色、褐绿色砂岩,褐色、褐灰色砂岩,以研究铀在不同类型砂岩中的分布及其与其他元素的关系、成岩-成矿流体的来源及铀矿化的成因机理(图 2)。

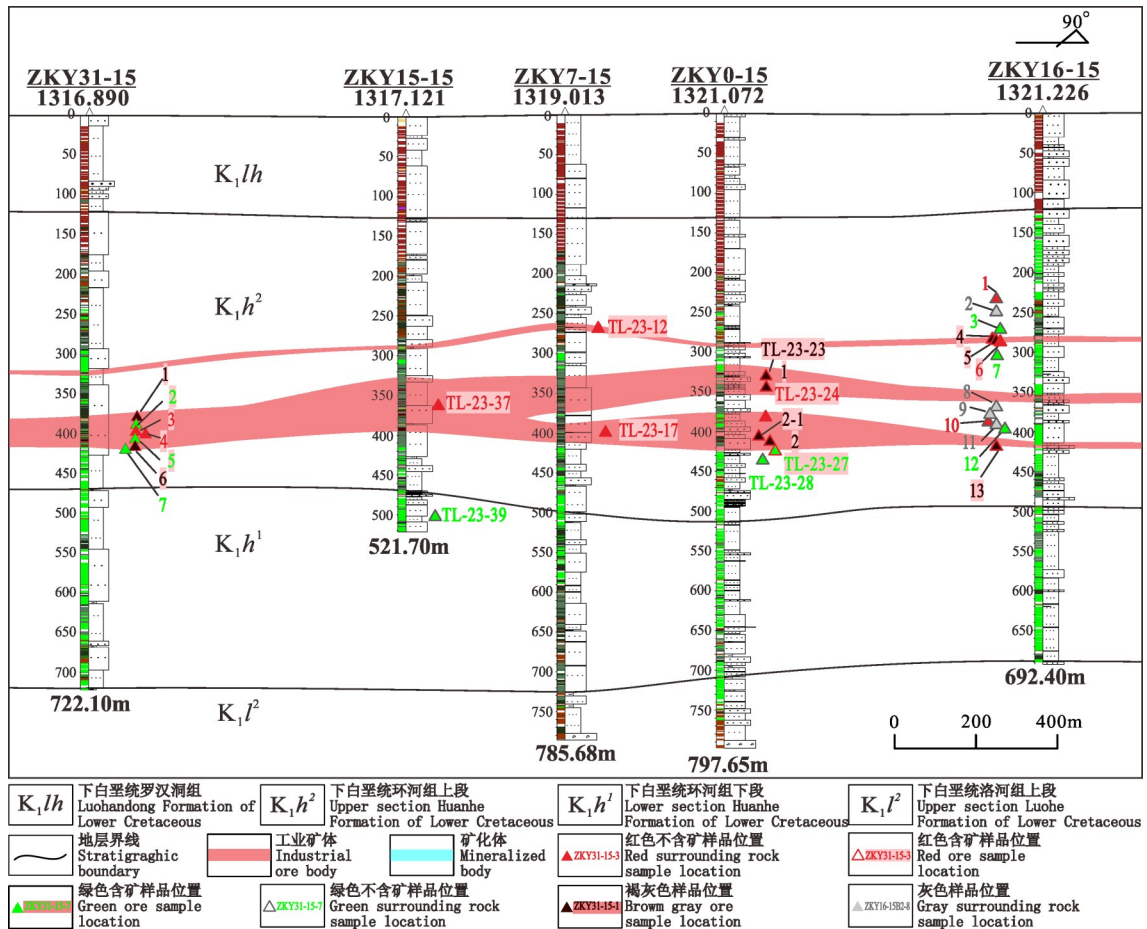


图 2 特拉敖包矿产地矿体走向剖面示意图及取样分布位置
Fig. 2 Schematic striking profile of Telaa Bao ore occurrences and sampling location

2.2 分析测试方法

全分析样品的测试工作在武汉上谱分析测试中心完成,仪器为 X 荧光光谱分析仪,FeO 含量测试采用《硅酸盐岩石化学分析方法 第 14 部分:氧化亚铁量测定:GB/T 14506.14—2010》^[22]进行;其他组分采用《硅酸盐岩石化学分析方法 第 28 部分:16 个主次成分量测定:GB/T 14506.28—2010》^[23]进行。微量元素、稀土元素测试和 LA-CP-MS 面扫描均在上谱实验室完成。微量元素和稀土元素分析采取电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7700e),按照《硅酸盐岩石化学分析方法:GB/T

14506.30—2010》^[24]进行。

扫描电镜及能谱分析在内蒙古科技大学冶金工程重点实验室进行分析测试。在上机分析测试之前,选取较好的新鲜铀矿样品,磨制没有盖玻片的电子探针片,随后将磨制好的薄片放入干燥器皿中等待镀金和上机测试。分析测试过程中采用的仪器:捷克 FEI 公司生产的 Nova Nano SEM 450 型号的扫描电镜和英国牛津仪器公司生产的 X-Max 电制冷 X 射线能谱仪。室内温度控制在(20±2)℃和湿度<80%,仪器主机部分一直保持在高真空状态。分辨率:高真空

为1.0 nm(15 kV),1.4 nm(1 kV);低真空为1.8 nm(3 kV,采用Helix探头);聚焦范围:模式I介于1~60 mm之间,模式II介于1~7 mm之间(1 kV);加速电压:50 V~30 kV,连续可调;电子束流:可达200 nA;放大倍数:100~600 000;倾斜角度:-15°~75°;样品台移动范围:X=Y=110 mm,Z=25 mm。

3 铀成矿地质特征

3.1 白垩系结构及目的层岩石组合特征

鄂尔多斯北部的白垩系主要发育下白垩

统,缺失上白垩统。下白垩统主要发育洛河组、环河组、罗汉洞组和泾川组。下白垩统洛河组与下伏中侏罗统直罗组呈角度不整合接触,主要为干旱气候下曲流河泛滥平原、河道、决口扇相沉积,为低叠加的体系域(LAST)(图3)。下白垩统环河组分布于整个鄂尔多斯盆地北部,与下伏洛河组呈平行不整合接触。下白垩统环河组可划分为环河组下段和环河组上段,其中环河组上段为主要的找矿目的层。

下白垩统环河组整体具有细-粗-细的特征。环河组下段主要发育辫状河道相沉积,主

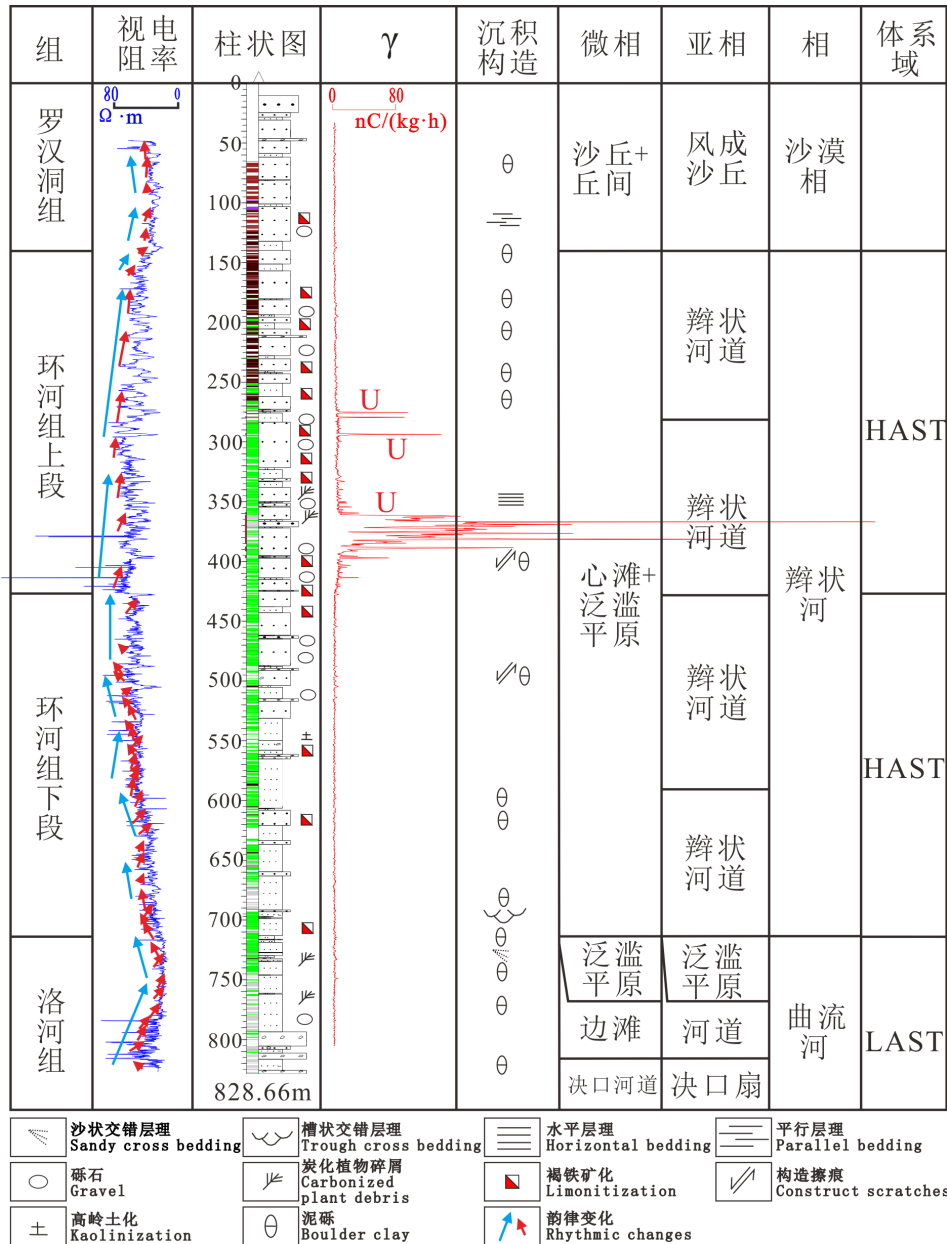


图3 鄂尔多斯北部特拉放包地区典型钻孔柱状图

Fig. 3 Typical drill histogram of the Telaa Bao occurrences in northern Ordos

要的岩性为灰绿色、黄色、褐灰色和绿色的砾岩、砂砾岩、砂岩和泥岩等。环河组上段主要发育辫状河相、辫状河三角洲-湖泊相沉积,主要的岩性为紫红色、紫色、灰绿色、褐黄色、褐灰色和绿色的砾岩、砂砾岩、粗砂岩、中砂岩、细砂岩和泥岩等。

下白垩统环河组由 2 个高叠加体系域 (HAST) 组成,与下白垩统洛河组组成细-粗-细的地层结构,为后期成矿流体运移提供基础(图 4f)。下白垩统罗汉洞组主要为冲积扇和沙漠相沉积,发育沙漠扩展体系域,气候也由原来的半干旱-半湿润转为干旱。下白垩统环河组上段砂体呈 NW-SE 和 SN 向展布,砂体厚介于 250~375 m 之间,含砂率介于 96%~98% 之间,泥岩隔层较少为 5~30 层,在河道的中南部泥岩隔层数和厚度变大,铀矿体受发育泥岩隔层的河道砂体控制明显。鄂尔多斯北部特拉敖包地区氧化砂体呈近 SN 向展布,氧化率一般介于 10%~70% 之间,铀矿体位于氧化率介于 0~80% 之间范围内,受氧化-还原过渡带控制(图 4e)。

3.2 蚀变矿物组合特征

鄂尔多斯北部下白垩统环河组上段的含矿砂岩中的主要蚀变矿物为赤铁矿、褐铁矿、黄铁矿、方解石、绿泥石和蒙脱石等,铀矿物主要为铀石(图 5a、6a)。

赤铁矿主要发育于紫红色、红色砂岩中,赤铁矿呈针状、薄膜状包裹于石英、长石的表面或呈团块状分布于砂岩的孔隙中,局部可见绒球状分布于砂岩的孔隙中。褐铁矿化的分布较赤铁矿化的规模小,零星分布于赤铁矿化砂岩中主要呈薄膜状赋存于颗粒的表面和砂岩的孔隙中。黄铁矿为砂岩中主要的蚀变矿物,主要分布于灰绿色、褐灰色和灰色砂岩的孔隙中。黄铁矿在砂岩的孔隙中主要呈五角十二面体状的球状集合体,局部可见四面体、八面体和胶状的黄铁矿。铀石主要分布于五角十二面体黄铁矿的表面、颗粒间或被颗粒所包裹。

绿泥石主要分布于绿色、灰绿色砂岩中。绿泥石主要呈絮状分布于砂岩的孔隙中或矿物的表面。在绿色砂岩的孔隙中可见铁氧化

物、黄铁矿和铀石被绿泥石包裹。蒙脱石主要分布于灰色、褐灰色中砂岩中,局部可见呈蜂窝状的蒙脱石包裹于铀石的表面。方解石呈自形晶分布于砂岩的孔隙中,在方解石的周围被球状铁氧化物包围(草莓状黄铁矿氧化)。

黄铜矿主要呈板状分布于砂岩的孔隙中,在其表面分布有五角十二面体黄铁矿和柱状的硒铅矿。闪锌矿呈板状分布于砂岩的孔隙中,在其边部可见方铅矿。矿床内的铀矿物主要为铀石,呈针状、四方柱状,主要分布于黄铁矿的边部、云母的解理内及植物胞腔中。

3.3 主量元素地球化学特征

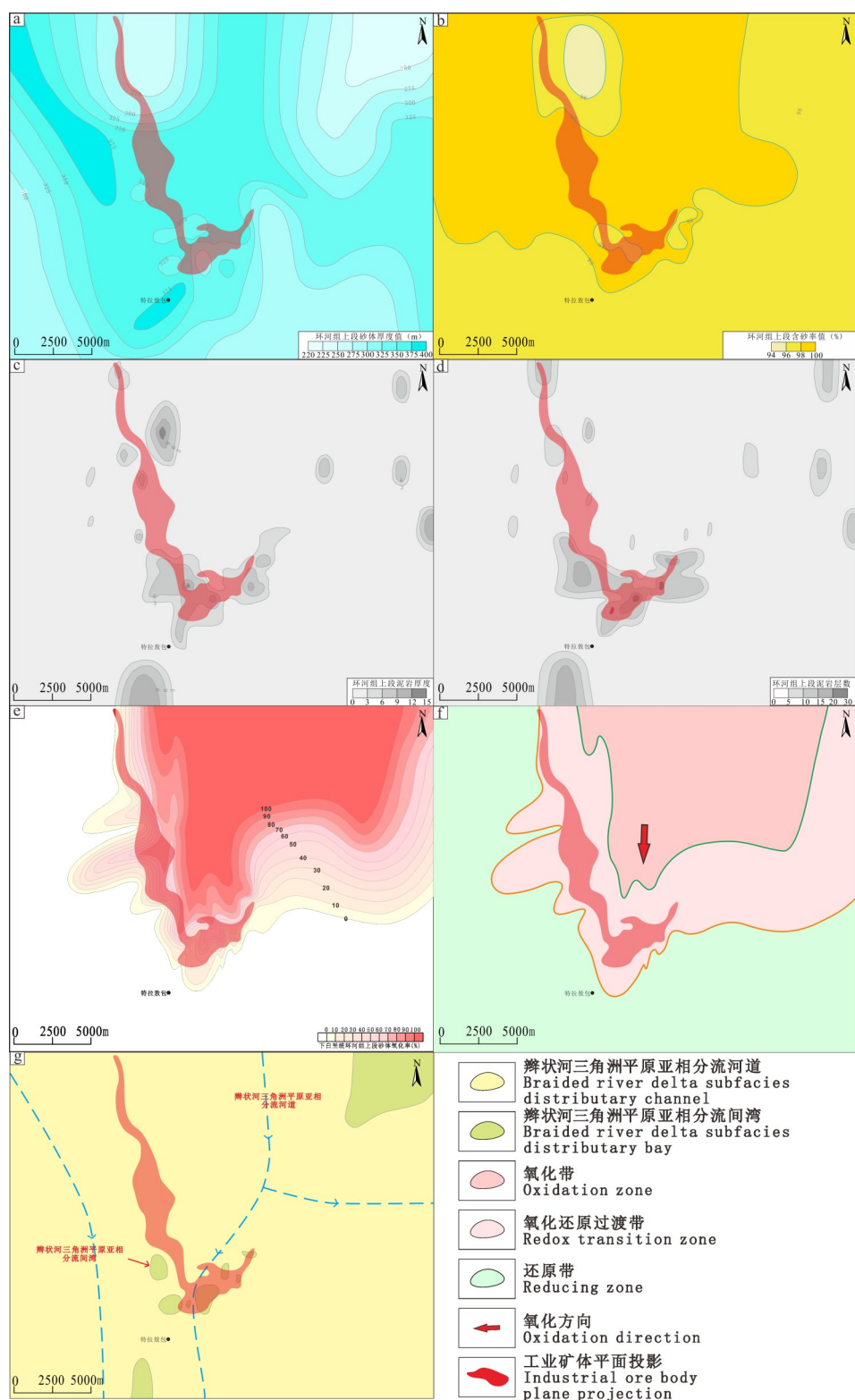
红色、褐红色和红褐色的不含矿砂岩中的 FeO、SiO₂、Al₂O₃、LOI、Na₂O 和 K₂O 含量较红色、褐红色和红褐色含矿砂岩高,P₂O₅、Fe₂O₃ 和 TiO₂ 含量较红色、褐红色和红褐色含矿砂岩低(图 7),其中 FeO、MgO 的含量变化范围较大,FeO 在红色含矿砂岩中的含量高于褐灰色、灰色砂岩的含量。绿色、褐绿色含矿砂岩的 FeO、Fe₂O₃、CaO、LOI、Na₂O、K₂O、P₂O₅、TiO₂ 和 MgO 的含量高于绿色、褐绿色含矿砂岩。

绿色、褐绿色含矿砂岩的 CaO、LOI、K₂O、P₂O₅、TiO₂ 和 MgO 含量高于其他类型砂岩,绿色、褐绿色含矿砂岩的 SiO₂ 含量低于除红色、褐红色和红褐色含矿砂岩的其他类型砂岩。灰色、褐灰色含矿砂岩较还原带的灰色砂岩具有高的 CaO、SiO₂、LOI 和 K₂O 含量,低的 FeO、Fe₂O₃、Al₂O₃、Na₂O、P₂O₅、TiO₂ 和 MgO 含量。

3.4 微量元素地球化学特征

对钻孔中 52 件样品进行微量元素和稀土元素分析(图 8、9)。砂岩的 Σ REE 含量介于 66.49~1226.17 $\times 10^{-6}$ 之间,LREE 含量介于 60.27~752.59 $\times 10^{-6}$ 之间,HREE 含量介于 6.22~101.33 $\times 10^{-6}$ 之间。La_N/Yb_N 和 La_N/Sm_N 比值分别介于 0.09~4.80 之间,0.36~-1.41 之间。样品的 Eu/Eu* 比值介于 0.93~1.60 之间。

从微量元素的蛛网图可以看出,红色的含矿砂岩较红色的氧化砂岩更富集亲石元素(V、Co 和 Ni)、亲硫元素(Cu、Pb 和 Zn)和稀土元素(La、Ce、Nd、Sm、Y、Yb 和 Lu)。绿色、褐绿色砂岩较绿色、褐绿色含矿砂岩中微量元素的含量



注1: 砂体厚度通过岩心编录统计所得

注2: 含砂率通过单孔统计所得 (计算公式: 砂岩累计厚度/层厚×100%)

注3: 氧化率通过单孔统计所得 (计算公式: 红色、褐红色、褐色砂岩累计厚度/砂岩总厚度×100%)

图4 鄂尔多斯盆地北部下白垩统环河组上段砂体厚度(a)、含砂率(b)、泥岩厚度(c)、泥岩层数(d)、氧化率(e)等值线图及氧化分带(f)和沉积体系(g)与铀矿体的分布图

Fig. 4 Contour map of the thickness (a), sand content (b), claystone thickness (c), number of claystone layers (d), oxidation rate (e) of the Lower Cretaceous sandstone in the northern Ordos basin, the distribution map of oxidation belt (f) and sedimentary system (g) as well as uranium ore body

相似。个别样品更富集 V、Zn 和稀土元素。褐灰色、灰色含矿砂岩较褐灰色、灰色砂岩更富集亲硫元素 (Cu、Pb 和 Zn), 稀土元素 (La、Ce、Nd、Sm、Y、Yb 和 Lu) (图 8、9)。从稀土元素的蛛网图可以看出, 红色、褐红色含矿砂岩较红色、褐红色砂岩更富集稀土元素 (中、重稀土更加富集) (图 9)。绿色、褐绿色含矿砂岩较绿色褐绿色砂岩 (除个别样品外) 稀土元素的分布特征较为相似。灰色、褐灰色含矿砂岩较灰色、褐灰色砂岩更富集中、重稀土元素。

4 铀成矿机理与成矿模式

4.1 地层结构、沉积体系与铀矿化的关系

盆地白垩系主要发育下白垩统洛河组、环河组上段、环河组下段和罗汉洞组, 其中主要的含矿目的层为下白垩统环河组上段 (图 3)^[25]。下白垩统洛河组主要发育冲积扇、曲流河及沙漠相沉积^[26]。在下白垩统洛河组顶部主要发育一套低叠加体系域 (LAST) 的曲流河—泛滥平原沉积; 下白垩统环河组下段主要为高叠加体系域 (HAST) 的辫状河—分流间湾沉积; 辫状河道具有极大的宽厚比, 主要为中细砂岩, 含砂率高 (大于 90%), 正粒序特征明显, 具有牵引流沉积特征。

环河组上段主要由 3 个高叠加体系域的辫状河沉积组成, 底部的高叠加体系域由箱型、钟型的叠加样式组成, 中部由加积的箱型叠加样式组成, 上部由钟型叠加样式组成, 构成细—粗—细的地层结构, 有利于流体的运移。铀矿化主要赋存于下白垩统环河组上段底部的高叠加体系域中, 部分赋存于顶部的高叠加体系域中, 受高叠加体系域辫状河道砂体的控制。河道中的泥岩隔层为成矿流体的运移提供隔档层, 有利于成矿流体的运移^[27]。

4.2 氧化带、蚀变矿物组合与成矿期

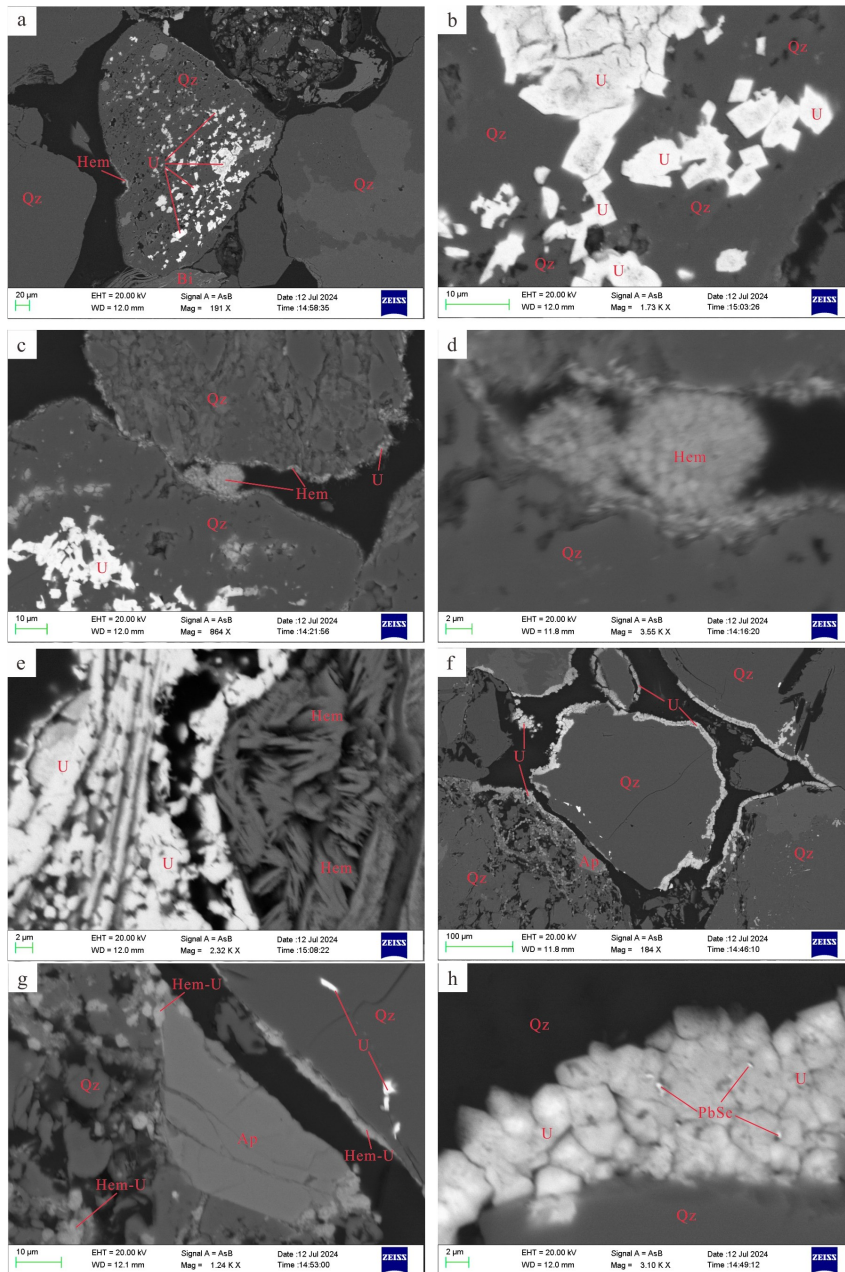
盆地北部白垩系的氧化带发育规模较大, 从盆地边缘到盆地内依次发育完全氧化带、氧化—还原过渡带和还原带 (图 4f)。矿体主要分布于下白垩统环河组上段氧化—还原过渡带中, 剖面上矿体主要分布于褐色砂岩向绿色砂岩过渡的褐灰色、灰色砂岩中, 矿体受氧化前锋线控制^[4], 砂体的氧化率介于 10%~80%之

间 (图 4e、f)。在红色、黄色氧化砂岩中, 大量针状、薄膜状、絮状和胶状的赤铁矿发育于砂岩的孔隙中, 局部在形成赤铁矿的过程中保留了草莓状、球状黄铁矿的形态。红色含矿砂岩的孔隙中可见早期形成的黄铁矿被氧化形成赤铁矿, 铀石被赤铁矿包裹, 同时红色含矿砂岩的 FeO 含量高于灰色、褐灰色砂岩, 低于不含矿的红色砂岩, 表明砂岩在成矿早期在其孔隙中形成大量的黄铁矿和铀石。随着砂岩的氧化, 大量的黄铁矿被氧化为赤铁矿、褐铁矿。由于砂岩在遭受氧化过程中, 部分铀石经氧化以络合物的形式随氧化流体迁移。从现有的分析结果可见, 红色的含矿砂岩仍然具有高的 FeO 含量, 使得红色含矿砂岩中保留部分铀石。同时在砂岩的孔隙中可以观察到部分铀石等铀矿物分布于絮状赤铁矿的表面, 表明絮状赤铁矿吸附后期形成的铀矿物 (图 5c)。

含矿砂岩孔隙中的黄铁矿呈松散的球状集合体或形成胶状黄铁矿 (大量的黄铁矿聚集)。铀矿物主要分布于黄铁矿的表面或边缘。在沉积和成岩的早期, 地层中的有机质分解形成大量的 CH₄ 等烃类气体。甲烷等烃类气体和地层中的 SO₄²⁻ 发生反应形成大量的 H₂S。H₂S 与砂岩孔隙中的 Fe、Cu、Pb、Zn 和 Se 发生反应形成黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿和硒铅矿等金属硫化物^[7]。砂岩孔隙中大量的黄铁矿聚集形成球状, 在形成黄铁矿的同时, 随着铀成矿环境的变化, 碳酸铀酰离子解离, 形成大量的铀石, 同时在砂岩的孔隙中形成方解石 (图 5c、d)。

在过渡带形成的绿色、褐灰色、灰色砂岩中部分铀石等铀矿物被绿泥石和蒙脱石所包裹, 部分分布于绿泥石和蒙脱石的表面, 表明部分铀矿物形成于绿泥石化和蒙脱石化之前, 部分形成近于或晚于绿泥石化和黏土化^[28]。

含矿砂岩的长石和石英等矿物发生溶蚀, 形成溶蚀孔洞, 铀矿物除充填于含矿砂岩的孔隙中, 同时充填于含矿砂岩的石英和长石的溶蚀孔洞中。石英、长石表面大量的溶蚀孔洞表明含矿砂岩在成矿过程中经历强烈的水—岩作用。石英在酸性条件下难以溶蚀, 但在 pH 呈碱性的条件下, 会发生强烈的溶蚀作用, 表明

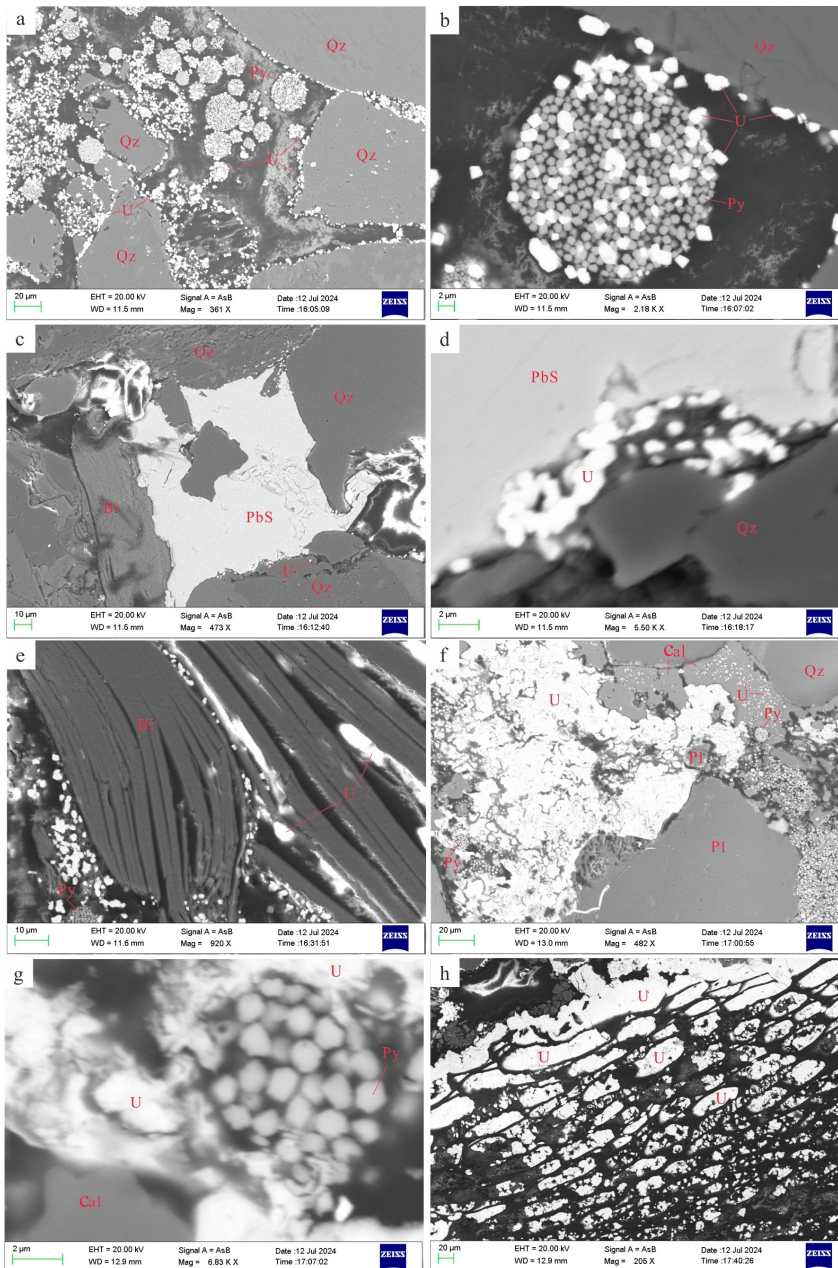


a—红色砂岩中石英碎屑 (Qz) 被溶蚀, 在溶蚀孔洞中发育铀石 (U); b—铀石分布于石英 (Qz) 的溶蚀孔洞中; c—红色砂岩中石英 (Qz) 被溶蚀, 在溶蚀孔洞中发育铀矿物, 石英颗粒的边缘被赤铁矿 (Hem) 包裹, 赤铁矿吸附铀 (U); 在砂岩的孔隙中发育其他赤铁矿化 (Hem) (保留黄铁矿的假晶); d—红色砂岩孔隙中的球状黄铁矿被氧化成赤铁矿 (Hem), 保留黄铁矿的假晶; e—针状赤铁矿边缘被铀矿物包裹; f—石英的溶蚀孔洞中发育铀矿物和铁氧化物 (Hem), 赤铁矿吸附铀, 同时石英被铀矿物 (U) 包裹; g—红色砂岩中石英被强烈的溶蚀, 在溶蚀孔洞及石英颗粒的边缘发育铁氧化物, 铁氧化物吸附铀; h—红色氧化砂岩中石英颗粒边缘分布的铀矿物, 在铀矿物中发育硒铅矿 (PbSe)。

a-Dissolved Quartz debris (Qz) in red sandstone and uranite in dissolution hole (U); b-Coffinite the dissolution hole of quarts (Qz); c-Dissolved quartz (Qz) in red sandstone, which coated by hematite absorbing uranium and filled by uranium minerals in the dissolution holes. Hematization (Hem) (pseudocrystalline with pyrite retained) developed in the pores of the sandstone; d-Globular pyrite oxidized to hematite (Hem) in the pores of red sandstone and retained as the pseudocrystalline of pyrite; e-The acicular hematite coated with uranium minerals; f-Uranium minerals and iron oxides (Hem) develop in the solution holes of quartz, hematite adsorbs uranium, and quartz coated with uranium minerals (U); g-Strongly dissolved Quartz in red sandstone and iron oxides developing around the dissolution holes and quartz particles and adsorbing uranium; h-Uranium minerals distributed around the quartz grains in red oxidized sandstone and containing PbSe

图5 鄂尔多斯北部下白垩统铀矿石中典型的蚀变矿物组合(1)

Fig.5 Typical altered mineral association in Lower Cretaceous uranium ore in northern Ordos(1)



a—褐灰色砂岩孔隙中发育大量的球状黄铁矿 (Py)，球状黄铁矿由多个自形的黄铁矿 (Py) 颗粒组成；铀矿物 (U) 分布于黄铁矿间及其表面；b—铀矿物分布于石英颗粒 (Qz) 的边缘及球状黄铁矿 (Py) 间及其表面；c—褐灰色砂岩砂岩孔隙中发育方铅矿 (PbS)，在方铅矿 (PbS) 和石英颗粒 (Qz) 的边缘发育铀矿物；d—褐灰色砂岩孔隙中铅锌矿和方解石间发育铀矿物；e—褐灰色砂岩中发育黑云母 (Bi)，在黑云母的解理和边缘分布大量的铀矿物 (U)；f—褐灰色砂岩的孔隙中分布大量胶状的铀矿物 (U)、方解石 (Dol) 和黄铁矿 (Py)；g—草莓状黄铁矿边缘 (Py) 和颗粒间分布铀矿物 (U)；h—植物包腔中发育大量的铀矿物 (U)。

a—Spheroidal pyrites (Py) developed in the pores of brown gray sandstone which is composed of many idiomorphic pyrite (Py) particles and with uranium mineral (U) in and around the grain; b—Uranium minerals distributed around the quartz particles (Qz), between and around the spheroidal pyrite (Py); c—Lead-zinc ore (PbS) developed in the sandstone pores, and uranium minerals developed in the margins of lead-zinc ore (PbS) and quartz particles (Qz); d—Uranium minerals developed between lead-zinc ore and calcite in the pores of brown gray sandstone; e—Biotite (Bi) developed in brown gray sandstone with a large number of uranium minerals (U) distributed in the cleavage and around the margin; f—A large number of colloidal uranium minerals (U), calcite (Dol) and pyrite (Py) distributed in the pores of brown gray sandstone; g—Uranium mineral (U) developed in and between the strawberry pyrite grain (Py); h—A large amount of uranium mineral (U) developed in plant envelope.

图 6 鄂尔多斯北部下白垩统铀矿石中典型的蚀变矿物组合(2)

Fig. 6 Typical altered mineral association in Lower Cretaceous uranium ore in northern Ordos(2)

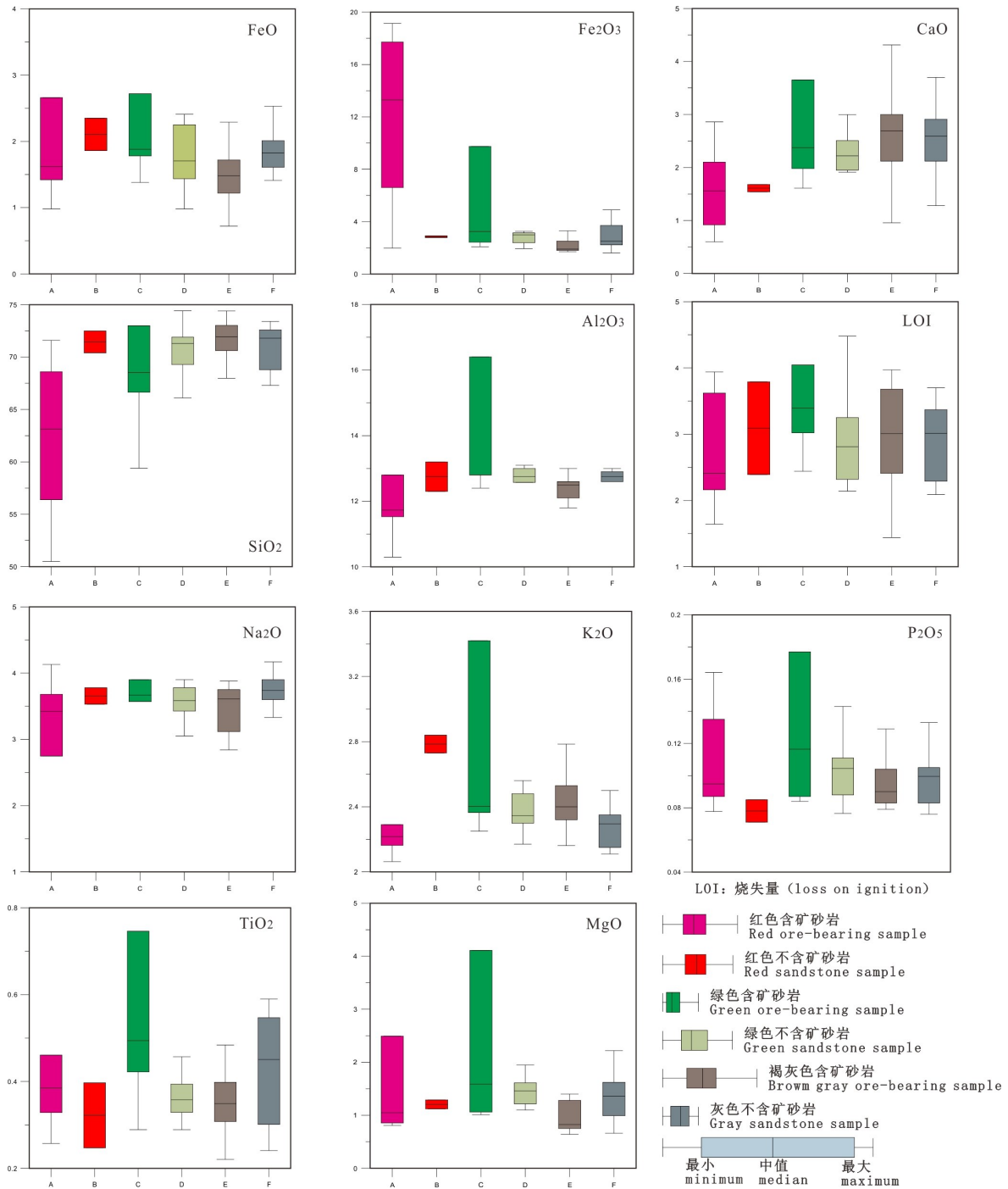


图 7 鄂尔多斯北部下白垩统铀矿石中主要元素含量箱装图
 Fig. 7 Box plot of major element content in Lower Cretaceous uranium ore in northern Ordos

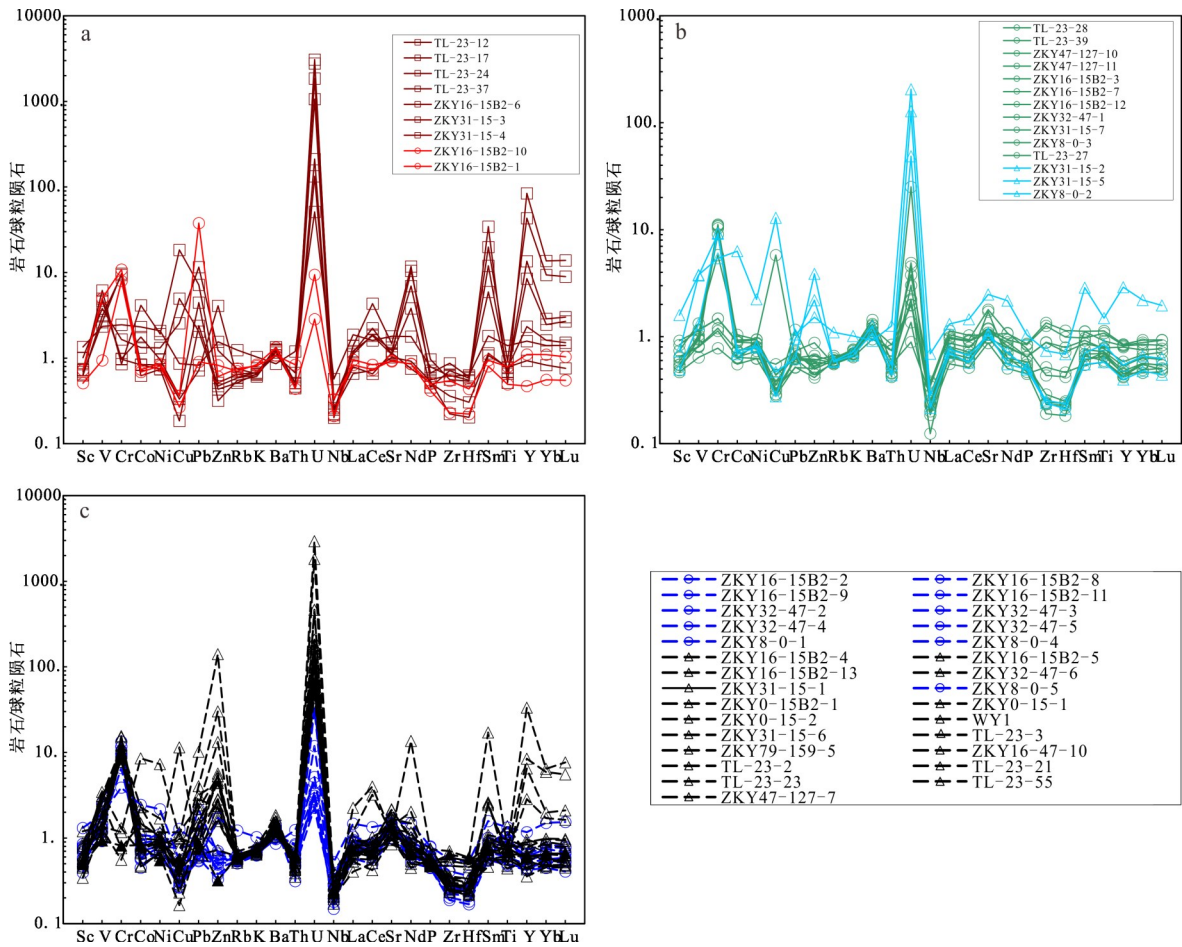
在成矿作用过程中成矿流体由早期的偏酸性演化为碱性,在碱性条件下发生长石、石英的溶蚀作用,随着石英和长石的溶蚀,形成大量的铀石充填于砂岩的孔洞中^[30]。

虽然盆地内产出的砂岩型铀矿床具有连续成矿的特点,但根据铀矿物与黄铁矿、赤铁矿的关系,下白垩统铀成矿作用划分为 2 个阶段(图 10)。成矿早期主要的矿物组合为赤铁

矿、褐铁矿、球状黄铁矿集合体、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、方解石和铀石等,中晚期发育大量赤铁矿、褐铁矿、胶状黄铁矿、方解石、蒙脱石、绿泥石和铀石等(图中断续的黑线表示形成的矿物数量较少)。

4.3 成矿机理及成矿模式

早白垩世,鄂尔多斯盆地北部为温暖湿润的气候条件,沉积下白垩统环河组辫状



a—红色砂岩；b—绿色砂岩；c—灰色砂岩和褐灰色砂岩。

a-Red sandstone; b-Blue sandstone; c-Gray sandstone

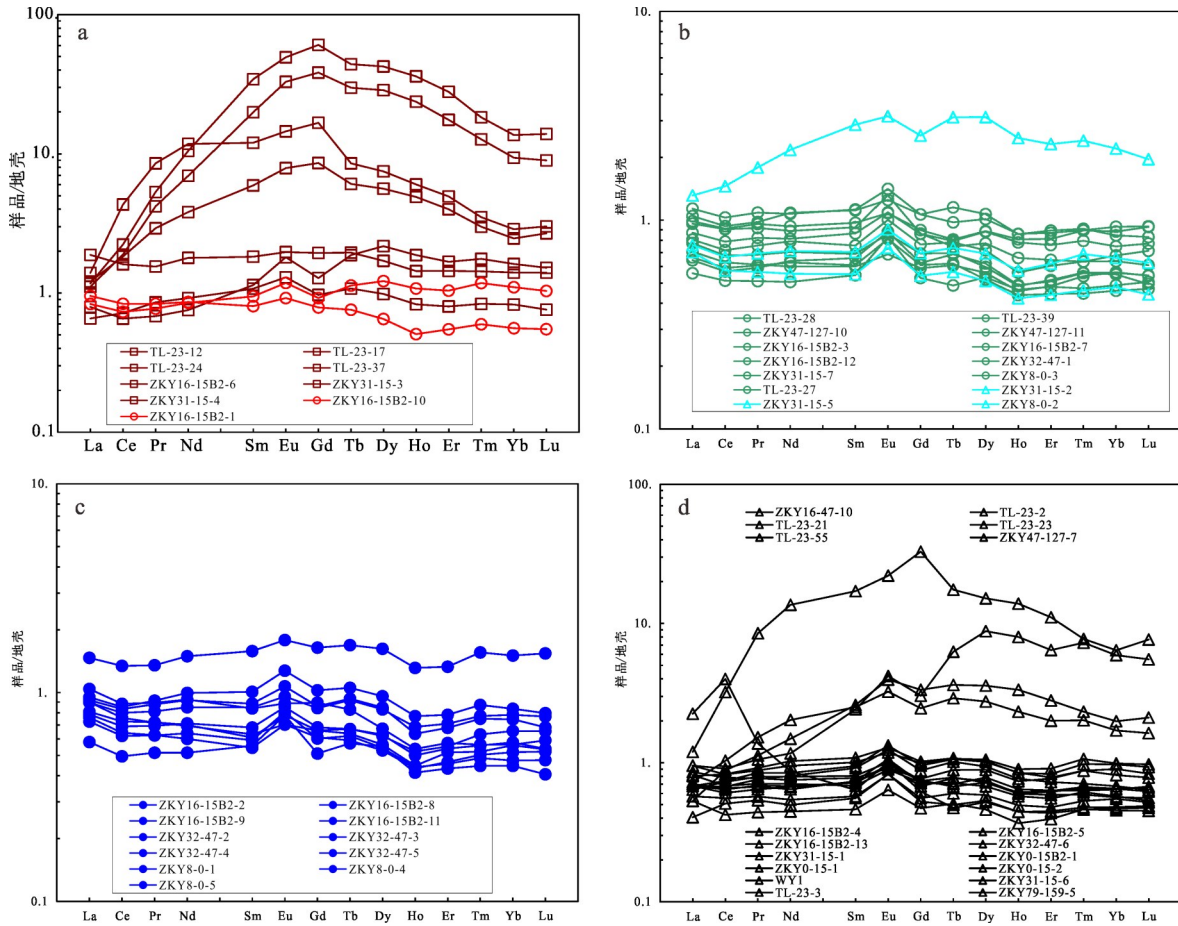
图 8 鄂尔多斯北部不同类型砂岩微量元素配分模式图(球粒陨石数据引自文献[29])

Fig. 8 Chondrite normalized spider diagram of trace elements in different types of sandstones in northern Ordos

河-湖泊相沉积,局部发育沙漠相。早白垩世晚期—晚白垩世(环河组沉积后),受北部蒙古-鄂霍茨克洋挤压的影响,盆地东北部持续抬升,在盆地北西部沉积下白垩统罗汉洞组、泾川组,整体缺失上白垩统^[31]。随着鄂尔多斯盆地北部的持续抬升,表生的成岩-成矿流体主要由盆地的东北部向盆地内渗流,在盆地的西部和北部形成大规模的潜水、潜水-层间氧化带(逐渐向盆地内迁移),同时形成大规模的铀矿化异常。铀矿化主要分布于氧化-还原过渡带的绿色和褐灰色、灰色砂岩中,部分分布于氧化带的褐红色、红色砂岩中。氧化的红色、褐红色砂岩的碎屑物的表面和孔隙中发育大量的赤铁矿化,部分赤铁矿保留球状黄铁矿的假晶。大量铀矿物被针状、絮状的赤铁矿包裹,表明其形成早

于赤铁矿化。红色含矿砂岩具有高的 Fe_2O_3 含量, FeO 和烧失量较不含矿的红色砂岩低,表明在成矿作用的早期,氧化带向盆地内发育的规模较为有限(现今氧化的红色、褐红色含矿砂岩原来未被氧化),在过渡带内(现今的氧化带)形成大量的黄铁矿和铀矿化(图 11、12)。

在氧化的红色含矿砂岩中的长石和石英均遭受强烈的溶蚀作用,长石、石英的表面均不同程度地发育溶蚀孔洞。部分铀矿物充填于长石、石英的溶蚀孔洞中。石英在酸性环境下不容易溶解,但在碱性环境下容易溶解形成溶蚀孔洞。因此,在砂岩型铀成矿作用早期成矿流体为碱性流体^[32]。氧化带中红色含矿砂岩的 SiO_2 、 Na_2O 和 K_2O 的含量较红色砂岩低,也表明在成矿作用过程中发生强烈

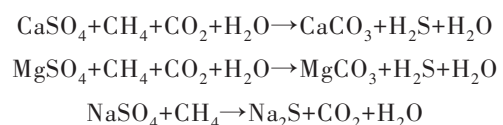


a—红色砂岩; b—绿色砂岩; c—灰色砂岩; d—褐灰色砂岩。
 a-Red sandstone; b-Blue sandstone; c-Gray sandstone; d-Brown gray sandstone.
 图9 鄂尔多斯北部不同类型砂岩稀土元素配分模式图(球粒陨石数据引自文献[29])
 Fig. 9 Chondrite normalized REE pattern of different types of sandstones in northern Ordos

的水-岩作用,大量的石英、长石被溶蚀, SiO₂、K₂O 和 Na₂O 被溶解。碱性环境石英中的 SiO₂ 溶解和运移,成矿流体中可溶的 H₂SiO₄²⁻ 和 H₃SiO₄⁻ 含量增加,随着 pH 的降低转变为易于沉淀的 H₄SiO₄^[33]。在碱性 (pH=9~10) 溶液中 U、Si 易溶解和迁移,在弱碱性环境、弱酸性环境下, U、Si 易于沉淀。因此,在成矿的早期成矿流体的碱性较强,在成矿作用中晚期成矿流体逐渐转变为弱碱性。鄂尔多斯北部下白垩统含矿砂岩中发育大量的黄铁矿,表明在成矿作用早期成矿流体具有较强的还原性,且碱性较强。另外,随着砂岩氧化程度的提高,有机质的分解和黄铁矿等的氧化,形成大量的赤铁矿。

在晚白垩世—古近纪,随着氧化带继续向盆地内迁移,原有的过渡带等被氧化成氧化带。由于原有过渡带高的 FeO 含量,氧化后

在砂岩的孔隙中虽然形成大量的赤铁矿,但保留了较高的 FeO 含量(高的还原容量),部分铀石未被完全氧化,没有随成矿流体迁移,被后期形成的赤铁矿包裹。盆地地层中的石膏、MgSO₄ 和 NaSO₄ 与盆地内有机质分解等来源的 CH₄ 发生反应,在砂岩孔隙中形成碳酸盐,同时形成大量的 H₂S 气体。随着含铀含氧水向盆地内渗流,大量的碳酸铀酰离子 ([UO₂(CO₃)₃]⁴⁻)、Cu²⁺、Pb²⁺、Zn²⁺ 和 Ca²⁺ 在遇到 H₂S、炭屑等还原介质过程中发生氧化-还原反应,在过渡带内形成黄铁矿、方解石、铀石、黄铜矿、闪锌矿和方铅矿。水-岩反应的持续进行,形成大量的蒙脱石和绿泥石。主要的化学反应如下:



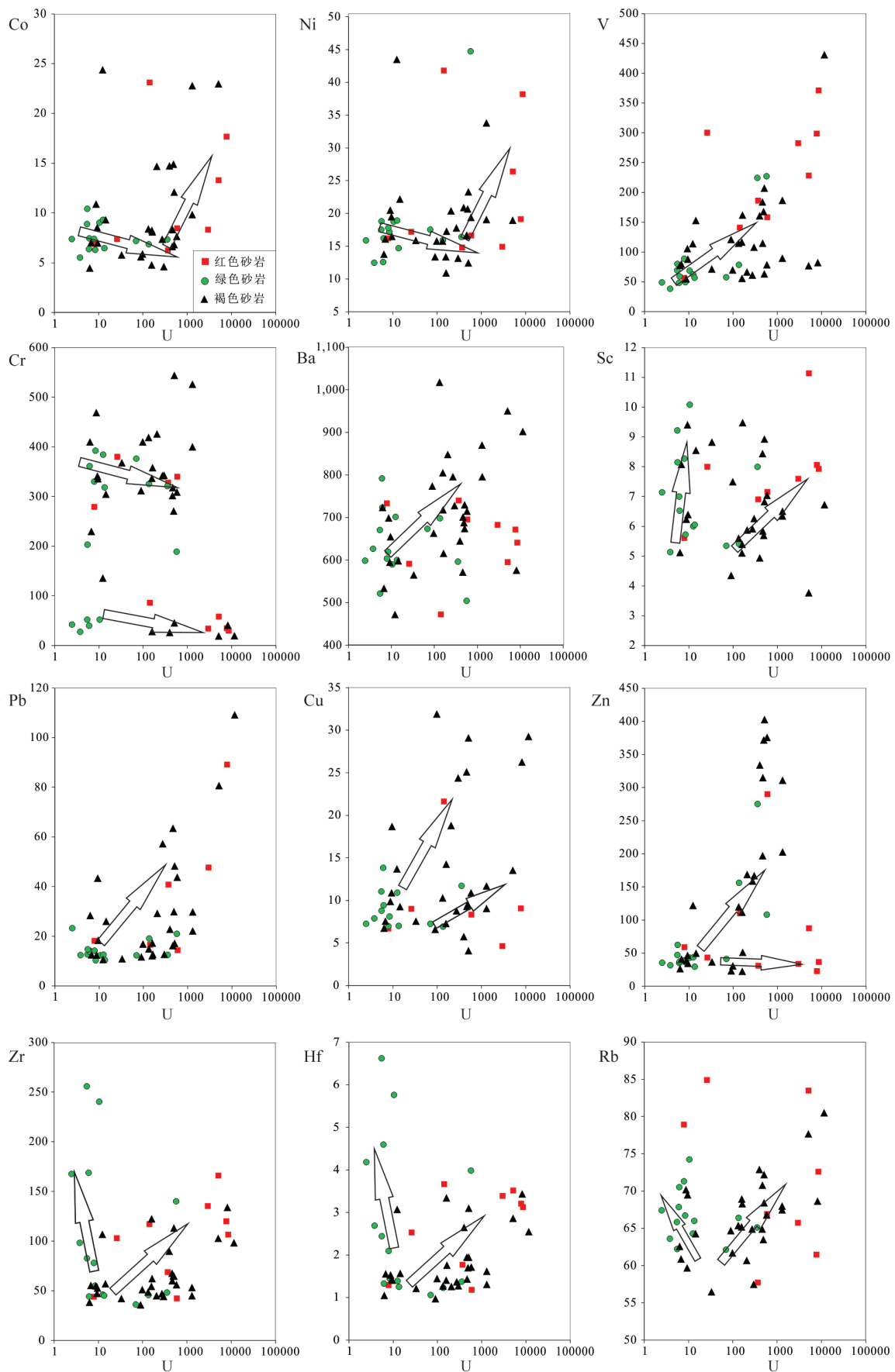


图 11 鄂尔多斯北部不同类型砂岩各元素的关系图

Fig. 11 Relation of elements in different types of sandstones in northern Ordos

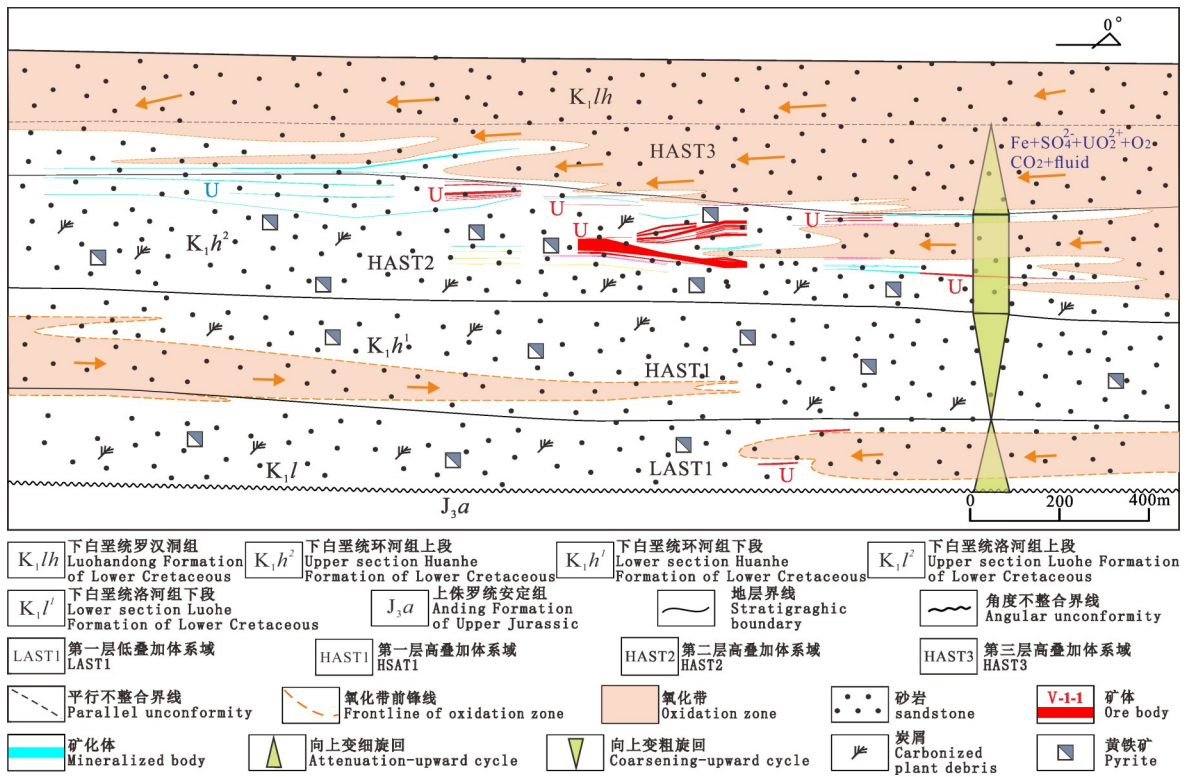


图 12 鄂尔多斯北部下白垩统铀成矿模式示意图

Fig.12 Schematic diagram of Lower Cretaceous uranium metallogenic model in northern Ordos

5 结 论

1) 研究区下白垩统环河组具有有利的地层结构, 铀矿化主要赋存于环河组上段底部的高叠加体系域中, 部分赋存于顶部的高叠加体系域中, 受高叠加体系域辫状河道砂体的控制, 细-粗-细的地层结构(体系域组合)为铀成矿提供基础。

2) 研究区铀矿体主要分布于下白垩统环河组上段氧化-还原过渡带中, 剖面上矿体主要分布于褐色砂岩向绿色砂岩过渡的褐绿色、绿褐色砂岩中, 矿体主要受氧化前锋线的严格控制, 主要富集于靠近氧化前锋线的过渡带砂岩中。

3) 研究区铀成矿作用可以划分为 2 个阶段, 成矿早期主要的矿物组合为赤铁矿、褐铁矿、球状黄铁矿集合体、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、方解石和铀石等, 中晚期发育大量赤铁矿、褐铁矿、胶状黄铁矿、方解石、蒙脱石、绿泥石和铀石等。

4) 铀成矿有关的还原介质主要来源于盆地中有机质的分解, 同时在成矿作用过程中经

历强烈的水-岩作用, 亲石元素、亲硫元素和稀土元素与铀在成矿作用过程中具有共同迁移的特点。

参考文献

- 1 彭云彪, 焦养泉, 剡鹏兵, 等. 鄂尔多斯盆地北部古层间氧化带型砂岩铀矿床[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2023.
PENG Yunbiao, JIAO Yangquan, YAN Pengbing, et al. Paleo-interlayer oxidation zone uranium ore deposit of northern Ordos basin[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2023(in Chinese).
- 2 焦养泉, 吴立群, 彭云彪, 等. 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, 2015, 22(1): 189-205.
JIAO Yangquan, WU Liqun, PENG Yunbiao, et al. Sedimentary-tectonic setting of the deposition-type uranium deposits forming in the Paleo-Asian tectonic domain, North China [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(1): 189-205(in Chinese).
- 3 焦养泉, 吴立群, 荣辉. 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, 2018, 43(2): 459-474.
JIAO Yangquan, WU Liqun, RONG Hui. Model of

- inner and outer reductive media within uranium reservoirs and stone of sandstone-type uranium deposits and its ore-controlling mechanism: Case studies in Daying and Qianjiadian uranium deposits [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2018, 43(2): 459–474 (in Chinese).
- 4 王龙辉, 剡鹏兵, 焦养泉, 等. 鄂尔多斯盆地北部下白垩统铀成矿模式[J]. *地质科技通报*, 2023, 42(3): 222–233.
WANG Longhui, YAN Pengbing, JIAO Yangquan, et al. Uranium metallogenic model of the Lower Cretaceous in the northern Ordos basin [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(3): 222–233 (in Chinese).
- 5 张字龙, 贺锋, 李子颖, 等. 鄂尔多斯盆地西北部特拉敖包矿产地铀矿石物质组成特征[J]. *铀矿地质*, 2024, 40(1): 16–28.
ZHANG Zilong, HE Feng, LI Ziyang, et al. Material composition characteristics of uranium ore from Telaobao mineral occurrence, northwestern Ordos basin [J]. *Uranium Geology*, 2024, 40(1): 16–28 (in Chinese).
- 6 贺锋, 李子颖, 刘鑫扬, 等. 鄂尔多斯盆地西北部特拉敖包矿产地铀成矿机理研究[J]. *铀矿地质*, 2023, 39(6): 859–874.
HE Feng, LI Ziyang, LIU Xinyang, et al. Study on the metallogenic mechanism of Telaobao occurrence in the Lower Cretaceous, northwestern Ordos basin [J]. *Uranium Geology*, 2023, 39(6): 859–874 (in Chinese).
- 7 邱林飞, 李子颖, 张字龙, 等. 鄂尔多斯盆地北部下白垩统赋矿砂岩中有有机质特征及其与铀成矿的关系[J]. *地学前缘*, 2024, 31(4): 281–296.
QIU Linfei, LI Ziyang, ZHANG Zilong, et al. Characteristics of organic matter in Lower Cretaceous ore-bearing sandstones and its relationship with uranium mineralization in the northern Ordos basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(4): 281–296 (in Chinese).
- 8 朱强, 俞初安, 李建国, 等. 鄂尔多斯盆地东北部塔然高勒地区还原介质对砂岩型铀矿的控制[J]. *煤田地质与勘探*, 2018, 46(6): 11–18.
ZHU Qiang, YU Reng'an, LI Jianguo, et al. Control of reducing medium on uranium deposit of sandstone in Tarangaole area, northeastern Ordos basin [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2018, 46(6): 11–18 (in Chinese).
- 9 刘威宏, 刘红旭, 丁波, 等. 鄂尔多斯盆地巴音青格利铀矿床地球化学特征及其对铀成矿的指示意义[J]. *世界核地质科学*, 2023, 40(4): 908–923.
LIU Weihong, LIU Hongxu, DING Bo, et al. Analysis of the geochemical environment and its indicative significance for uranium mineralization in Bayinqingeli uranium deposit, Ordos basin [J]. *World Nuclear Geoscience*, 2023, 40(4): 908–923 (in Chinese).
- 10 杨桐旭, 俞初安, 荣辉, 等. 鄂尔多斯盆地中北部直罗组砂岩地球化学、碎屑锆石 U–Pb 年龄对物源和构造背景的限定[J]. *地球学报*, 2024, 45(6): 941–952.
YANG Tongxu, YU Reng'an, RONG Hui, et al. Geochemistry of sandstones and U–Pb ages of detrital zircons in the Zhiluo formation of the central and northern Ordos basin, China: Constraints on provenance and tectonic setting [J/OL]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2024: 1–12 [2024-01-18]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3474.p.20240117.0906.002> (in Chinese).
- 11 吴金钟, 王运, 剡鹏兵, 等. 鄂尔多斯盆地塔然高勒铀矿床地球化学特征及其指示意义[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 44(1): 18–27.
WU Jinzhong, WANG Yun, YAN Pengbing, et al. Geochemical characteristics of the Tarangaole uranium deposit in the Ordos basin and its indicative significance [J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 2021, 44(1): 18–27 (in Chinese).
- 12 俞初安, 朱强, 文思博, 等. 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*, 2020, 45(3): 829–843.
YU Reng'an, ZHU Qiang, WEN Sibao, et al. Tectonic setting and provenance analysis of Zhiluo Formation sandstone of Tarangaole area in the Ordos basin [J]. *Earth Science*, 2020, 45(3): 829–843 (in Chinese).
- 13 贺锋, 张字龙, 武正乾, 等. 砂岩型铀矿“源—汇”系统[J]. *世界核地质科学*, 2024, 41(3): 419–433.
HE Feng, ZHANG Zilong, WU Zhengqian, et al. Source-to-sink system of sandstone uranium mineralization [J]. *World Nuclear Geoscience*, 2024, 41(3): 419–433 (in Chinese).
- 14 李子颖, 方锡珩, 陈安平, 等. 鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿叠合成矿模式[J]. *铀矿地质*, 2009, 25(2): 65–70.
LI Ziyang, FANG Xiheng, CHEN Anping, et al. Superposition metallogenic model of sandstone-type

- uranium deposit in the northeastern Ordos basin[J]. *Uranium Geology*, 2009, 25 (2): 65-70 (in Chinese).
- 15 刘波,苗爱生,彭云彪,等.兴蒙地区中-新生代盆地铀成矿特征、机理及其动力学背景研究进展[J].*地质学报*, 2020, 94(12):3689-3711.
LIU Bo, MIAO Aisheng, PENG Yunbiao, et al. Research advances in uranium metallogenetic characteristics, mechanism and dynamic background in the Mesozoic-Cenozoic basins of the Xingmeng area, North China[J].*Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(12): 3689-3711(in Chinese).
- 16 XIAO W, WINDLEY B F, HAO J, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt [J]. *Tectonics*, 2003, 22: 1-20.
- 17 何自新.鄂尔多斯盆地演化与油气[M].北京:石油工业出版社,2003:95-105.
HE Zixing. Evolution of Ordos basin and oil and gas [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 95-105.
- 18 赵俊峰.鄂尔多斯盆地直罗-安定期原盆恢复[D].西安:西北大学,2007.
ZHAO Junfeng. Restoration of the primary Ordos basin in Zhiluo-Anding period [D]. Xi'an: Northwest University, 2007(in Chinese).
- 19 魏安军.鄂尔多斯盆地北部油气耗散成岩蚀变-铀富集效应的稳定同位素示踪研究[D].西安:西北大学,2014.
WEI Anjun. Stable isotope tracing study on the effect of dissipative diagenesis alteration on uranium enrichment in the northern Ordos basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2014(in Chinese).
- 20 刘池洋,赵红格,桂小军,等.鄂尔多斯盆地演化-改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J].*地质学报*, 2006, 80(5), 617-638
LIU Chiyang, ZHAO Hongge, GUI Xiaojun, et al. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos basin[J].*Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(5):617-638(in Chinese).
- 21 焦养泉,吴立群,荣辉,等.鄂尔多斯盆地北部下白垩统铀储层沉积学研究[R].武汉:中国地质大学(武汉),2021.
JIAO Y Q, WU L Q, RONG H, et al. Sedimentology of Lower Cretaceous uranium reservoir in northern Ordos basin [R]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2021 (in Chinese).
- 22 全国国土资源标准化技术委员会.硅酸盐岩石化学分析方法 第14部分:氧化亚铁量测定:GB/T 14506.14—2010[S].北京:中国标准出版社, 2010.
National Technical Committee on Land and Resources of Standardization Administration of China. Methods for chemical analysis of silicate rocks—Part 14: Determination of ferrous oxide content[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010 (in Chinese).
- 23 全国国土资源标准化技术委员会.硅酸盐岩石化学分析方法 第28部:16个主次成分量测定:GB/T 14506.28—2010[S].北京:中国标准出版社, 2010.
National Technical Committee on Land and Resources of Standardization Administration of China. Methods for chemical analysis of silicate rocks—Part 28: Determination of 16 major and minor elements content[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010(in Chinese).
- 24 全国国土资源标准化技术委员会.硅酸盐岩石化学分析方法 第30部:44个元素量测定:GB/T 14506.30—2010[S].北京:中国标准出版社, 2010.
National Technical Committee on Land and Resources of Standardization Administration of China. Methods for chemical analysis of silicate rocks—Part 30: Determination of 44 elements content[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010(in Chinese).
- 25 刘持恒,李子颖,贺锋,等.鄂尔多斯盆地西北部下白垩统物源定量分析研究[J].*地质前缘*, 2024, 31(3):80-99. doi:10.13745/j.esf.sf.2023.6.22.
LIU Chiheng, LI Ziyang, HE Feng, et al. Quantitative analysis of provenance in the Lower Cretaceous of the northwestern Ordos basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(3): 80-99. doi: 10.13745/j.esf.sf.2023.6.22(in Chinese).
- 26 刘鑫扬,贺锋,剡鹏兵,等.鄂尔多斯盆地地下白垩统砂岩型铀矿找矿方向[J].*铀矿地质*, 2022, 38(2):168-180.
LIU Xinyang, HE Feng, YAN Pengbing, et al. Prospecting direction of Lower Cretaceous sandstone type uranium deposit in Ordos basin [J]. *Uranium Geology*, 2022, 38(2): 168-180(in Chinese).
- 27 剡鹏兵,王龙辉,李华明,等.鄂尔多斯盆地北部下白垩统砂岩型铀成矿机理与找矿成果[J].*东华*

- 理工大学学报(自然科学版), 2024, 47(5): 409-420.
- YAN Pengbing, WANG Longhui, LI Huaming, et al. Metallogenic mechanism and exploration achievements of sandstone-type uranium in the Lower Cretaceous strata of the northern Ordos basin[J]. Journal of East China University of Technology, 2024, 47(5): 409-420 (in Chinese).
- 28 李华明, 李玲, 彭云彪, 等. 鄂尔多斯盆地北部砂岩铀矿床粘土矿物与氧化带成因关系研究[J]. 地质科学, 2021, 56(1): 303-320.
- LI Huaming, LI Ling, PENG Yunbiao, et al. Study on the relationship between clay minerals and genesis of oxidation zone of sandstone uranium deposits, northern Ordos basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2021, 56(1): 303-320(in Chinese).
- 29 TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust: Its composition and evolution[J]. The Journal of Geology, 1985, 94(4): 57-72.
- 30 谢惠丽, 焦养泉, 刘章月, 等. 鄂尔多斯盆地北部铀矿床铀矿物赋存状态及富集机理[J]. 地球科学, 2020, 45(5): 1531-1543.
- XIE Huili, JIAO Yangquan, LIU Zhangyue, et al. Occurrence and enrichment mechanism of uranium ore minerals from sandstone-type uranium deposit, northern Ordos basin [J]. Earth Science, 2020, 45(5): 1531-1543(in Chinese).
- 31 FRIEDMAN I, O'NEIL J R. Data of Geochemistry: Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest [J]. Chapter KK (Vol. 440). US Government Printing Office, 1977.
- 32 张龙, 刘池洋, 赵中平, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区砂岩型铀矿流体作用与成矿[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 368-381.
- ZHANG Long, LIU Chiyang, ZHAO Zhongping, et al. Fluid evolution and mineralization of Hangjinqi sandstone-type uranium deposit, Ordos basin [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3): 368-381.(in Chinese).
- 33 王得荫, 傅永全. 铀矿物学[M]. 北京: 原子能出版社, 1981.
- WANG Deying, FU Yongquan. Uranium mineralogy [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1981(in Chinese).

The screenshot shows the homepage of the journal 'China Geology' (中国地质). The main navigation bar includes 'Home', 'About This Journal', 'Editorial Board', 'Online Journals', 'Global Mining News', 'Author Center', and 'Journal Subscription'. The 'Global Mining News' section is highlighted and contains a list of recent mining activities:

全球找矿动态	日期
维库尼亚矿田吸引勘探公司关注	(2025-06-09)
智利巴莱里亚诺铜金矿钻探进展	(2025-06-06)
哥伦比亚瓜亚巴莱斯 (Guayabales) 铜银金矿发现钨	(2025-06-05)
格陵兰伊维赫图特 (Ivigut) 稀土矿资源量飙升	(2025-06-04)
美国流纹岩岭 (Rhyolite Ridge) 锂硼矿储量翻倍	(2025-06-03)
墨西哥圣文伦纳 (Santa Elena) 金银矿取得新发现	(2025-05-30)
秘鲁贝伦盖拉 (Berenguela) 多金属矿钻探进展	(2025-05-29)
加拿大波利山 (Mount Polley) 铜金矿钻探取得新成果	(2025-05-28)
阿根廷皮乌肯斯 (Pitiquenes) 铜金矿钻探进展	(2025-05-27)
卢纳瓦西 (Lunahuasi) 深部见厚大斑岩铜金矿体	(2025-05-26)
阿根廷迪亚布利洛斯 (Diablillos) 金银矿见富矿	(2025-05-23)
科特迪瓦费尔凯 (Ferke) 金矿规模进一步扩大	(2025-05-22)
阿塞拜疆盖达贝克金矿达产	(2025-05-21)
安哥拉隆贡若 (Longonjo) 稀土矿主体工程开工	(2025-05-20)
刚果(金)马库库铜矿资源量增长一倍	(2025-05-19)

郝梓国 提供