

doi: 10.12029/gc20220609002

冯晓曦,滕雪明,陈路路,陈印,赵华雷,张天福. 2023. 鄂尔多斯盆地北部纳岭沟铀矿直罗组含铀岩系蚀源区识别[J]. 中国地质, 50(6): 1764–1787.

Feng Xiaoxi, Teng Xueming, Chen Lulu, Chen Yin, Zhao Hualei, Zhang Tianfu. 2023. Identification of provenance on uranium-bearing rocks from the Zhiluo Formation in the Nanlinggou uranium deposit, northern Ordos Basin[J]. *Geology in China*, 50(6): 1764–1787(in Chinese with English abstract).

## 鄂尔多斯盆地北部纳岭沟铀矿直罗组含铀岩系蚀源区识别

冯晓曦<sup>1,2,3</sup>,滕雪明<sup>1,2,3</sup>,陈路路<sup>1,2,3</sup>,陈印<sup>1,2,3</sup>,赵华雷<sup>1,2,3</sup>,张天福<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心,天津300170;2. 华北地质科技创新中心,天津300170;3. 中国地质调查局铀矿地质重点实验室,天津300170)

**提要:**【研究目的】纳岭沟铀矿是鄂尔多斯盆地北部最重要铀矿床之一,识别其含铀岩系物源区对于深化成矿作用和找矿预测具有实际意义。【研究方法】笔者通过岩石学、重矿物学、地球化学和沉积相分析等方法,识别了纳岭沟铀矿床中侏罗统直罗组含铀岩系的蚀源区。【研究结果】含铀岩系岩石类型主要为中粗长石砂岩,碎屑成分有长石、石英、黑云母和花岗岩岩屑、变质岩岩屑等,分选中等至差;碎屑多呈棱角状、次棱角状,少数为次滚圆状,磨圆度差至中等。重矿物分布极不均匀,呈棱角状、次棱角状、次滚圆状,磨圆度差至中等;ZTR(锆石+电气石+金红石)指数2%~10%。电气石、尖晶石、锐钛矿、角闪石、碳硅石等呈簇状分布;碎屑锆石延长系数主要为1~2.2,其次2.2~3.2。稀土元素球粒陨石配分曲线形态相似, $\Sigma\text{REE}$ 值 $104.75\times 10^{-6}$ ~ $283.86\times 10^{-6}$ ,LREE/HREE值0.13~0.47,La/Yb值9.60~32.66,元素含量变化幅度大。纳岭沟地区含铀岩系砾质、砂质辫状河沉积相由矿区北东方向至南西方向延展,与高厚度砂体、高含砂率砂体分布规律一致。【结论】纳岭沟铀矿直罗组含铀岩系蚀源区为矿区北东缘的晋蒙交界地带的前中侏罗世隆起区的太古代片麻岩、古元古代孔兹岩、二长花岗岩和古生代岩浆岩、沉积岩和中生代沉积岩、火山岩。

**关键词:**纳岭沟铀矿;含铀岩层;蚀源区;近源沉积;矿产勘查工程;鄂尔多斯盆地

**创新点:**鄂尔多斯盆地纳岭沟铀矿区中侏罗统直罗组含铀岩系的蚀源区为晋蒙交界处的变质岩、岩浆岩和火山岩。

中图分类号:P619.14 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2023)06-1764-24

### Identification of provenance on uranium-bearing rocks from the Zhiluo Formation in the Nanlinggou uranium deposit, northern Ordos Basin

FENG Xiaoxi<sup>1,2,3</sup>, TENG Xueming<sup>1,2,3</sup>, CHEN Lulu<sup>1,2,3</sup>, CHEN Yin<sup>1,2,3</sup>,  
ZHAO Hualei<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Tianfu<sup>1,2,3</sup>

(1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 2. North China Center of Geoscience Innovation, Tianjin 300170, China; 3. Key Laboratory of Uranium Geology, China Geological Survey, Tianjin 300170, China)

收稿日期:2022-06-09;改回日期:2022-08-07

基金项目:国家自然科学基金重点项目(92162212)资助。

作者简介:冯晓曦,男,1972年生,博士,正高级工程师,主要从事铀等战略性矿产调查和科学研究;E-mail: tjfengxiaoxi@163.com。

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

**[Objective]** The Nalinggou uranium deposit is one of the most important uranium deposits in northern Ordos Basin. Identification on the provenance of uranium bearing rocks is of practical significance for deepening mineralization and prospecting prediction. **[Methods]** By means of petrology, heavy mineralogy, geochemistry and sedimentary facies analysis, the authors have identified the provenance of the uranium bearing rocks from the Middle Jurassic Zhiluo Formation in the Nalinggou uranium deposit. **[Results]** The uranium-bearing rocks are dominantly composed of medium coarse arkose. The clastic components are feldspar, quartz, biotite, debris of granite and metamorphic rock, etc., with medium to poor sorting. The clasts are mostly angular and sub-angular, and a few are sub-rounded, with poor to medium roundness. The distribution of heavy minerals is extremely uneven, in angular, sub angular and sub rounded shapes, with poor to medium roundness. The ZTR (zircon+tourmaline+rutile) index varies of 2%–10%. The tourmaline, spinel, anatase, amphibole and carborosilica are distributed in clusters. The extension coefficient of detrital zircon is mainly in the range of 1–2.2, followed by the range of 2.2–3.2. The rocks exhibit similar chondrite-normalized patterns with great elemental variations among different samples. The  $\Sigma\text{REE}$ , LREE/HREE, and La/Yb values are in the range of  $104.75 \times 10^{-6}$ – $283.86 \times 10^{-6}$ , 0.13–0.47, and 9.60–32.66 respectively. The uranium bearing strata exhibit highly thick sand bodies. In the mining area, the sedimentary facies extend synchronously from the northeast to the southwest. **[Conclusions]** In conclusion, it is generally considered that the uranium bearing rocks of the Zhiluo Formation in the Nalinggou uranium deposit is mainly proximal provenance, with a small amount of distal provenance. The sourced rocks are the pre-Jurassic bedrock area exposed at the boundary between Shaanxi and Inner Mongolia on the northeast edge of the mining area. The rock types include Archean gneiss, Paleoproterozoic Khondalite, magmatic rocks, Paleozoic magmatic rocks, sedimentary rocks and Mesozoic volcanic rocks, of which the khondalite belt provides the most important materials.

**Key words:** Nalinggou uranium deposit; uranium-bearing strata; erosion source; near-source deposition; mineral exploration engineering; Ordos basin.

**Highlights:** The erosion source of uranium-bearing strata in the middle Jurassic Zhiluo Formation of the Nalinggou uranium deposit, Ordos Basin, is metamorphic, magmatic and volcanic rocks at the junction of Shanxi-Inner Mongolia.

**About the first author:** FENG Xiaoxi, male, born in 1972, doctor, professor level senior engineer, mainly engaged in uranium and other strategic minerals geological survey and research; E-mail: tjfengxiaoxi@163.com.

**Fund support:** Supported by key project of State Natural Science Foundation Program (No. 92162212).

## 1 引言

砂岩型铀矿以资源储量规模大、可地浸、开采成本低等特点已经成为当今世界上经济价值最大的铀矿类型,它也被列入了保障我国铀资源储量持续增长的主要类型。由于成功实现可地浸采铀实验,纳岭沟铀矿成为鄂尔多斯盆地北部最具经济价值的铀矿床(图1),为研究砂岩型铀提供了理想对象和目标。作为砂岩型铀矿重要的成矿要素,蚀源区直接关联铀源的规模大小、含铀流体迁移、铀富集方式和铀成矿机制等,对于成矿作用研究和找矿预测工作至关重要。无论中亚的楚·萨雷苏和锡尔河铀矿田(Jaireth et al., 2008)和中央克兹尔库姆铀矿田(陈祖伊等, 2010),还是我国伊犁盆地南缘铀矿田(侯明才等, 2016),均将蚀源区作为一个重要的科学问题。

对于纳岭沟地区直罗组含铀岩系的蚀源区示踪,前人从岩石学、地球化学、碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年等方面开展了大量研究工作,根据直罗组碎屑锆石测年结果将阴山、乌拉山、大青山、狼山、集宁地区太古宙、元古宙变质岩和不同时代岩浆岩认定为蚀源区(李子颖等, 2009; 张龙等, 2016; 刘晓雪等, 2016; 陈印等, 2017; 雷开宇等, 2017; 刘璐等, 2018; 王思力等, 2018; Jin et al., 2020; 司庆红等, 2021; 张媛媛等, 2021)。赵俊峰等(2008)依据鄂尔多斯盆地东部直罗组露头 and 盆地内 146 个钻孔建立了全盆地沉积相展布图,认为纳岭沟地区直罗组上、下段辫状河相沉积体系的古流向为北西向。焦养泉等(2015)则基于纳岭沟地区部分钻孔资料和神山沟地区自然露头剖面建立了东胜地区大型直罗组沉积体,也将蚀源区也指向阴山地区。而冯晓曦等(2019)认为盆地北部出露的含新元古代

美岱召群的孔兹岩带可能为直罗组的主要蚀源区。

针对纳岭沟地区直罗组含铀岩系的蚀源区的分歧,笔者认为主要有三个原因:(1)鄂尔多斯盆地北部中侏罗世古地貌格局对直罗组含铀岩系物源区制约的研究不充分。早中侏罗世,阴山地区的沉积物最大可能汇聚于河套盆地、包头地区石拐盆地河湖相沉积环境。同时,中侏罗世,鄂尔多斯盆地北部中元古代大规模孔兹岩带最大程度屏蔽了阴山地区剥蚀物到达纳岭沟地区。(2)鄂尔多斯盆地中生代旋转和古地磁研究成果对直罗组物源的影响重视不足。(3)不少学者放大了碎屑锆石定年在蚀源区识别中的权重。虽然碎屑锆石定年结果是一种重要的示踪蚀源区方法,但蚀源区与碎屑锆石定年结果属于充分非必要关系。纳岭沟地区直罗组碎屑锆石的中生代锆石(157 Ma、165 Ma)(陈印等,2017;俞初安等,2020)难以在阴山地区找到理想物源区。

河套地区中生代古地理研究表明,内蒙古狼山地区的炭窑口—东升庙北东向早中侏罗世凹陷(付星辉等,2016),包头地区的早中侏罗世河湖相石拐盆地(葛玉辉等,2010)最可能容纳了阴山地区的陆源碎屑物,可能进一步汇入鄂尔多斯盆地西缘的吉兰泰凹陷。1:25万乌拉特前旗幅(K49C004001)的钻孔揭露,纳岭沟铀矿区北部直罗组( $J_2z$ )直接覆盖于三叠系、二叠系等前中生代地层之上,表明中侏罗世,矿区北侧近缘的前直罗组则可直接提供物源。笔者在2015—2019年野外地质调查中,发现纳岭沟铀矿区北侧达拉旗高头窑至响沙湾一带出露小面积的古元古代美岱召岩群( $Pt_2m$ )变质岩,具有近缘直接供给直罗组物源的能力。张云等(2022)建立的东胜地区直罗期古地貌三维模型、大营—纳岭沟一带直罗组下段砂体等厚图指示沉积体系北东向展布,也指示纳岭沟地区直罗组物源来自于矿区北侧的近缘前侏罗纪隆起区。

古地磁结果表明鄂尔多斯盆地中生代发生了逆时针旋转(马醒华等,1993),据此推断中侏罗世,纳岭沟铀矿区可能正对内蒙古与山西交界一带。内蒙古南部和山西北部地区太古代、元古代、古生代变质岩、岩浆岩和山西宁武—静乐盆地中下侏罗统火山碎屑岩,具有提供纳岭沟铀矿区直罗组各时代碎屑锆石能力。

因此,笔者以纳岭沟铀矿区直罗组含铀岩系碎屑矿物学、重矿物特征、岩石化学、沉积相等为基础,结合前人碎屑锆石定年、1:25区调、古地磁和河套地区古地理研究进展,多角度论证纳岭沟铀矿区直罗组物源主要来源于,包括矿区东北缘前侏罗纪隆起区在内的内蒙古与山西交界地区太古代、元古代、古生代、中生代变质岩、岩浆岩和火山岩,有别于一些学者认为的阴山隆起区。

将晋蒙交界地带厘定为纳岭沟铀矿区直罗组含铀岩系的蚀源区,可为鄂尔多斯盆地北部中侏罗世地质构造演化研究提供借鉴,可能对深化纳岭沟铀矿成矿作用研究产生影响,也可为鄂尔多斯等北方其他盆地砂岩铀成矿作用研究提供参考,以及为“十四五”新一轮地质找矿工作部署提供理论支持。

## 2 地质背景

鄂尔多斯盆地是晚三叠世华北克拉通西部前陆盆地演化而成的侏罗纪大型拗陷盆地,南北缘分别受秦岭造山带、阴山隆起带控制,东西囿于吕梁及贺兰山,盆山耦合作用强烈。早—中侏罗世,鄂尔多斯盆地处于弱伸张环境下和构造稳定演化阶段,印支期碰撞挤压造成的高低不平古地貌被河湖相、沼泽相填平。中—晚侏罗世受到多向挤压作用,形成了伊盟隆起、伊陕斜坡、天环拗陷等大地构造单元。盆地不同地区隆升、剥蚀程度差异较大,盆地呈不均衡演化,形成北高西低,西高东低的地貌形态。纳岭沟铀矿床大地构造位置处于鄂尔多斯北部东西向展布的伊盟隆起带中部。伊盟隆起带基底为新太古代中高级变质岩(包洪平等,2019),上覆下二叠统太原组海陆交互相含煤岩层、下三叠统刘家沟组和和尚沟组、中三叠统二马营组、上三叠统延长组、中侏罗统延安组河流相含煤碎屑岩、直罗组和安定组河湖相砂岩和泥岩建造,下白垩统东胜组红色河流相碎屑岩。其中,直罗组角度不整合覆盖基底变质岩、古生界、三叠系和延安组之上(图1)。

纳岭沟铀矿床主要含铀地层为中侏罗统直罗组潮湿—干旱、半干旱河流相碎屑岩建造(程先钰等,2021),厚度一般在100~200 m。铀矿体赋存于直罗组下段( $J_2z'$ )辫状河沉积体系中。根据直罗组沉积时期古气候的变化、岩性发育特点和物性参数



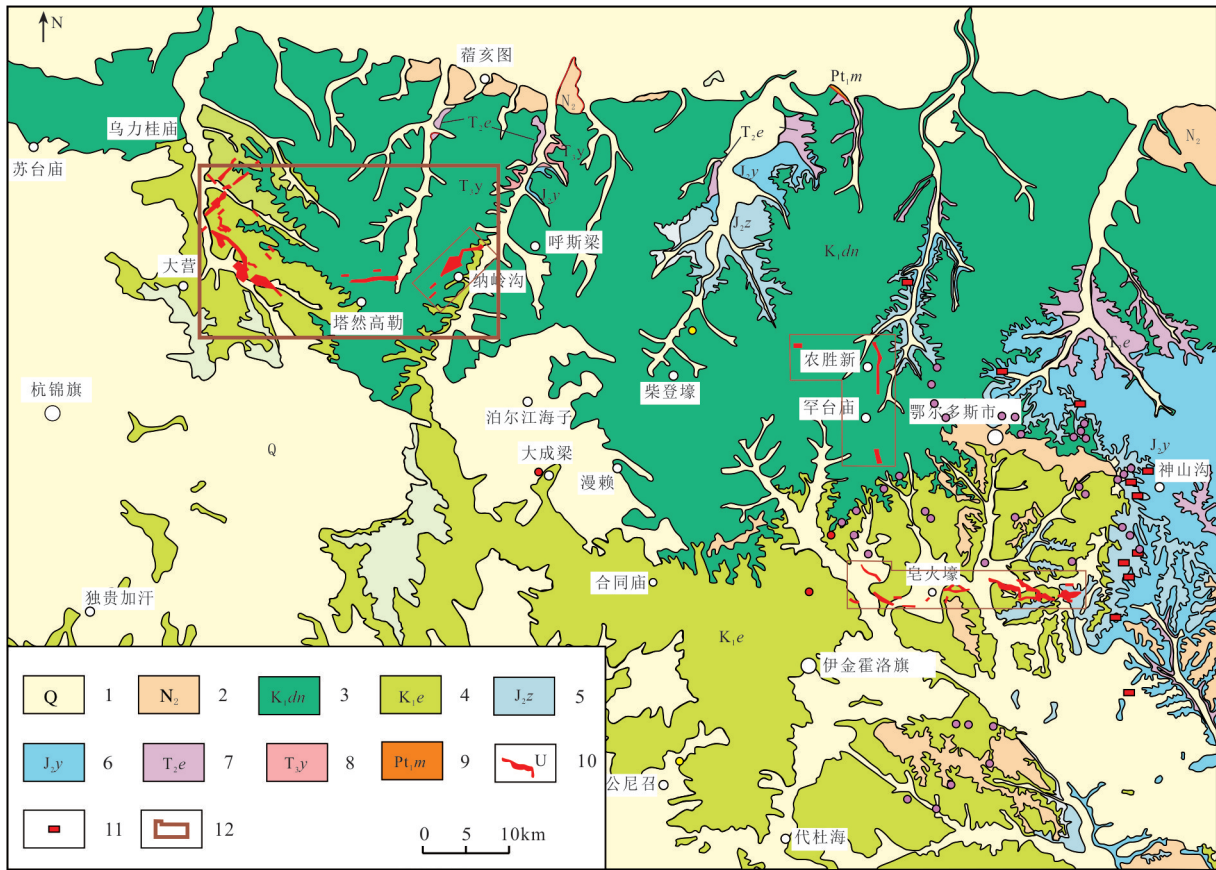


图1 鄂尔多斯盆地东胜铀矿区域地质简图

1—第四系;2—新近系;3—下白垩统东胜组;4—下白垩统伊金霍洛组;5—中侏罗统直罗组;6—中侏罗统延安组;7—中三叠统二马营组;8—中三叠统二马营组;9—古元古代代美岱召岩群;10—铀矿体地表投影范围;11—地表放射性异常点;12—研究区范围

Fig.1 Simplified geological map of the Dongsheng uranium orefield

1—Quaternary; 2—Neogene; 3—Lower Cretaceous Dongsheng Formation; 4—Lower Cretaceous Yijinhuoluo Formation; 5—Middle Jurassic Zhiluo Formation; 6—Middle Jurassic Yan'an Formation; 7—Middle Triassic Ermaying Formation; 8—Upper Triassic Yanchang Formation; 9—Paleoproterozoic Meidaizhao Group; 10—Uranium ore bodies; 11—Surface radioactive anomaly; 12—Study area

特征,将直罗组划分为下段( $J_{2z}^1$ )和上段( $J_{2z}^2$ ) (焦养泉等,2005)。下段( $J_{2z}^1$ )为低位域(LST)沉积。低位域(LST)划分为上亚段、下亚段。下亚段( $J_{2z}^1$ )为潮湿气候环境下沉积的以砂岩为主的粗碎屑岩建造。上亚段以灰绿色中粒和中细粒砂岩为主,下亚段为灰色、灰白色中细粒—中粗粒砂岩与灰色、灰绿色粉砂质泥岩。上段( $J_{2z}^2$ )为湖扩体系域(EST)和高位域(HST)沉积,主要为紫红色、褐红色泥岩、粉砂岩及砂岩,夹灰绿色泥岩。铀矿体主要赋存于下段下亚段分布稳定、固结程度低的砂体中,与大营铀矿的矿体一并沿乌力桂庙—大营—塔然高勒—纳岭沟一线呈“半弧”状展布(图2),圆心指向三叠纪地层出露的宿亥图一带,暗示成矿流体或赋矿层物源来源于宿亥图方向。

### 3 样品采集与测试

#### 3.1 样品采集

岩石化学样品采集对象为纳岭沟铀矿钻孔 ZK23-16 样品(图3)。岩矿鉴定、粒度分析、常量元素、微量和稀土元素样品采集于钻孔 ZK23-16、UZK11。重矿物样品采集于 ZKN16-72 等 10 个钻孔(图3)。

#### 3.2 样品测试

样品前处理、重矿物鉴定、岩矿鉴定由河北廊坊宇能地质勘查技术服务有限公司完成。岩石主量、微量、稀土元素分析测试单位为核工业北京地质研究院。粒度分析、碎屑成分鉴定由河南省岩石矿物实验测试中心承担。

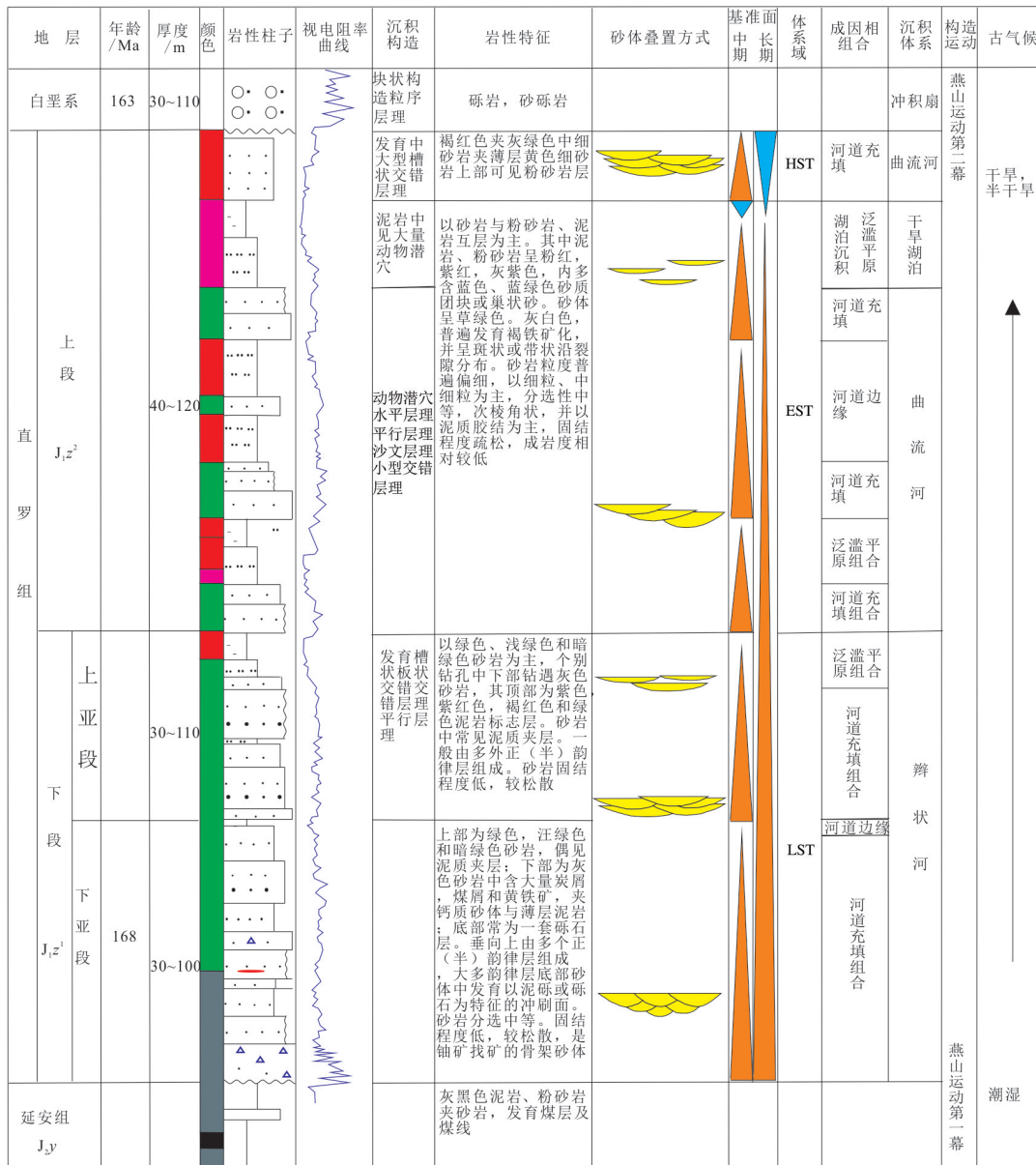


图2 纳岭沟铀矿中侏罗统直罗组地层结构图(据核工业208大队<sup>①</sup>,略改)

Fig.2 The comprehensive columnar diagram of Middle Jurassic strata in the Nalinggou uranium deposit (modified from CNNC No.208 Geological Party<sup>①</sup>)

常量元素测试仪器为PW4400/40 X射线荧光光谱仪,FeO由氢氟酸、硫酸溶样,采用重铬酸钾滴定容量法进行测试,分析精度优于2%,微量和稀土元素测试设备为X SeriesII等离子体质谱仪,检测依据为《硅酸盐岩石化学分析方法》(GB/T14506-2010),检测环境温度24℃,湿度28%,分析精度优于5%。

### 3.3 沉积相图编制

纳岭沟地区中侏罗统直罗组下段下亚段沉积相图数据来源于中国地质调查局天津地质调查中

心建立的鄂尔多斯盆地北部钻孔数据库,利用石文软件编制而成。

## 4 测试分析结果

### 4.1 岩石学特征

几乎所有学者均认为纳岭沟地区直罗组岩石类型相对简单(易超等,2014;王思力等,2018),铀矿层主要有灰绿色、灰白色中粒、中粗粒长石砂岩,夹少量泥岩和含砾砂岩。弱成岩作用致岩石胶结



图3 纳岭沟铀矿地质简图

1—上三叠统延长组;2—中侏罗统延安组;3—下白垩统伊金霍洛组;4—下白垩统东胜组一段;5—下白垩统东胜组二段;6—第四系;7—钻孔;  
8—水流方向;9—矿区范围

Fig.3 Simplified geological map of the Nalinggou uranium deposit

1—Upper Triassic Yanchang Formation; 2—Middle Jurassic Yanan Formation; 3—Lower Cretaceous Yijinhuoluo Formation; 4—The first member of Dongsheng Formation of Lower Cretaceous; 5—The second member of Dongsheng Formation of Lower Cretaceous; 6—Quaternary system; 7—Drill;  
8—Current Direction; 9—Mining area

程度低,呈疏松、较疏松状,细粒、中粒、粗粒砂状结构,分选性中等至差,磨圆度差,多为棱角状、次棱角状、次滚圆状,总体呈现较低的结构成熟度,具有以近源为主,伴有远源沉积的特点。胶结方式主要为孔隙式胶结,其次是基底式胶结。多泥颗粒支撑。碎屑粒径0.06~2.8 mm,其中,以钻孔ZK23-16为例(表1),铀矿层顶板粗粒占比13%,中粒占比39%,细粒占比42%,铀矿层粗粒占比18%,中粒占比45%,细粒占比31%,底板粗粒占比10%,中粒占比43%,细粒占比33%,高占比的粗粒碎屑物具近源沉积特点。碎屑含量85%~90%,其中长石35%~55%,石英20%~35%,云母2%~9%。其中,单晶石英含量39.95%~61.02%,多晶石英0.94%~8.82%,斜长石6.33%~21.13%,钾长石12.68%~28.47%,云母1.41%~15.53%,沉积岩/变质岩值0.45~9.84。岩屑

4%~12%,成分有火成岩岩屑(花岗岩岩屑、流纹岩岩屑)、沉积岩岩屑(泥岩岩屑、燧石、细粒砂岩岩屑)、变质岩岩屑(石英岩岩屑、绢云千枚岩岩屑、云母石英片岩岩屑),表明物源区岩石类型复杂,且具近源沉积特点(彭胜龙等,2023)。

佩蒂庄的成分成熟度指数 $Q/(F+R)$ (Q为石英、F为长石、R为岩屑),长石/岩屑比值可以反映物源区的不同。以钻孔ZK23-16为例(表2),石英(Q)含量25%~35%,长石(F)含量40%~55%,岩屑(R)含量6%~12.5%,成分成熟度指数 $Q/(F+R)=0.41\sim0.71$ ,平均值0.60,长石(F)/岩屑(R)比值3.20~9.17,平均值5.51,表明含铀岩系砂岩成熟度低,具近源沉积特点。

#### 4.2 重矿物特征

选取矿区西部11个钻孔的铀矿层、顶板、底板绿色、灰色砂岩分析重矿物(表3)。极稳定重矿物



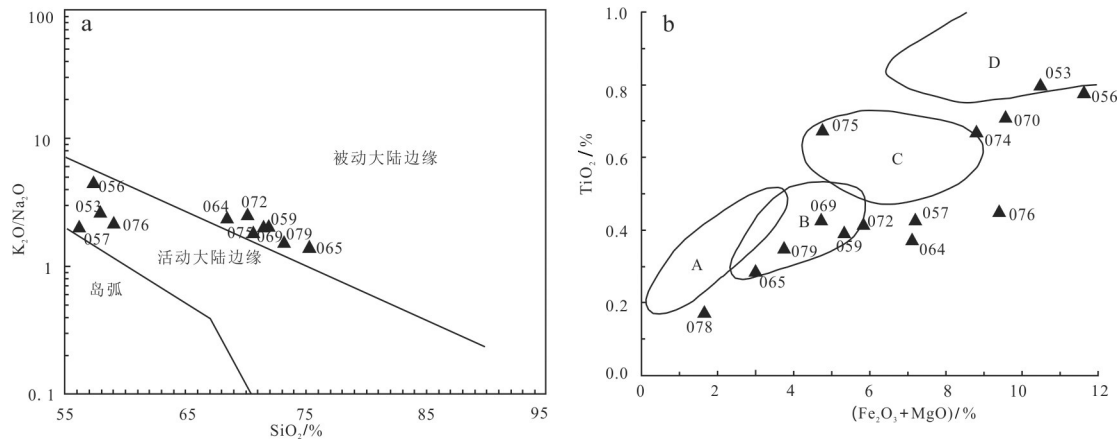


图4 直罗组下亚段含铀岩系(钻孔ZK23-16)SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O(a)、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+MgO-TiO<sub>2</sub>(b)构造环境判别图

A—克拉通盆地;B—大陆壳内裂谷或弧后盆地;C—大陆边缘弧;D—大洋弧

Fig.4 Discriminant diagrams of tectonic environment on SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O(a)、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+MgO-TiO<sub>2</sub>(b)for uraniumiferous rocks in the lower member of the Zhiluo Formation from drill ZK23-16

A-Craton basin; B-Intracontinental rift or back-arc basin; C-Continental margin arc; D-Oceanic arc

有锆石、电气石、石榴子石、金红石、白钛石、赤褐铁矿,稳定重矿物有榍石、钛铁矿、锐钛矿,不稳定重矿物绿帘石、磷灰石、黄铁矿、辉石等,与鄂尔多斯盆地山西组、下石盒子组锆石、电气石、金红石、磁铁矿、锐钛矿等重矿物特征相似(汪正江等,2001;张道锋等,2009)。

#### 4.2.1 重矿物组合特征

重矿物组合有锆石、石榴子石组合和榍石、钛铁矿组合。重矿物含量与物源区存在必然联系(David et al., 2020; Wang et al., 2022)。前者含量12%~49%,后者含量2%~23%,变化幅度大,分选差,符合近源沉积特征。

ZTR(锆石%+电气石%+金红石%)指数=4~13。UM/SM(不稳定矿物/(稳定矿物+极稳定矿物))值=0.37~3.20,GZi(100×石榴子石%)/(石榴子石%+锆石%)指数=16.67~91.67,三项指数变化幅度大,ZTR指数较低,电气石含量较低,0~2%,说明蚀源区发育变质岩、岩浆岩,且剥蚀、较短距离迁移沉积于直罗组地层中。

#### 4.2.2 单矿物特征

重矿物成分复杂,含量变化大。锆石含量4%~12%,石榴子石含量2%~41%,钛铁矿含量2%~30%,电气石、金红石、白钛石、赤褐铁矿、锐钛矿分布极不均匀,多见集合体状,含量小于2%。锆石呈次滚圆状,次棱角状,其中磨圆度相对高的次滚圆状锆石表明碎屑物经历了再循环(Pawan et al.,

2022)。重矿物绿帘石含量1%~57%,磷灰石含量1%~9%,黄铁矿含量1%~44%,其他黄铜矿、辉石、方铅矿、碳硅石等均呈集合体状产出,表明蚀源区发育变质岩、岩浆岩、火山岩(David et al., 2020),且碎屑沉积物成分变化大,沉积环境多变,具近源沉积特点。

重矿物磨圆度低,电气石呈茶褐色,粒状,短柱状;石榴子石呈不规则粒状,块状,粒状,个别圆形五角十二面体(表4)。以样号17nzk026为例,锆石呈深、浅玫瑰色,锆石均呈次棱角状,次浑圆粒状,透明,粒径主要0.05~0.15 mm,0.16~0.25 mm次之;个别0.26~0.30 mm;延长系数主要1.5~2.5,次要2.6~3.5,个别4~6,系较短距离搬运的结果(Zeh and Czbral et al., 2021)。

#### 4.3 岩石化学特征

陆源碎屑岩地球化学特征是对蚀源区岩石类型、古地理、古气候、物理化学风化、水动力条件等因素的地球化学综合响应,对有效示踪蚀源区具有重要参考意义(周科,2014)。以钻孔ZKN23-16为例(表5),含铀岩系(354~504.4 m)中粗粒砂岩SiO<sub>2</sub>含量48.79%~75.14%,平均63.27%。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量9.24%~19.04%,平均13.89%。SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>值3.05~6.01。相较砂岩,泥岩中Si含量偏低,而泥岩中Al含量高于砂岩,明显负相关,应与长石碎屑有关,并非后生流体的改造(王金平等,2005;易超等,2015)。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量介于1.12%~9.10%,平均4.50%,

表1 钻孔ZK23-16直罗组下亚段含铀岩系粒度分析

Table 1 Grain size analysis of uraniumiferous rocks in lower member of the Zhiluo Formation from drill ZK23-16

| 序号 | 样品号      | 深度/m | 总粒数  | ≥2   | 1.0~2.0 | 0.5~1.0 | 0.25~0.5 | 0.1~0.25 | 0.05~0.1 | ≤0.05 | 备注 |
|----|----------|------|------|------|---------|---------|----------|----------|----------|-------|----|
|    |          |      |      | 粗砾   | 砾       | 粗       | 中        | 细        | 较细       | 极细    |    |
| 1  | 15nZK055 | 372  | 521  |      |         | 3       | 126      | 344      | 46       | 2     |    |
| 2  | 15nZK057 | 399  | 528  |      |         | 14      | 264      | 236      | 14       |       |    |
| 3  | 15nZK069 | 383  | 512  |      | 3       | 76      | 316      | 117      |          |       |    |
| 4  | 15nZK058 | 404  | 520  |      |         | 3       | 93       | 373      | 51       |       | 围  |
| 5  | 15nZK070 | 407  | 107  | 3    | 18      | 23      | 37       | 26       |          |       | 岩  |
| 6  | 15nZK072 | 429  | 539  |      | 31      | 243     | 225      | 40       |          |       |    |
|    | 合计       |      | 2727 | 3    | 52      | 362     | 1061     | 1136     | 111      | 2     |    |
|    | 比例/%     |      |      | 0.11 | 1.907   | 13.275  | 38.907   | 41.657   | 4.07     | 0.01  |    |
| 7  | 15nZK040 | 418  | 527  |      |         | 17      | 173      | 261      | 72       | 4     |    |
| 8  | 15nZK041 | 419  | 534  |      | 3       | 17      | 163      | 262      | 82       | 7     |    |
| 9  | 15nZK043 | 421  | 539  |      | 4       | 72      | 272      | 168      | 23       |       |    |
| 10 | 15nZK044 | 443  | 524  |      | 8       | 96      | 259      | 150      | 11       |       |    |
| 11 | 15nZK045 | 444  | 528  |      |         | 23      | 239      | 243      | 21       | 2     |    |
| 12 | 15nZK047 | 446  | 539  |      | 14      | 237     | 231      | 56       | 1        |       | 矿  |
| 13 | 15nZK049 | 447  | 533  |      | 5       | 173     | 286      | 66       | 3        |       | 层  |
| 14 | 15nZK051 | 449  | 523  |      | 2       | 134     | 263      | 103      | 18       | 3     |    |
| 15 | 15nZK052 | 450  | 510  |      |         | 84      | 260      | 149      | 15       | 2     |    |
|    | 合计       |      | 4757 | 0    | 36      | 853     | 2146     | 1458     | 246      | 18    |    |
|    | 比例/%     |      |      | 0    | 0.757   | 17.931  | 45.112   | 30.65    | 5.171    | 0.4   |    |
| 16 | 15nZK073 | 454  | 519  |      | 8       | 102     | 233      | 146      | 24       | 6     |    |
| 17 | 15nZK064 | 472  | 518  |      |         | 22      | 218      | 182      | 64       | 32    |    |
| 18 | 15nZK065 | 475  | 540  |      | 3       | 54      | 202      | 180      | 80       | 21    | 围  |
| 19 | 15nZK068 | 500  | 514  |      | 2       | 35      | 240      | 177      | 43       | 17    | 岩  |
|    | 合计       |      | 2091 | 0    | 13      | 213     | 893      | 685      | 211      | 76    |    |
|    | 比例/%     |      |      | 0    | 0.622   | 10.187  | 42.707   | 32.759   | 10.091   | 3.6   |    |

FeO 含量 0.11%~4.95%，平均 2.52%，MgO 含量 0.58%~4.26%，平均 2.18%，TiO<sub>2</sub> 含量 0.18%~0.80%，平均 0.50%，具有低铁、镁、钛特征，说明蚀源区出露基性、超基性岩浆岩。CaO 含量 0.62%~18.50%，平均 2.70%，说明沉积环境属干旱一半干旱古气候。K<sub>2</sub>O 含量 2.21%~3.65%，平均 3.07%。Na<sub>2</sub>O 含量 0.71%~2.34%，平均 1.51%。K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 值 1.41~4.41，大于 1，碎屑物具有来自被动陆缘的特点。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 值 19.25~44.68，多介于 19~28，表明蚀源区岩石主要为长英质岩石。

利用 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 构造环境判别图 (Roser and Korsch, 1986)，除绿色泥砾 (15nzk070、15nzk074)、钙质粗砂岩 (15nzk078) 外，部分样品 (15nzk053、15nzk056、15nzk057、15nzk078) 落入活动大陆边缘，其他落入被动大陆边缘。在 Bhatia

(1985) TiO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+MgO 中有 4 个样品 (15nzk059、15nzk065、15nzk069、15nzk079) 落入大陆壳内裂谷或弧后盆地，1 个样品 (15nzk075) 落入大陆边缘弧，1 个样品 (15nzk053) 落入大洋弧。判别图反映蚀源区剥蚀物原岩大地构造环境相对复杂，兼具岛弧特点的活动大陆边缘和被动大陆边缘环境 (图 4)。

REE 具有在成岩过程中受改造程度很小的稳定地球化学性质，可用来指示原始母岩性质及特点。以钻孔 ZK23-16 (418~450 m) 为例 (表 6)，岩石 REE 配分曲线总体右倾，总体趋势相似，部分重稀土曲线扬起 (图 5)，或与富 HREE 重矿物非均匀分布有关，或受盆地深部热流体影响。样品 15nzk47、15nzk48 曲线具有大陆岛弧球粒陨石标准化曲线，15nzk40、15nzk41、15nzk42 属安第斯型曲线，其余属被动边缘曲线特征，表明蚀源区母岩构造环境具



表2 钻孔ZK23-16直罗组下亚段含铀岩系成分成熟度指数

Table 2 Compositional maturity index of uraniumiferous rocks in the lower member of the Zhiluo Formation from drill ZK23-16

| 样号       | 岩性              | 深度/m        | F  | Q  | R    | Q/(F+R) | F/R  |
|----------|-----------------|-------------|----|----|------|---------|------|
|          |                 |             | 长石 | 石英 | 岩屑   |         |      |
| 15nZK040 | 灰白色中粒长石砂岩       | 418.5~419.5 | 55 | 25 | 6.0  | 0.41    | 9.17 |
| 15nZK042 | 灰白色中粒长石砂岩       | 419.5~420   | 55 | 25 | 6.5  | 0.41    | 8.46 |
| 15nZK043 | 灰白色方解石胶结粗粒长石砂岩  | 420~421     | 40 | 30 | 12.0 | 0.58    | 3.33 |
| 15nZK044 | 中粗粒长石砂岩         | 443~443.5   | 45 | 35 | 11.0 | 0.63    | 4.09 |
| 15nZK045 | 灰绿色粗中粒长石砂岩      | 443.5~444.5 | 45 | 35 | 6.5  | 0.68    | 6.92 |
| 15nZK046 | 灰绿色中粗粒长石砂岩      | 444.5~445   | 45 | 35 | 8.5  | 0.65    | 5.29 |
| 15nZK047 | 灰绿色方解石胶结中粗粒长石砂岩 | 445~446     | 45 | 30 | 6.5  | 0.58    | 6.92 |
| 15nZK048 | 灰绿色方解石胶结中粗粒长石砂岩 | 446~446.5   | 40 | 35 | 9.0  | 0.71    | 4.44 |
| 15nZK049 | 灰绿色方解石胶结中粗粒长石砂岩 | 446.5~447   | 45 | 30 | 8.5  | 0.56    | 5.29 |
| 15nZK050 | 灰绿色方解石胶结中粗粒长石砂岩 | 447~448     | 40 | 35 | 12.5 | 0.67    | 3.20 |

有被动边缘、大陆岛弧和安第斯型俯冲带特征。

$\Sigma$ REE 含量  $104.75 \times 10^{-6} \sim 283.86 \times 10^{-6}$ , La 含量  $24.3 \times 10^{-6} \sim 55.5 \times 10^{-6}$ , La/Yb 值 11.11~32.66, 表明蚀源区具有大陆岛弧、活动边缘、被动边缘特点, 岩石类型复杂, 与前人结果一致(张宾等, 2020b)。

#### 4.4 砂体分布特征

##### 4.4.1 砂体厚度及含砂率特征

直罗组下段砂体总体呈北东-南西向展布, 砂体厚度变化较小, 多在 120~140 m。其中直罗组下段下亚段砂体厚度一般为 60~100 m(图6)。其中, 厚度  $\geq 60$  m 的砂体在纳岭沟铀矿区分布广、面积大, 呈片状, 小于 60 m 的区域分布较局限, 反映了北东-南西向古流向小幅摆动。

纳岭沟铀矿床直罗组下段赋矿砂体含砂率 69.5%~100%, 平均值 96.5%, 分布规律与砂体厚度相似(图7), 含砂率等值线图显示砂体整体呈北东-南西向展布趋势。高值含砂率砂体与高厚度砂体吻合度较高, 反映了沉积物搬运方向。

##### 4.4.2 沉积相特征

纳岭沟铀矿地区中侏罗统直罗组下段下亚段沉积相图(图8)显示, 蚀源区、辫状河、三角洲、泛滥平原总体由北东部的呼斯梁-高头窑一带, 向南西向的杭锦旗-伊金霍洛旗水平展布, 空间分布趋势明显, 而不是来源于北西向的辫状河相(赵俊峰等, 2008), 指示了一种由北东至南西方向的古地貌构造环境(Himadri et al., 2021; Beverly et al., 2022)。盆地东北部呼斯梁-高头窑-皂火壕蚀源区, 规律性向纳岭沟-泊江海子-准格尔召乡砾质

辫状河、杭锦旗砂质辫状河、伊金霍洛旗三角洲延展, 系一完整的风化、搬运、沉积的源-汇系统。纳岭沟铀矿正处于毗邻砾质辫状河相的砂质辫状河相。张天福等(2020)、张云等(2022)根据 3200 口钻孔数据库编制的鄂尔多斯盆地北部直罗期古地貌图和三维地质模型也显示, 纳岭沟地区直罗组下段沉积相变明显, 冲积扇-辫状河-三角洲沉积由北部的呼斯梁地区向西南方向展布。张泓等(2008)认为的中侏罗世达拉特旗高头窑地区发育砾岩和砂砾岩质冲积扇体系, 向盆地发育直罗组下段辫状河沉积相, 直罗组上段和安定组下部带相变为曲流河沉积相一致。本次研究与两者一致, 表明纳岭沟铀矿区直罗组主要物源来自于北东部的蚀源区, 且迁移距离较近。

## 5 讨论

一般认为, 盆地沉积物主要来自于盆地边缘蚀源区, 蚀源区的岩石组合很大程度上制约了盆地沉积建造的成分、结构、构造和矿化特征。同时, 盆地沉积建造也可有效示踪盆地沉积物的蚀源区方向、距离和岩石类型。虽然物源区分析方法很多, 很多学者将碎屑锆石 LA-ICPMS 定年作为一项重要手段(Zeh and Cabral, 2021)。但就纳岭沟铀矿区而言, 沉积相稳定, 分布面积不足 100 km<sup>2</sup>, 厚度  $n \times 10$  m 的直罗组下段含铀岩系应是鄂尔多斯盆地边缘某一区段剥蚀的产物。

### 5.1 物源方向

对于盆地沉积物的物源分析, 学者多采目标层

表3 直罗组下亚段含铀岩系重矿物含量(%)统计  
Table 3 Statistics of heavy mineral content (%) of uraniferous rocks in the lower member of the Zhiluo Formation from drill ZK23-16 in the Nalinggou uranium deposit

| 样品编号   | 15ZKN16<br>-72-K11 | 15ZKN16<br>-72-K12 | 15ZKN16<br>-72-K17 | 15ZKN12<br>-62-K2 | 15ZKN12<br>UZK11 | 15ZKN12<br>-62-K15 | 15ZKN12<br>WTN5 | 15ZKN28<br>-52-K3 | 15ZKN28<br>-54-2 | 15ZKN8<br>ZKN31-44 | 15ZKN28<br>-52-K3 | 15ZKN28<br>-54-2 | 15ZKN12<br>-62-K15 | 15ZKN12<br>WTN5 | 15ZKN28<br>-52-K3 | 15ZKN28<br>-54-2 | 15ZKN8<br>ZKN31-44 | 15ZKN28<br>-52-K3 | 15ZKN28<br>-54-2 | 15ZKN12<br>-62-K15 | 15ZKN12<br>WTN5 | 15ZKN28<br>-52-K3 | 15ZKN28<br>-54-2 | 15ZKN12<br>-62-K13 | 17mzk026 | 15ZKN28<br>-36-K14 | 15ZKN31<br>-12-K14 | 15ZKN31<br>-12-K14 | 15N37<br>-20-K14 | 15N37<br>-20-K14 | 分类       |          |       |       |       |       |       |       |  |
|--------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|------------------|--------------------|-----------------|-------------------|------------------|--------------------|-------------------|------------------|--------------------|-----------------|-------------------|------------------|--------------------|-------------------|------------------|--------------------|-----------------|-------------------|------------------|--------------------|----------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| 孔号     | ZKN16-72           | ZKN8-54            | ZKN28-52           | ZK11              | ZKN12-62         | ZKN12-62           | ZKN12-62        | ZKN12-62          | ZKN12-62         | ZKN12-62           | ZKN12-62          | ZKN12-62         | ZKN12-62           | ZKN12-62        | ZKN12-62          | ZKN12-62         | ZKN12-62           | ZKN12-62          | ZKN12-62         | ZKN12-62           | ZKN12-62        | ZKN12-62          | ZKN12-62         | ZKN12-62           | ZKN12-62 | ZKN12-62           | ZKN12-62           | ZKN12-62           | ZKN12-62         | ZKN12-62         | ZKN12-62 | ZKN12-62 |       |       |       |       |       |       |  |
| 深度/m   | 397                | 415                | 330.7              | 415               | 365              | 485                | 410             | 380               | 485              | 410                | 378               | 453              | 418.5              | 421.7           | 343               | 481              | 513                | 513               | 513              | 513                | 513             | 513               | 513              | 513                | 513      | 513                | 513                | 513                | 513              | 513              | 513      | 513      | 513   |       |       |       |       |       |  |
| 与矿层关系  | 矿层                 | 顶板                 | 顶板                 | 顶板                | 顶板               | 顶板                 | 顶板              | 顶板                | 顶板               | 顶板                 | 顶板                | 顶板               | 顶板                 | 顶板              | 顶板                | 顶板               | 顶板                 | 顶板                | 顶板               | 顶板                 | 顶板              | 顶板                | 顶板               | 顶板                 | 顶板       | 顶板                 | 顶板                 | 顶板                 | 顶板               | 顶板               | 顶板       | 顶板       | 顶板    |       |       |       |       |       |  |
| 样重/kg  | 0.6                | 6.3                | 6.15               | 6.08              | 6                | 6.3                | 1.15            | 6.3               | 6.3              | 6.3                | 4.8               | 2.2              | 2.8                | 2.2             | 6.2               | 6.2              | 6.2                | 6.2               | 6.2              | 6.2                | 6.2             | 6.2               | 6.2              | 6.2                | 6.2      | 6.2                | 6.2                | 6.2                | 6.2              | 6.2              | 6.2      | 6.2      | 6.2   | 6.2   |       |       |       |       |  |
| 锆石     | 8                  | 12                 | 10                 | 6                 | 7                | 4                  | 4               | 5                 | 4                | 4                  | 4                 | 4                | 6                  | 7               | 7                 | 4                | 4                  | 4                 | 4                | 4                  | 4               | 4                 | 4                | 4                  | 4        | 4                  | 4                  | 4                  | 4                | 4                | 4        | 4        | 4     | 4     |       |       |       |       |  |
| 电气石    | 11*                | 1                  | 1                  | 2                 | 1                | 1                  | 256*            | 152*              | 152*             | 152*               | 152*              | 152*             | 152*               | 152*            | 152*              | 152*             | 152*               | 152*              | 152*             | 152*               | 152*            | 152*              | 152*             | 152*               | 152*     | 152*               | 152*               | 152*               | 152*             | 152*             | 152*     | 152*     | 152*  | 152*  | 152*  |       |       |       |  |
| 石榴子石   | 41                 | 18                 | 2                  | 10                | 24               | 24                 | 41              | 41                | 24               | 24                 | 25                | 44               | 32                 | 12              | 32                | 28               | 37                 | 37                | 37               | 37                 | 37              | 37                | 37               | 37                 | 37       | 37                 | 37                 | 37                 | 37               | 37               | 37       | 37       | 37    | 37    | 37    |       |       |       |  |
| 金红石    | 17*                | 1                  | 17*                | 0                 | 1                | 1                  | 0               | 1                 | 1                | 1                  | 1                 | 1                | 1                  | 1               | 1                 | 1                | 1                  | 1                 | 1                | 1                  | 1               | 1                 | 1                | 1                  | 1        | 1                  | 1                  | 1                  | 1                | 1                | 1        | 1        | 1     | 1     | 1     |       |       |       |  |
| 白钛石    | 1                  | 1                  | 0                  | 0                 | 0                | 0                  | 0               | 0                 | 0                | 0                  | 0                 | 0                | 0                  | 0               | 0                 | 0                | 0                  | 0                 | 0                | 0                  | 0               | 0                 | 0                | 0                  | 0        | 0                  | 0                  | 0                  | 0                | 0                | 0        | 0        | 0     | 0     | 0     | 0     |       |       |  |
| 赤褐铁矿   | 4                  | 13                 | 1                  | 1                 | 7                | 6                  | 10              | 10                | 6                | 6                  | 1                 | 25               | 5                  | 0               | 7                 | 5                | 5                  | 5                 | 5                | 5                  | 5               | 5                 | 5                | 5                  | 5        | 5                  | 5                  | 5                  | 5                | 5                | 5        | 5        | 5     | 5     | 5     | 5     |       |       |  |
| 榍石     | 3                  | 1                  | 0                  | 1                 | 1                | 1                  | 2               | 1                 | 1                | 2                  | 1                 | 1                | 1                  | 0               | 2                 | 2                | 2                  | 2                 | 2                | 2                  | 2               | 2                 | 2                | 2                  | 2        | 2                  | 2                  | 2                  | 2                | 2                | 2        | 2        | 2     | 2     | 2     | 2     |       |       |  |
| 钛铁矿    | 21                 | 2                  | 2                  | 6                 | 23               | 19                 | 3               | 17                | 17               | 17                 | 17                | 17               | 20                 | 30              | 13                | 22               | 13                 | 13                | 13               | 13                 | 13              | 13                | 13               | 13                 | 13       | 13                 | 13                 | 13                 | 13               | 13               | 13       | 13       | 13    | 13    | 13    | 13    |       |       |  |
| 锐钛矿    |                    |                    |                    |                   | 4*               |                    | 8*              |                   |                  |                    |                   |                  | 38*                | 10*             |                   |                  |                    |                   |                  |                    |                 |                   |                  |                    |          |                    |                    |                    |                  |                  |          |          |       |       |       |       |       |       |  |
| 尖晶石    | 38*                | 18*                |                    |                   |                  |                    |                 |                   |                  |                    |                   |                  |                    |                 |                   |                  |                    |                   |                  |                    |                 |                   |                  |                    |          |                    |                    |                    |                  |                  |          |          |       |       |       |       |       |       |  |
| 绿帘石    | 14                 | 1                  | 57                 | 34                | 24               | 27                 | 21              | 23                | 33               | 33                 | 11                | 21               | 21                 | 27              | 20                | 25               | 26                 | 26                | 26               | 26                 | 26              | 26                | 26               | 26                 | 26       | 26                 | 26                 | 26                 | 26               | 26               | 26       | 26       | 26    | 26    | 26    | 26    | 26    |       |  |
| 磷灰石    | 6                  | 5                  | 3                  | 0                 | 7                | 1                  | 5               | 9                 | 6                | 6                  | 3                 | 4                | 4                  | 6               | 6                 | 4                | 5                  | 5                 | 5                | 5                  | 5               | 5                 | 5                | 5                  | 5        | 5                  | 5                  | 5                  | 5                | 5                | 5        | 5        | 5     | 5     | 5     | 5     | 5     |       |  |
| 黄铁矿    | 1                  | 44                 | 3                  | 45                | 1                | 7                  | 1               | 1                 | 3                | 3                  | 1                 | 1                | 4                  | 10              | 2                 | 2                | 1                  | 1                 | 1                | 1                  | 1               | 1                 | 1                | 1                  | 1        | 1                  | 1                  | 1                  | 1                | 1                | 1        | 1        | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     |       |  |
| 角闪石    | 3*                 |                    |                    | 3*                |                  |                    |                 |                   |                  |                    |                   |                  |                    |                 |                   |                  |                    |                   |                  |                    |                 |                   |                  |                    |          |                    |                    |                    |                  |                  |          |          |       |       |       |       |       |       |  |
| 辉石     | 2*                 |                    |                    | 2*                |                  |                    |                 |                   |                  |                    |                   |                  |                    |                 |                   |                  |                    |                   |                  |                    |                 |                   |                  |                    |          |                    |                    |                    |                  |                  |          |          |       |       |       |       |       |       |  |
| 黄铜矿    |                    |                    |                    |                   |                  |                    |                 |                   |                  |                    |                   |                  |                    |                 |                   |                  |                    |                   |                  |                    |                 |                   |                  |                    |          |                    |                    |                    |                  |                  |          |          |       |       |       |       |       |       |  |
| 方铅矿    |                    |                    |                    |                   |                  |                    |                 |                   |                  |                    |                   |                  |                    |                 |                   |                  |                    |                   |                  |                    |                 |                   |                  |                    |          |                    |                    |                    |                  |                  |          |          |       |       |       |       |       |       |  |
| 碳硅石    |                    |                    |                    |                   |                  |                    |                 |                   |                  |                    |                   |                  |                    |                 |                   |                  |                    |                   |                  |                    |                 |                   |                  |                    |          |                    |                    |                    |                  |                  |          |          |       |       |       |       |       |       |  |
| 孔雀石    |                    |                    |                    |                   |                  |                    |                 |                   |                  |                    |                   |                  |                    |                 |                   |                  |                    |                   |                  |                    |                 |                   |                  |                    |          |                    |                    |                    |                  |                  |          |          |       |       |       |       |       |       |  |
| 辉钨矿    |                    |                    |                    |                   |                  |                    |                 |                   |                  |                    |                   |                  |                    |                 |                   |                  |                    |                   |                  |                    |                 |                   |                  |                    |          |                    |                    |                    |                  |                  |          |          |       |       |       |       |       |       |  |
| ZTR    | 10.00              | 13.00              | 12.00              | 8.00              | 9.00             | 4.00               | 6.00            | 5.00              | 6.00             | 6.00               | 6.00              | 6.00             | 7.00               | 9.00            | 10.00             | 6.00             | 6.00               | 6.00              | 6.00             | 6.00               | 6.00            | 6.00              | 6.00             | 6.00               | 6.00     | 6.00               | 6.00               | 6.00               | 6.00             | 6.00             | 6.00     | 6.00     | 6.00  | 6.00  | 6.00  | 6.00  | 6.00  |       |  |
| UM/SM值 | 0.37               | 0.93               | 2.17               | 3.20              | 0.51             | 0.69               | 0.44            | 0.69              | 0.82             | 0.82               | 0.19              | 0.45             | 0.90               | 0.90            | 0.42              | 0.49             | 0.53               | 0.53              | 0.53             | 0.53               | 0.53            | 0.53              | 0.53             | 0.53               | 0.53     | 0.53               | 0.53               | 0.53               | 0.53             | 0.53             | 0.53     | 0.53     | 0.53  | 0.53  | 0.53  | 0.53  | 0.53  |       |  |
| GZi    | 83.67              | 60.00              | 16.67              | 62.50             | 77.42            | 85.71              | 89.13           | 87.10             | 86.21            | 86.21              | 91.67             | 84.21            | 63.16              | 82.05           | 87.50             | 88.10            | 88.10              | 88.10             | 88.10            | 88.10              | 88.10           | 88.10             | 88.10            | 88.10              | 88.10    | 88.10              | 88.10              | 88.10              | 88.10            | 88.10            | 88.10    | 88.10    | 88.10 | 88.10 | 88.10 | 88.10 | 88.10 | 88.10 |  |

标注\*: 偶见矿物集合体(总粒数), 矿物含量以%计。





表5 纳岭沟铀矿直罗组下亚段含铀岩系(钻孔ZKN23-16)主要元素分析结果(%)  
Table 5 Major element data (%) of uraniumiferous rocks (drill ZKN23-16) from the lower member of the Zhiluo Formation in the Nalingou uranium deposit

| 样品号   | 15nzk053 | 15nzk056 | 15nzk057 | 15nzk059 | 15nzk064 | 15nzk065 | 15nzk069 | 15nzk070 | 15nzk072 | 15nzk074  | 15nzk075    | 15nzk076      | 15nzk078 | 15nzk079       |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-------------|---------------|----------|----------------|
| 岩性  | 红色泥岩     | 紫灰色泥岩    | 灰绿色砂岩    | 灰白色中砂岩   | 灰绿色中砂岩   | 灰白色中砂岩   | 绿色含泥粗砂岩  | 绿色泥砾     | 绿色含泥中砂岩  | 绿灰色泥岩,见擦痕 | 灰色钙质中砂岩,见炭屑 | 绿色中细砂岩,见球状黄铁矿 | 灰白色钙质粗砂岩 | 绿色粗砂岩,见黄铁矿呈条带状 |
| 深度/m  | 354      | 378      | 398.5    | 426      | 472      | 475      | 383      | 407      | 428.9    | 457.8     | 462.5       | 472           | 486.5    | 504.4          |
| SiO <sub>2</sub>  | 57.66    | 57.32    | 55.82    | 71.26    | 68.30    | 75.14    | 71.40    | 54.12    | 70.06    | 53.10     | 70.68       | 58.82         | 48.97    | 73.18          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                          | 18.90    | 18.33    | 10.24    | 12.49    | 13.00    | 12.51    | 12.47    | 19.04    | 12.98    | 15.56     | 13.09       | 13.66         | 9.24     | 12.94          |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                          | 7.54     | 9.10     | 4.94     | 3.91     | 4.76     | 2.02     | 3.27     | 5.90     | 4.16     | 4.52      | 3.21        | 6.00          | 1.12     | 2.56           |
| FeO   | 0.68     | 0.39     | 4.01     | 1.26     | 2.03     | 0.15     | 1.82     | 4.95     | 1.80     | 9.92      | 0.76        | 6.94          | 0.11     | 0.49           |
| TiO <sub>2</sub>  | 0.80     | 0.78     | 0.42     | 0.40     | 0.38     | 0.28     | 0.42     | 0.71     | 0.42     | 0.67      | 0.68        | 0.45          | 0.18     | 0.35           |
| K <sub>2</sub> O  | 2.94     | 3.13     | 2.63     | 3.32     | 3.30     | 3.29     | 3.50     | 2.66     | 3.44     | 2.21      | 3.65        | 3.25          | 2.46     | 3.26           |
| Na <sub>2</sub> O                                       | 1.13     | 0.71     | 1.36     | 1.76     | 1.52     | 2.34     | 1.81     | 0.72     | 1.44     | 0.68      | 2.11        | 1.46          | 1.85     | 2.22           |
| CaO   | 1.00     | 0.89     | 8.04     | 0.83     | 0.92     | 1.01     | 1.09     | 0.82     | 0.76     | 1.15      | 1.10        | 0.62          | 18.50    | 1.00           |
| MgO   | 2.91     | 2.56     | 2.27     | 1.48     | 2.42     | 1.01     | 1.50     | 3.67     | 1.63     | 4.26      | 1.58        | 3.45          | 0.58     | 1.23           |
| MnO   | 0.051    | 0.043    | 0.283    | 0.045    | 0.076    | 0.035    | 0.056    | 0.084    | 0.048    | 0.230     | 0.082       | 0.206         | 0.606    | 0.055          |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                           | 0.114    | 0.053    | 0.090    | 0.085    | 0.084    | 0.087    | 0.088    | 0.057    | 0.093    | 0.189     | 0.108       | 0.064         | 0.087    | 0.079          |
| LOI   | 6.47     | 6.24     | 9.60     | 3.31     | 3.47     | 2.22     | 2.90     | 7.30     | 3.11     | 7.25      | 2.86        | 4.89          | 15.96    | 2.50           |
| 总量  | 100.20   | 99.55    | 99.70    | 100.15   | 100.26   | 100.09   | 100.32   | 100.03   | 99.94    | 99.74     | 99.91       | 99.81         | 99.66    | 99.86          |
| SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>        | 3.05     | 3.13     | 5.45     | 5.71     | 5.25     | 6.01     | 5.73     | 2.84     | 5.40     | 3.41      | 5.40        | 4.31          | 5.30     | 5.66           |
| K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O                      | 2.60     | 4.41     | 1.93     | 1.89     | 2.17     | 1.41     | 1.93     | 3.69     | 2.39     | 3.25      | 1.73        | 2.23          | 1.33     | 1.47           |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /(CaO+Na <sub>2</sub> O) | 8.87     | 11.46    | 1.09     | 4.82     | 5.33     | 3.73     | 4.30     | 12.36    | 5.90     | 8.50      | 4.08        | 6.57          | 0.45     | 4.02           |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub>        | 23.63    | 23.50    | 24.38    | 31.23    | 34.21    | 44.68    | 29.69    | 26.82    | 30.90    | 23.22     | 19.25       | 30.36         | 51.33    | 36.97          |
| K <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>         | 0.16     | 0.17     | 0.26     | 0.27     | 0.25     | 0.26     | 0.28     | 0.14     | 0.27     | 0.14      | 0.28        | 0.24          | 0.27     | 0.25           |

注:除去H<sub>2</sub>O和CO<sub>2</sub>,氧化物和烧失量总量99.55%~100.26%,去除挥发分后重算到100%。

表6 纳岭沟铀矿直罗组下亚段含铀岩系(钻孔ZKN23-16)稀土元素分析结果( $10^{-6}$ )  
 Table 6 REE( $10^{-6}$ ) element data of uraniferous rocks (drill ZKN23-16) from the lower member of the Zhiluo Formation in the Nalinggou uranium deposit

| 样品号       | 15nZK040           | 15nZK041 | 15nZK042 | 15nZK043 | 15nZK044 | 15nZK045 | 15nZK046 | 15nZK047 | 15nZK048 | 15nZK050 | 15nZK051 | 15nZK052 |
|-----------|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 岩性        | 灰绿色中砂岩, 炭屑发育, 含矿围岩 |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| 深度/m      | 418                | 418      | 419      | 420      | 443      | 444      | 445      | 446      | 447      | 448      | 449      | 450      |
| La        | 40.5               | 29       | 33.6     | 29.2     | 30.4     | 35.7     | 24.3     | 25.2     | 31.1     | 55.5     | 30.5     | 40.1     |
| Ce        | 69.6               | 51       | 59.8     | 52       | 51.7     | 58.7     | 40.2     | 43.2     | 54.5     | 109      | 52.3     | 68       |
| Pr        | 7.85               | 6.27     | 7.48     | 6.01     | 5.82     | 6.38     | 4.33     | 4.97     | 6.39     | 12.9     | 5.69     | 7.5      |
| Nd        | 28.2               | 24.1     | 28.4     | 22.6     | 20.9     | 22.7     | 15.8     | 18.8     | 23.9     | 49.2     | 20.6     | 26.6     |
| Sm        | 3.98               | 4.4      | 5.4      | 3.58     | 3.16     | 3.55     | 2.55     | 3.79     | 5.23     | 7.9      | 3.28     | 3.94     |
| Eu        | 0.842              | 1.18     | 1.41     | 0.916    | 0.76     | 0.831    | 0.688    | 1.1      | 1.62     | 1.78     | 0.848    | 0.936    |
| Gd        | 3.29               | 4.08     | 5.03     | 3        | 2.65     | 3.11     | 2.22     | 3.08     | 4.25     | 6.7      | 2.86     | 3.37     |
| Tb        | 0.425              | 0.792    | 1.02     | 0.445    | 0.377    | 0.468    | 0.355    | 0.535    | 0.731    | 1.02     | 0.492    | 0.47     |
| Dy        | 2.09               | 4.6      | 6.09     | 2.26     | 1.87     | 2.48     | 1.84     | 2.73     | 3.64     | 5.12     | 2.64     | 2.34     |
| Ho        | 0.369              | 0.967    | 1.32     | 0.414    | 0.334    | 0.478    | 0.351    | 0.503    | 0.691    | 0.943    | 0.511    | 0.435    |
| Er        | 1.08               | 2.64     | 3.6      | 1.19     | 0.959    | 1.38     | 0.963    | 1.34     | 1.83     | 2.63     | 1.44     | 1.26     |
| Tm        | 0.179              | 0.433    | 0.592    | 0.2      | 0.162    | 0.236    | 0.153    | 0.223    | 0.285    | 0.407    | 0.245    | 0.222    |
| Yb        | 1.24               | 2.61     | 3.5      | 1.24     | 1.04     | 1.55     | 1.08     | 1.36     | 1.69     | 2.49     | 1.54     | 1.46     |
| Lu        | 0.173              | 0.374    | 0.479    | 0.184    | 0.147    | 0.21     | 0.147    | 0.19     | 0.238    | 0.365    | 0.225    | 0.215    |
| Y         | 10.1               | 32.3     | 42.8     | 11.2     | 8.77     | 13.1     | 9.77     | 13.9     | 19.9     | 27.9     | 13.1     | 11.3     |
| ΣREE      | 169.92             | 164.75   | 200.52   | 134.44   | 129.05   | 150.87   | 104.75   | 120.92   | 156.00   | 283.86   | 136.27   | 168.15   |
| HREE      | 150.972            | 115.95   | 136.09   | 114.306  | 112.74   | 127.861  | 87.868   | 97.06    | 122.74   | 236.28   | 113.218  | 147.076  |
| LREE      | 18.946             | 48.796   | 64.431   | 20.133   | 16.309   | 23.012   | 16.879   | 23.861   | 33.255   | 47.575   | 23.053   | 21.072   |
| LREE/HREE | 0.12549            | 0.42084  | 0.47344  | 0.17613  | 0.14466  | 0.17998  | 0.19209  | 0.24584  | 0.27094  | 0.20135  | 0.20362  | 0.14327  |
| La/Yb     | 32.66              | 11.11    | 9.60     | 23.55    | 29.23    | 23.03    | 22.50    | 18.53    | 18.40    | 22.29    | 19.81    | 27.47    |

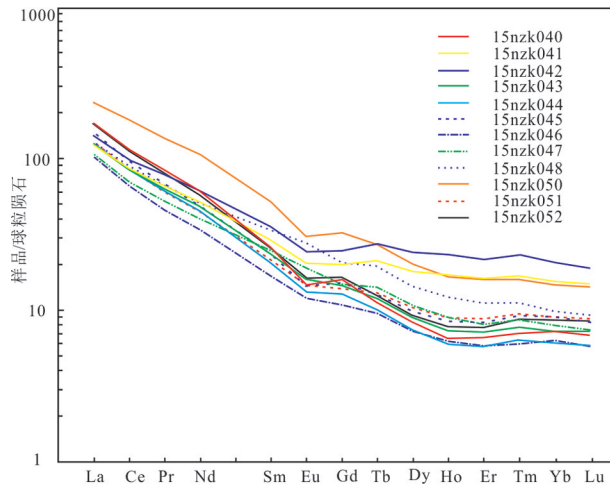


图5 直罗组下亚段含铀岩系(钻孔ZK23-16)含铀岩系稀土元素球粒陨石标准化蛛网图

Fig.5 REE chondrite-normalized patterns of rocks collected from the lower member in the Zhiluo Formation from drill ZK23-16

位的碎屑锆石 LA-ICP-MSU-Pb 年龄示踪蚀源区的方法(张龙等, 2016; 陈印等, 2017; 雷开宇等,

2017; 俞初安等, 2020; Zeh and Cabral et al., 2021; Yu et al., 2021), 取得了许多进展。就纳岭沟铀矿床直罗组的物源示踪, 焦养泉等(2015)、谢惠丽等(2016)根据纳岭沟地区前期钻孔和自然露头信息, 建造了包括纳岭沟铀矿在内的大型沉积杂体, 认为源于阴山-古河套的物源以北西-南东方向搬运至盆地。张龙等(2016)发现大营-纳岭沟铀矿区直罗组砂岩 LA-ICP-MS 碎屑锆石 U-Pb 年龄主要集中在 251~308 Ma、322~354 Ma、1529~2182 Ma、2200~2632 Ma; 陈印等(2017)根据纳岭沟铀矿直罗组下段 LA-ICP-MS 碎屑锆石 U-Pb 年龄(2479±11)~(2460±19) Ma、2300~1950 Ma、(1896±21)~(1820±32) Ma、316~266 Ma 及 165 Ma, 俞初安等(2020)依据纳岭沟铀矿毗邻的塔然高勒铀矿区直罗组下段 LA-ICP-MS 碎屑锆石 U-Pb 年龄 2200~2600 Ma、1500~2000 Ma、280~248 Ma、157 Ma, 均认为纳岭沟地区直罗组物源主要来自盆地北部的大青山-乌拉山地区的高级变质岩和岩浆岩等。

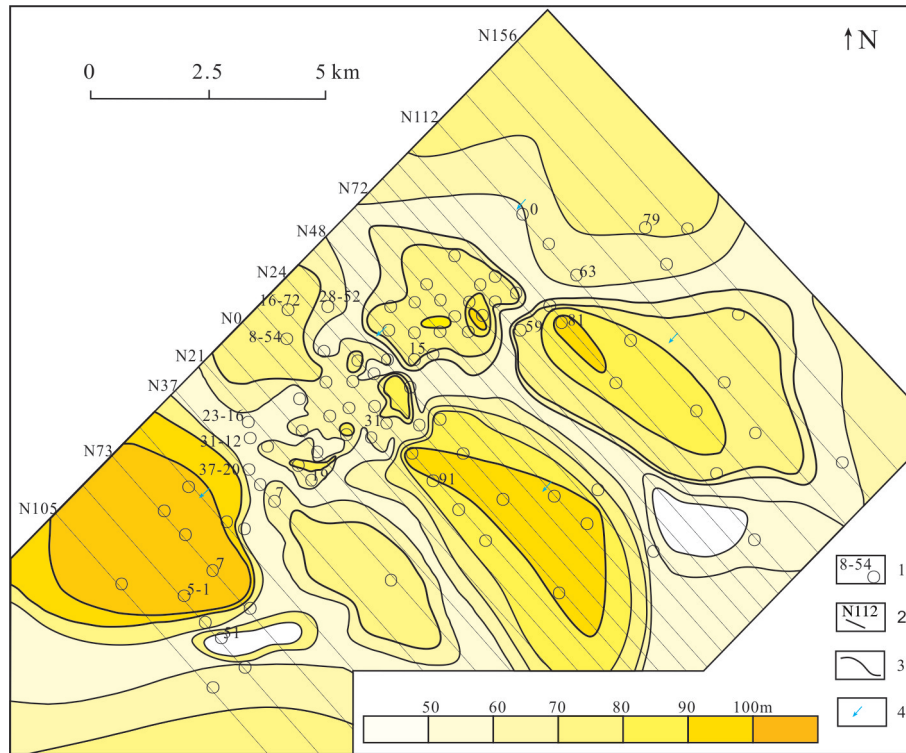


图6 纳岭沟铀矿床直罗组下段下亚段砂体厚度等值图(据核工业 208 大队, 略改)

1-钻孔及编号; 2-勘探线及编号; 3-砂体厚度等值线; 4-古流向

Fig.6 The sand body thickness contour map of the lower member of the Lower Zhiluo Formation in the Nalinggou uranium deposit (modified from CNNC No.208 Geological Party)

1-Drill and number; 2-Survey line and number; 3-Sand body thickness isoline; 4-Ancient flow direction



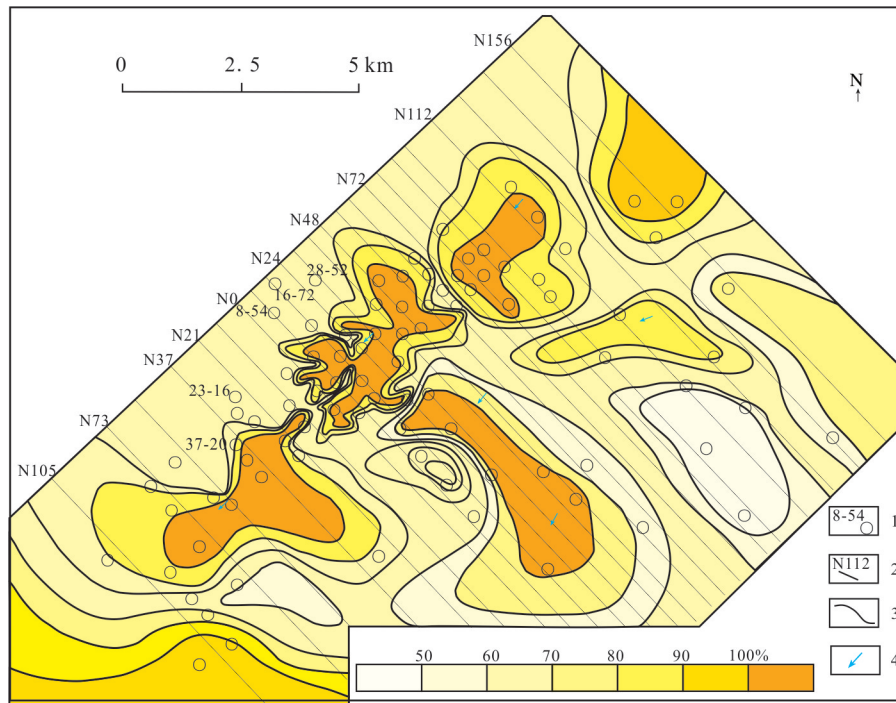


图7 纳岭沟铀矿床直罗组下段下亚段含砂率等值线图(据核工业208大队<sup>①</sup>,略改)

1—钻孔及编号;2—勘探线及编号;3—含砂率等值线;4—古流向

Fig.7 The sand percentage isogram of the lower member of the Lower Zhiluo Formation in the Nalinggou uranium deposit (Modified from CNNC No.208 Geological Party<sup>①</sup>)

1—Drill and number; 2—Survey line and number; 3—Sand isoline; 4—Ancient flow direction

鄂尔多斯盆地东北部上石炭统本溪组( $C_2b$ ) (309~440 Ma、1687~2669 Ma)、下二叠统太原组( $P_3t$ ) (310~390 Ma、781~901 Ma、1803~2669 M)、下石盒子8段(2200~1800 Ma、2600~2320 Ma和390~310 Ma)、上二叠统石千峰组( $P_3s$ ) (276~421 Ma、803~839 Ma和1718~2583 Ma)(韩会平等,2014;屈红军等,2020),内蒙古凉城蛮汗山古元古代二长花岗岩(1933.3±9.8)Ma(张玉清等,2016)、内蒙古和林—凉城一带花岗岩(1923~1958)Ma(陈海东等,2016)、前寒武纪岩浆岩,集宁地区岩浆岩(267.2~272.1)Ma(蒋孝君等,2016),以及山西宁武—静乐盆地太原组(N-8)碎屑锆石(303~320 Ma)(李洪颜等,2009)、火山碎屑岩((179.2±0.79)Ma)和凝灰质碳酸盐岩年龄((160.6±0.55)Ma)(李振宏等,2015)等,均表明鄂尔多斯盆地东北部至内蒙古与山西交界处完全具备向直罗组提供各时代碎屑锆石的能力。

笔者依据鄂尔多斯盆地北部河套盆地和石拐盆地发育的与中侏罗统直罗组同期的五当沟组( $J_{1-2w}$ )含煤碎屑岩建造,侏罗世长汉沟组( $J_2c$ )杂砂岩建造(Bradley et al.,2001;葛玉辉等,2010;梁子若

等,2020;陆鹿等,2022),狼山东升庙和义和久地区中下侏罗统碎屑岩(付星辉等,2016),盆地北部直罗组由东向西的沉积古流向(赵俊峰等,2010),以及河套盆地南部吉兰泰凹陷下侏罗系地层(杨德相等,2020),初步编制了鄂尔多斯盆地北部早侏罗世蚀源区分布示意图(图9),表明早侏罗世开始沉积的河套盆地屏蔽了狼山、阴山和乌拉山地区的剥蚀物对纳岭沟铀矿区直罗组的贡献,也表明矿区的早中侏罗世隆起区最有可能承担了重要物源区,其中的孔兹岩带、变质岩可与前人碎屑锆石定年结果相对应。

包括达拉特旗地区出露的古元古代美岱召群变质岩的孔兹岩带最大可能成为阴山物源南迁纳岭沟地区的屏障(图1)(钟炎等,2016;冯晓曦等,2019)。虽然杭锦后旗至达拉特旗一带的河套盆地缺少深部地球物理和岩心资料,依据包头石拐盆地的下侏罗统推测乌拉特前旗的河套地区隐伏中侏罗统河湖相沉积,与纳岭沟地区直罗组河流相沉积分居孔兹岩两侧。

纳岭沟铀矿区直罗组含铀岩系剖面图和沉积

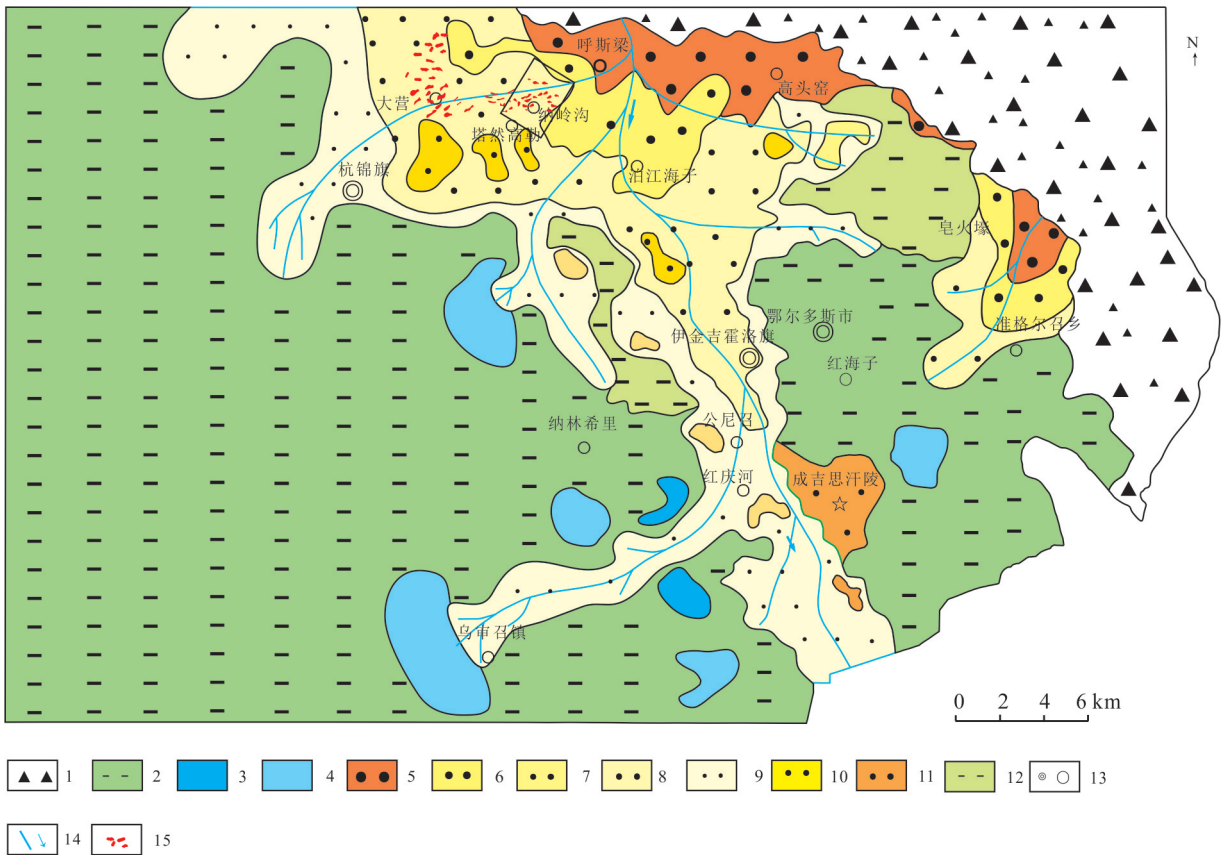


图8 纳岭沟地区直罗组下段下亚段沉积相图

1—蚀源区;2—泛滥平原;3—河间洼地;4—湖泊;5—砾质辫状河道;6—砂质辫状河道;7—辫状河道;8—三角洲平原;9—心滩;10—边滩;11—沙坝;12—分流间湾;13—地理位置;14—河流及流向;15—铀矿体地表投影

Fig.8 The sedimentary facies map of the lower member of the Lower Zhiluo Formation in the Nalinggou area

1—Erosion source; 2—Flood plain; 3—Gamma herculis depression; 4—Lake; 5—Gravel braided channel; 6—Sandy braided channel; 7—Braided channel; 8—Delta plain; 9—Heart beach; 10—Side beach; 11—Sand bar; 12—Distributary bay; 13—Geographic location; 14—River and flow direction; 15—Projection of Uranium ore body

相显示,直罗组含铀岩系物源来源于矿区的东北方向。直罗组赋矿砂体厚度等值线图(图6)和含砂率等值线图(图7)则比较明显指出直罗组下段物源方向来自于纳岭沟矿区的北东向。直罗组下段下亚段沉积相图(图8)表明纳岭沟地区直罗组下段蚀源区、冲积扇相、辫状河相、三角洲相由东北向—西南方向展布,纳岭沟铀矿区正处于砂质辫状河相。矿区东北缘出露和古元古代变质岩和三叠系沉积岩(图1),据此判断,矿区东北缘的蚀源区提供了物源,与张云等(2022)编制的鄂尔多斯盆地北部三维地质模型一致。

古地磁研究表明,晚三叠世—中侏罗世,鄂尔多斯地块曾发生了45°以上的大角度构造旋转(马醒华等,1993)。中国大陆高精度GPS网表明,晚新生代以来,鄂尔多斯盆地的北边界以走滑速率1.1~

1.2 mm/a 逆时针旋转(李延兴等,2005)。据此,笔者推断早中侏罗世,鄂尔多斯盆地北部可能指向晋北、内蒙南部交界地带。当然,对于鄂尔多斯地块的旋转,尚不确定鄂尔多斯盆地与周缘的阴山造山带和山西断隆是否同步旋转,但晚三叠世至中侏罗世,鄂尔多斯原型盆地东部的宁武—静乐盆地发现的下侏罗统永定庄组火山碎屑岩((179.2±0.79) Ma)和中侏罗统云岗组顶部凝灰质碳酸盐岩((160.6±0.55) Ma),具备提供165 Ma、157 Ma的碎屑锆石(赵俊峰等,2010;李相博等,2012;李振宏等,2015),以及样品15ZKN28-52-K3和17nzk026中发现的碳硅石,说明内蒙古南部与山西北部的办罗界处具有为纳岭沟直罗组提供物源的充分条件。如果山西宁武—静乐地区的中侏罗统火山岩参与了纳岭沟地区直罗组砂体建造,那么纳岭沟等

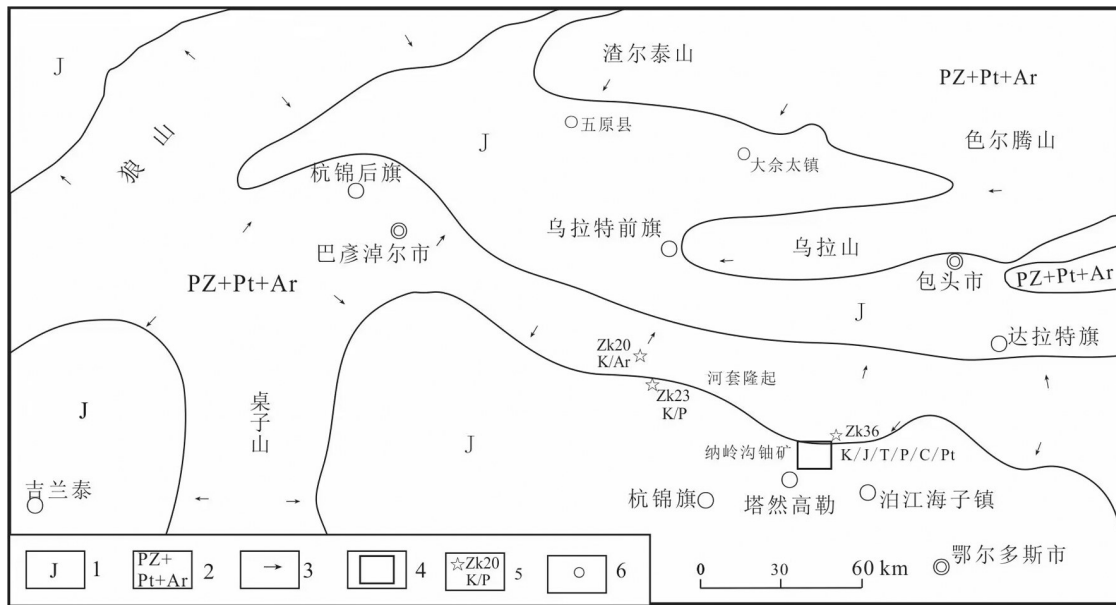


图9 鄂尔多斯盆地北部早中侏罗世蚀源区分布示意图

1—早中侏罗世沉积区;2—前侏罗纪剥蚀区;3—物源方向;4—纳岭沟矿区;5—钻孔、编号及揭露地层;6—城镇

Fig.9 The distribution diagram of the Early-Middle Jurassic provenance in the north Ordos Basin

1—Early-middle Jurassic sediment; 2—Pre-Jurassic strata; 3—Source direction; 4—Nalinggou mining area; 5—Drill, number and strata; 6—Cities and towns

铀矿床的成矿作用研究将成为新的研究方向。

就重矿物而言,直罗组的重矿物与鄂尔多斯盆地山西组、下石盒子组可对照(汪正江等,2001;张道锋等,2009),表明鄂尔多斯盆地东北方向的晚古生界地层具有向纳岭沟地区直罗组提供物源的能力。

据此,笔者认为纳岭沟铀矿区直罗组含铀岩系物源来自于包括呼斯梁—高头窑—皂火壕蚀源区在内的晋蒙交界处太古代、元古代、古生代变质岩、岩浆岩和中生代的沉积岩、火山岩。

## 5.2 物源距离

物源距离影响盆地沉积物的胶结程度、成分、结构、构造和地球化学等重要指标。通常情况下,长距离搬运的碎屑物具有较好的分选性和磨圆度,较高的成分成熟度,而短距离迁移的碎屑物具有较差的分选性、磨圆性、成分成熟度。纳岭沟铀矿直罗组具有较低的结构成熟度和成分成熟度,这在学者的研究成果已形成了共识(易超等,2014;王思力等,2018;张宾等,2020a)。直罗组含铀岩系主要岩石类型为疏松、较疏松状中粗粒长石砂岩,碎屑多呈棱角状、次棱角状,碎屑成分复杂的长石砂岩,而滚圆状碎屑则表明部分碎屑物系远距离搬运来的,未引起学者的足够重视。较低的结构成熟度(粗

粒、中粒碎屑占比63%),较低的成分成熟度指数( $Q/(F+R)=0.41\sim 0.71$ ),表明物源区剥蚀期处于寒冷、干旱的古气候和相对高差大的地形地貌,剥蚀物经历了较短的搬运、沉积时间和距离。重矿物中棱角状的锆石,集合体状产出的棱角状、次棱角状电气石,低值ZTR(4~13)、UM/SM(0.37~3.20)、GZi(16.67~91.67),均说明碎屑剥蚀、迁移距离较短。

对于直罗组含铀岩系的迁移距离,许多学者认为纳岭沟地区直罗组属近源沉积。例如:冯晓曦等(2017)认为直罗组的岩石学、碎屑锆石年龄图谱指示阴山造山带前寒武纪高级变质岩、古生代花岗岩及中生代火山岩等为纳岭沟铀矿提供了物源;张宾等(2020b)根据纳岭沟含铀长石岩屑砂岩、岩屑长石砂岩和岩屑砂岩较低的成分成熟度,认为直罗组下段下亚段属近源沉积。但是,冯晓曦等(2019)根据鄂尔多斯盆地北部包括美岱召岩群(Pt<sub>1</sub>m)的孔兹岩带与东胜铀矿田相依的空间关系,推测其是直罗组的重要物源区之一。同时,1:25万乌拉特前旗幅(K49C004001)钻孔ZK20(地层K、Ar)、ZK23(地层K、P)、ZK24(地层K、Ar)、ZK33(地层T、P)、ZK36(地层K、J、T、P、C、Pt)等揭露的地层埋深情况,表明中侏罗统直罗组沉积时,盆地边缘出露了T、P、C、Pt



地层,这与张云等(2022)编制的鄂尔多斯盆地东胜地区直罗组“北高南低、东高西低”古地貌特点一致。

虽然如此,盆地北部的孔兹岩带未发现与316~266 Ma、165~157 Ma 锆石年龄相对照的岩石类型,这也暗示直罗组含铀岩系的物源可能更复杂。直罗组含铀岩系较低的结构成熟度和成分成熟度属于近源沉积,而许多次棱角状、次滚圆状的锆石、粒状金红石、不规则状榍石等碎屑物的搬运距离或者来自较远距离,或者近处蚀源区沉积物的再循环。对比晋蒙交界处出露的各时代的岩石类型可满足碎屑物的结构和成分特征,山西宁武—静乐盆地的中下侏罗统火山碎屑岩(李振宏等,2015)可提供含铀岩系中165 Ma、157 Ma的碎屑锆石。

同时,晋蒙交界处是五台地块、阴山陆块和鄂尔多斯地块长期相互作用的结果,具有岩石地球化学特征显示的活动边缘、被动边缘、大陆岛弧和安第斯型俯冲带构造环境。

由于缺少侏罗纪晋蒙交界处和鄂尔多斯盆地北部古地貌、古气候、古沉积体系的对比,本文还无法准确判断纳岭沟直罗组含铀岩系搬运轨迹。因此,根据分选、磨圆和碎屑锆石年龄,初步判断纳岭沟直罗组含铀岩系具有近源沉积和远距离沉积的特点,但以近源沉积为主。

### 5.3 物源类型

盆地沉积物的岩石类型、碎屑成分和地球化学特征是蚀源区岩石类型的综合响应。虽然风化、搬运过程中,蚀源区岩石经历了复杂的物理、化学、生物等表生营力作用,但碎屑物仍保留了丰富的蚀源区信息,可有效反演物源区岩石类型,进而构建盆地古地质构造格架(Vanesa et al., 2019)。直罗组含铀岩系中大量具有波状消光石英表明其来自于变质岩。岩屑成分指示蚀源区存在火成岩岩屑(花岗岩岩屑、流纹岩岩屑)、沉积岩岩屑(泥岩岩屑、燧石、细粒砂岩岩屑)、变质岩岩屑(石英岩岩屑、绢云千枚岩岩屑、云母石英片岩岩屑)。

重矿物中次滚圆状石榴子石、电气石、金红石、绿帘石等可由横贯鄂尔多斯地块北部的孔兹岩带、山西天镇一带太古代片麻岩提供,其中达拉特旗一带古元古代美岱岩岩群(Pt<sub>1</sub>m)(图1)硅质岩、含石墨片岩可能提供重要物源。次棱角锆石、磷灰石、金

红石、榍石的重矿物组合为酸性花岗岩,角闪石、辉石、钛铁矿指示基性、超基性岩浆岩,可对应内蒙凉城一带的大面积古元古代二长花岗岩和脉状辉长岩。次滚圆粒状锆石可能来自于鄂尔多斯东胜至准格尔旗一带二叠系、三叠系砂岩。单晶石英和样品17026、15UZK11-K36的碳硅石指示物源区或分布火山岩,或沉积过程受到同期火山岩的污染,山西宁武—静乐盆地中侏罗世火山碎屑岩提供了印证。

张宾等(2020a)根据岩石学和重矿物特征,认为直罗组下段下亚段物源区为阴山—大青山—乌拉山地区的前寒武纪孔兹岩、片麻岩、闪长岩以及海西—印支期辉长岩和花岗闪长岩;俞初安等(2020)根据碎屑锆石U-Pb认为大青山—乌拉山地区的孔兹岩、TTG片麻岩、麻粒岩和酸性、基性岩浆岩为直罗组提供了物源,而本文认为括呼斯梁—高头窑—皂火壕蚀源区在内的,纳岭沟铀矿以东的内蒙古呼和浩特—山西右玉、集宁—山西大同交界地带太古宙、元古宙孔兹岩、片麻岩、花岗岩、辉绿岩、正长岩和古生代和中生代砂岩、灰岩,晋北早中侏罗世火山碎屑岩为含铀岩系提供了物源,其中,横亘于伊盟隆起北缘的孔兹岩(冯晓曦等,2019)和鄂尔多斯准格尔旗一带的石炭纪、二叠纪、三叠纪沉积岩主要物源区。究其原因,本文示踪了直罗组含铀岩系中的沉积岩、火山岩岩屑和重矿物碳硅石来源,并简要恢复了鄂尔多斯盆地北部乌拉山地区侏罗纪地貌,参考了古地磁研究(马醒华等,1993)和大地测量GPS成果(李延兴等,2005)。

综上所述,直罗组含铀岩系物源区为包括呼斯梁—高头窑—皂火壕近源在内的,内蒙古准格尔旗—山西右玉交界地带为太古宙、元古宙、古生代、中生代变质岩、岩浆岩、沉积岩和火山岩。碎屑物具有以近源为主,伴有远源沉积的特征。由于岩石矿物学、重矿物学示踪母岩的多解性和晋北、内蒙古南部蚀源区岩相古地理研究的薄弱,物源区岩石类型仍处于定性认识推测阶段。

虽然如此,本文将纳岭沟铀矿直罗组含铀岩系物源区厘定为,包括达拉特旗孔兹岩带在内的鄂尔多斯盆地东北方向的晋北—内蒙古南部交界处前侏罗世基岩出露区,有别于前人认为的阴山、乌拉山地区(图10)。

加强晋北—内蒙古集宁地区南部交界处蚀源

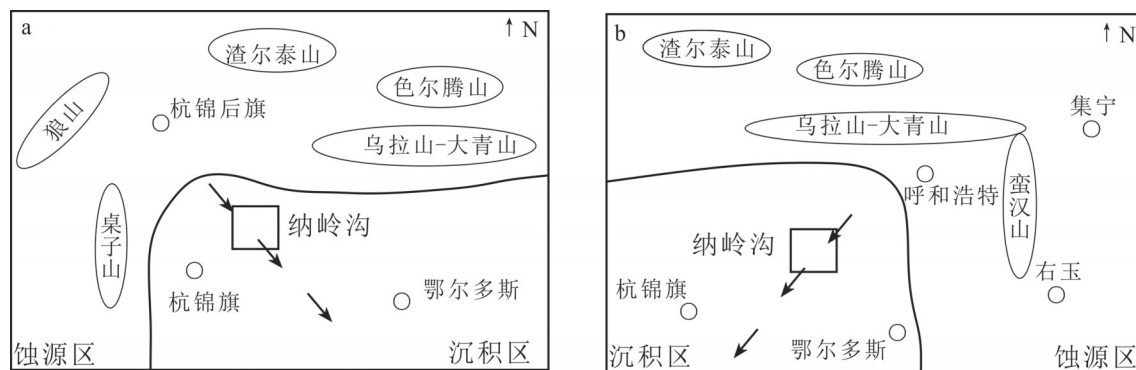


图10 纳岭沟地区中侏罗统直罗组古沉积方向  
a—前期研究的北西向;b—本文研究的北东向

Fig.10 Sedimentary direction of the Middle Jurassic Zhiluo Formation in the Nalinggou area  
a—Compiled from previous studies to exhibit northwest direction; b—Northeast direction in this study

区的研究或许有助于深化纳岭沟、大营、塔然高勒等其他铀矿床含矿砂体物源、铀源、含铀流体来源研究,也可为鄂尔多斯盆地中生代构造演化提供一定的科学信息。

## 6 结 论

(1) 纳岭沟铀矿直罗组含铀岩系主要为长石砂岩,碎屑分选中等至差,主要为棱角状、次棱角状,少量为次滚圆状;棱角状、次棱角状尖晶石、锐钛矿、角闪石、碳硅石等重矿物非均匀分布,ZTR指数2%~10%,具低的结构成熟度和成分成熟度,呈现以近距离沉积为主,伴有远源沉积的特点。

(2) 稀土元素配分曲线相似,元素含量变化幅度大;岩层产状、赋矿砂体、高含砂率砂体由北东方向至南西方向规律性同步展布,呈现整套含铀岩系沉积体系稳定,且碎屑物由矿区北东端迁入,向南西端布局的趋势,表明矿区北东方向的前中侏罗世晋蒙交界处的剥蚀区为直罗组含铀岩系的蚀源区。

(3) 种类繁多的石英岩、云母石英片岩、花岗岩、流纹岩、砂岩、硅质岩岩屑和角闪石、辉石、碳硅石等特殊标型重矿物表明,处于纳岭沟矿区北东向蚀源区的太古代片麻岩,元古代孔兹岩、花岗岩、辉长岩,古生代岩浆岩、沉积岩和中生代火山岩为蚀源区,其中矿区北邻的东西向含早元古代美岱召群的孔兹岩带提供了重要物源。

### 注释

①核工业 208 大队. 2014. 内蒙古达拉特旗纳岭沟铀矿床

N12~N28线详查地质报告[R].

## References

- Bao Hongping, Shao Dongbo, Hao Songli, Zhang Guisong, Ruan Zhengzhong, LiuGang, Ouyang Zhengjian. 2019. Basement structure and evolution of early sedimentary cover of the Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 26(1): 33–43(in Chinese with English abstract).
- Beverly Z S, Angeline M C, Daniel I H, Federico A, Darin A C. 2022. Lithostratigraphy, chronostratigraphy, and sedimentary environments of the Middle Miocene Quebrada Honda Basin in southern Bolivia and implications for Andean climate and uplift[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 601: 1–14.
- Bhatia M R. 1985. Rare earth element geochemistry of Australia Paleozoic Greywacks and mudrock: Provenance and tectonic control[J]. *Sedimentary Geology*, 45: 97–113.
- Bradley D R, Brian J D, Tim C. 2001. Early Jurassic extensional basin formation in the Daqing Shan segment of the Yinshan belt, northern North China Block, Inner Mongolia[J]. *Tectonophysics*, 339(3): 239–258.
- Chen Haidong, Wang Zilong, Lu Ning, Yin Hai, He Guoqiang. 2016. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age and their tectonic significance of the garnet granites from Helin-Liangcheng zone of Central Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 43(1): 81–90(in Chinese with English abstract).
- Chen Yin, Feng Xiaoxi, Chen Lulu, Jin Ruoshi, Miao Peisen, Sima Xianzhang, Miao aisheng, Tang Chao, Wang Gui, Liu Zhongren. 2017. An analysis of U-Pb dating of detrital zircons and modes of occurrence of uranium minerals in the Zhiluo Formation of northeastern Ordos Basin and their indication to uranium sources[J]. *Geology in China*, 44(6): 1190–1206(in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Chen Zuyi, Chen Haisheng, Gu Kangheng. 2010. Research and Evaluation of China Uranium Deposit, the Third Volume of Sandstone—Type Uranium Deposits[M]. Beijing: China Nuclear Industry Geology Bureau, 1–360 (in Chinese).
- Cheng Xianyu, Zhang Tianfu, Chen Yinhang, Wang Shaoyi, Tian Jian. 2021. Paleosedimentary environment evolution of Zhiluo Formation in Tarangaole area, northern margin of the Ordos Basin—evidence from geochemical characteristics[J]. North China Geology, 44(2): 1–3(in Chinese with English abstract).
- David C, Gary O'Sullivan, Caracciolo L, Chris M, Shane T. 2020. Sourcing the sand: Accessory mineral fertility, analytical and other biases in detrital U–Pb provenance analysis[J]. Earth—Science Reviews, 202: 1–27.
- Feng Xiaoxi, Jin Ruoshi, Sima Xianzhang, Li Jianguo, Zhao Hualei, Chen Yin, Chen Lulu, Tang Chao, Ao Cong, Wang Xinhua. 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).
- Feng Xiaoxi, Teng Xueming, He Youyu. 2019. Preliminary discussions on the metallogenesis of Dongsheng uranium orefields in the Ordos basin[J]. Geological Survey and Research, 42(2): 96–108(in Chinese with English abstract).
- Fu Xinghui, Zhao Hongge, Zhou Yijun, Peng Zhichao, Jiang Sheng, Zhangsun Xuanqi, Wang Hairan, Li Yanan. 2016. Jurassic detrital zircon U–Pb dating of Langshan area, Inner Mongolia, and its provenance significance[J]. Geological Bulletin of China, 35(12): 2063–2075(in Chinese with English abstract).
- Ge Yuhui, Xi Aihua, Wang Zhigang, Wang Yufen, Sun Chunlin. 2010. A palaeoclimatic analysis of the Middle Jurassic period in Daqinshan area, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 37(1): 204–211(in Chinese with English abstract).
- Han Huiping, Wu Chunying, Bai Qinghua, Chen Peng, Liu Xinshe, Qin Baiping. 2014. Zircon U–Pb dating of clastic sandstone in the Upper Paleozoic from Wushenqi area, Ordos basin and its geological significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 32(4): 643–653(in Chinese with English abstract).
- Himadri B, Dandele P S, Srivastava S K. 2021. Sedimentary facies of the Mesoproterozoic Srisailam Formation, Cuddapah basin, India: Implications for depositional environment and basin evolution[J]. Marine and Petroleum Geology, 133: 105242.
- Hou Mingcai, Jiang Wenjian, Ni Shijun, Huang Hu, Luo Wen, Shi Xin, Miu Zongli. 2016. Geochemical characteristic of the Lower and Middle Jurassic clastic rocks in the southern margin of the Yili Basin, Xinjiang and its constraints on provenance[J]. Acta Geologica Sinica, 90(12): 3337–3351(in Chinese with English abstract).
- Jaireth S, McKay A, Lambert I. 2008. Association of large sandstone uranium deposits with hydrocarbons[J]. Geoscience Australia Issue, 89: 1–6.
- Jiang Xiaojun, Xu Zhongyuan, Liu Zhenghong, Xue Wei, Yan Pengbing, XingYajie. 2016. Petrogenesis and tectonic setting of the granites in Honggeertu area, central Inner Mongolia: Constraints from LA–ICP–MS zircon U–Pb chronology and geochemistry[J]. Geological Bulletin of China, 35(5): 750–765(in Chinese with English abstract).
- Jiao Yangquan, Chen Anping, Wang Minfang, Wu Liqun, Yuan Haitao, Yang Qin, Zhang Chengze, Xu Zhicheng. 2005. Genetic analysis of the bottom sandstone of Zhiluo Formation, northeastern Ordos Basin: Predictive base of spatial orientation of sandstone–type uranium deposit[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 23(3): 371–379 (in Chinese with English abstract).
- Jiao Yangquan, Wu Liqun, Pang Yunbiao, Rong Hui, Ji Dongmin, Miao Aisheng, Li Hongliang. 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 Ruoshi, Feng Xiaoxi, Teng Xueming, Nie Fengjun, Cao Haiyang, Hou Huiqun, Liu Hongxu, Miao Peisen, Zhao Hualei, Chen Lulu, Zhu Qiang, Zhou Xiaoxi. 2020. Genesis of green sandstone/mudstone from middle Jurassic Zhiluo Formation in the Dongsheng uranium orefield, Ordos basin and its enlightenment for uranium mineralization[J]. China Geology, 3(1): 52–64.
- Lei Kaiyu, Liu Chiyang, Zhang Long, Wu Bollin, Wang Jianqiang, Cun Xiaoni, Sun Li. 2017. Detrital zircon u–pb dating of Middle–Late Mesozoic strata in the northern Ordos basin: Implication for tracing sediment sources[J]. Acta Geological Sinica, 91(7): 1522–1541(in Chinese with English abstract).
- Li Hongyan, Xu Yigang, Huang Xiaolong, He Bin, Luo Zhenyu, Yan Bin. 2009. Activation of northern margin of the North China Craton in Late Paleozoic: Evidence from U–Pb dating and Hf isotopes of detrital zircons from the Upper Carboniferous Taiyuan Formation in the Ningwu–Jingle basin[J]. Chinese Science Bulletin, 54(5): 632–640(in Chinese with English abstract).
- Li Xiangbo, Liu Huaqing, Wan Yanrong, Feng Ming, Wei Lihua. 2012. Tectonic properties and post–reformation in Late Triassic, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 34(4): 376–394(in Chinese with English abstract).
- Li Yanxing, Zhang Ji nghua, Guo Liangqian, Zhang Zhongfu, Zhang Junqing. 2005. Counter clock wise rotation and geodynamics of Ordos block[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 25(3): 50–56(in Chinese with English abstract).
- Li Zhenhong, Dong Shuwen, Feng Shengbin, Qu Hongjie. 2015.

- Sedimentary response to Middle– Late Jurassic tectonic events in the Ordos Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(1): 22– 30(in Chinese with English abstract).
- Li Ziying, Chen Anping, Fang Xiheng, Ou Guangxi, Zhang Ke, Jiao Yangquan, Xia Yuliang, Chen Fanzhen, Zhou Wenbin, Liu Zhonghou, Wu Regui, XiaoXinjian, Sun Ye. 2006. Metallogenic mechanism and superposition metallogenic model of the sandstone type uranium deposits in northeastern Ordos Basin[J]. *Mineral Deposits*, 25(Z2): 245–248(in Chinese with English abstract).
- Liang Ziruo, Hou Mingcai, Cao Haiyang, Chao Hui. 2020. Elemental geochemistry characteristics of Jurassic and indication of sedimentary environment of Shiguai Basin, Daqingshan, Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 47(3): 307–317(in Chinese with English abstract).
- Liu Lu, Peng Yunbiao, Dai Mingjian. 2018. Forming conditions of interlayer oxidation zone and uranium mineralization in northeastern Ordos basin[J]. *World Nuclear Geoscience*, 35(1): 16–23(in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaoxue, Tang Chao, Sima Xianzhang, Zhu Qiang, Li Guangyao. 2016. Major elements geochemical characteristics of sandstone–type uranium deposit in north–east Ordos basin and its geological implications[J]. *Geological Survey and Research*, 39(3): 169–183 (in Chinese with English abstract).
- Lu Lu, Chen Shuguang, Li Zhuangfu, Qing Yong, Qu Zhenghui, Shen Yulin. 2022. Sedimentary evolution and petroleum potential of Cretaceous to Paleogene in Linhe depression, Hetao Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 22(2): 308–331(in Chinese with English abstract).
- Ma Xinhua, Xing Lisheng, Yang Zhenyu, Xu Shujin, Zhang Jingxin. 1993. Paleomagnetic study since Late Paleozoic in the Ordos Basin[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 36(1): 68–79(in Chinese with English abstract).
- Pawan K R, Angana C, Narage P, Santamu B. 2022. Tracking sources and paleotectonic settings of Mesozoic sandstones in interlinked rift basins of western India: An integrated approach using petrography and heavy mineral chemistry[J]. *Journal of Palaeogeography*, 11(2): 173–193.
- Peng Shenglong, Tian Jiapeng, Guo Xiaoyu, Jin Yunpeng, Sun Bo, Dou Hongxin, Zhang Fan, Hao Jing, Hu Yinglian, Chen Lin, Xu Wei, Tong Ye. 2023. Characteristics and metallogenesis of ore–bearing sandstone in the Tarangole sandstone type uranium deposit, Ordos Basin[J]. *Geology in China*, 50(1): 264–276(in Chinese with English abstract).
- Qu Hongjun, Han Xing, Chen Shuo, Yang Bo, Du Meiyang, Dong Yangyang, Zhao Chong. 2020. U–Pb dating of detrital zircon from the Upper Paleozoic clastic rocks and basin–mountain coupling of the northeastern Ordos Basin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(3): 501–527(in Chinese with English abstract).
- Roser B P, Korsch R J. 1986. Determination of tectonic setting of sandstone– mudstone suites using SiO<sub>2</sub> content and K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O ratio[J]. *The Journal of Geology*, 94(5): 635–650.
- Si Qinghong, Yu Reng'an, Cai Hongguang, Wang Shangbo, Wang Daohua, Zhang Chao, Zhu Qiang. 2021. Element geochemical characteristics and geological significance of sandstones of Zhiluo formation in uranium– bearing strata in Naimadai area, Ordos basin[J]. *North China Geology*, 44(2): 49–57(in Chinese with English abstract).
- Vanesa B, Gonzalo R, Inés A, Rodrigo J S, Miguel E R, Maximiliano N, Christian S, Matías C G. 2019. Tectonic evolution of the northern Austral– Magallanes basin in the Southern Patagonian Andes from provenance analysis[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 95: 1–17.
- Wang Jinping, Min Maozhong, Chen Yuehui, Peng Xinjian. 2005. Study on the relationship between SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratios and ore–bearing capacity in interstratified oxidized zone: Exemplified by Kujieertai and Wukuerqi uranium deposits[J]. *Geological Journal of China Universities*, 11(1): 77–84(in Chinese with English abstract).
- Wang K S, Shi X F, Yao Z Q, Aleksandr A B, Hu L M. 2022. Sediment sources and transport pathways on shelves of the Chukchi and East Siberian Seas: Evidence from the heavy minerals and garnet geochemistry[J]. *Polar Science*, 100873: 1–12.
- Wang Sili, Nie Fengjun, Yan Zhaobin, He Naishuo, Zhang Yuanyuan, Zhang Pengfei. 2018. Lithologic characteristics and modes of occurrence of uranium of the target strata in the Nalinggou uranium deposit of Ordos Basin[J]. *Geology in China*, 45(3): 573–590(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhengjiang, Zhang Jinquan, Chen Hongde. 2001. Study of the dispositional provenance of the terrigenous detritus in Ordos basin in Late Paleozoic Era[J]. *Journal of Chengdu university of technology*, 28(1): 7–12(in Chinese with English abstract).
- Xie Huili, Wu Liqun, Jiao Yangquan, Rong Hui, Wang Hongqiang. 2016. The quantitative evaluation index system for uranium reservoir heterogeneity in Hantaimiao region, Ordos Basin[J]. *Earth Science*, 41(2): 279–292(in Chinese with English abstract).
- Yang Dexiang, Qu Zhenghui, Chen Shuguang, Li Zhuangfu, Wu Jianping, Wang Jianguang, Wu Han. 2020. Determination of Mesozoic tectostratigraphic units and its significance in Jilantai Sag, Hetao Basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 26(6): 691–703(in Chinese with English abstract).
- Yi Chao, Gao Hwei, Li Xide, Zhang Kang, Chen Xinlu, Li Jingxian. 2015. Study on indicative significance of major elements for sandstone– type uranium deposit in Zhiluo Formation in



- northeastern Ordos Basin[J]. Mineral Deposits, 34(4): 801–813(in Chinese with English abstract).
- Yi Chao, Han Xiaozhong, Li Xide, Zhang Kang, Chen Xinlu. 2014. Study on sandstone petrologic feature of the Zhiluo Formation and its controls on uranium mineralization in Northeastern Ordos Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 20(2): 185–197 (in Chinese with English abstract).
- Yu Reng'an, Zhu Qiang, Wen Sibao, Tu Jiarun, Peng Shenglong, Si Qinghong, Tang Yongxiang. 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).
- Zeh A, Cabral A R. 2021. Combining detrital zircon shape and U–Pb–Hf isotope analyses for provenance studies—An example from the Aquiri region, Amazon Craton, Brazil[J]. Precambrian Research, 364: 1–17.
- Zhang Bin, Liu Hongxu, Ding Bo, Yi Chao, Zhang Yan. 2020. Petrological and mineralogical characteristics of Nalinggou uranium deposit in Ordos Basin and its indicative significance for uranium mineralization[J]. Geological Review, 66(2): 410–423(in Chinese with English abstract).
- Zhang Bin, Liu Hongxu, Yi Chao, Ding Bo, Zhang Yan. 2020. Petrogeochemical characteristics and provenance indication of the sandstone from lower submember lower Member of Zhiluo Formation in Nalinggou Area Northern Ordos Basin[J]. Uranium Geology, 36(2): 84–95(in Chinese with English abstract).
- Zhang Daofeng, Yang Wenjing, Qi Yaling, Yan Xiaoxiong. 2009. Analysis of the material source of Upper Paleozoic Shanxi Formation in Shenmu region of Ordos basin[J]. Natural Gas Geoscience, 20(9): 902–906(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hong, Jin Xianglan, Li Guihong, Yang Zhiyuan, Zhang Hui, Jia Jiancheng. 2008. Original features and palaeogeographic evolution during the Jurassic–Cretaceous in Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 10(1): 1–11(in Chinese with English abstract).
- Zhang Long, Wu Bailin, Liu Chiyang, Lei Kaiyu, Hou Huiqun, Sun Li, Cun Xiaoni, Wang Jianqiang. 2016. Provenance analysis of the Zhiluo Formation in the sandstone hosted uranium deposits of the Northern Ordos basin and implications for uranium mineralization[J]. Acta Geologica Sinica, 90(12): 3441–3453(in Chinese with English abstract).
- Zhang Tianfu, Zhang Yun, Cheng Xianyu, Sun Lixin, Cheng Yinhang, Zhou Xiaoxi, Wang Shaoyi, Ma Hailin, Lu Chao. 2020. Borehole databases and 3D geological model of Jurassic–Cretaceous strata in Dongsheng Area, North Ordos Basin[J]. Geology in China, 47(S1): 220–230(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuanyuan, Zhang Pengfei, Nie Fengjun, Yan Pengbing, Zhang Zhibo, Yan Zhaobin, Zhang Xin. 2021. Distribution characteristics of heavy minerals in the sandstone of Zhiluo Formation of northern Ordos Basin and its implication[J]. Coal Geology & Exploration, 49(4): 142–152.
- Zhang Yun, Zhang Tianfu, Cheng Xianyu, Sun Lixin, Cheng Yinhang, Wang Shaoyi, Wang Shanbo, Ma Hailin, Lu Chao. 2022. A brief analysis on the three-dimensional geological structure and uranium mineralization of Jurassic uranium-bearing rock series in the northeastern Ordos Basin[J]. Geology in China, 49(1): 66–80 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuqing, Zhang Ting, Chen Haidong, Zhang Yongqing. 2016. LA–MC–ICP–MS zircon U–Pb dating of garnet monzonitic granite in the Manhan Mountain of Liangcheng, Inner Mongolia, and its petrogenesis[J]. Geology in China, 43(3): 768–779(in Chinese with English abstract).
- Zhao Junfeng, Liu Chiyang, Liang Jiwei, Wang Xiaomei, Yu Lin, Huang Lei, Liu Yongtao. 2010. Restoration of the original sedimentary boundary of the Middle Jurassic Zhiluo Formation–Anding Formation in the Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 84(4): 553–569(in Chinese with English abstract).
- Zhao Junfeng, Liu Chiyang, Zhao Jianshe, Wang Xiaomei. 2008. Sedimentary facies and its evolution of Jurassic Zhiluo Formation in Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science edition), 38(3): 480–486(in Chinese with English abstract).
- Zhong Yan, Chen Yali, Zhai Mingguo, Ma Xudong. 2016. Stratigraphic correlation and lithofacies paleogeography of khondalite series in the western North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 32(3): 713–726(in Chinese with English abstract).
- Zhou Ke. 2014. Application of the characteristics of major elements and trace elements in provenance analysis[J]. Liaoning Chemical Industry, 43(4): 515–520(in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 包洪平, 邵东波, 郝松立, 章贵松, 阮正中, 刘刚, 欧阳征健. 2019. 鄂尔多斯盆地基底结构及早期沉积层演化[J]. 地学前缘, 26(1): 33–43.
- 陈海东, 王子龙, 鲁宁, 银海, 何国强. 2016. 内蒙古中部和林—凉城一带石榴花岗岩 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄及构造意义[J]. 中国地质, 43(1): 81–90.
- 陈印, 冯晓曦, 陈路路, 金若时, 苗培森, 司马献章, 苗爱生, 汤超, 王贵, 刘忠仁. 2017. 鄂尔多斯盆地东北部直罗组内碎屑锆石和铀矿物赋存形式简析及其对铀源的指示[J]. 中国地质, 44(6): 1190–1206.
- 陈祖伊, 陈戴生, 古抗衡. 2010. 中国铀矿床研究评价第三卷砂岩型铀矿[M]. 北京: 中国核工业地质局, 1–360.
- 程先钰, 张天福, 程银行, 王少轶, 田健. 2021. 鄂尔多斯盆地北缘塔然高勒地区直罗组古沉积环境演化——来自地球化学特征的证据[J]. 华北地质, 44(2): 1–3.
- 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.
- 冯晓曦, 滕雪明, 何友宇. 2019. 初步探讨鄂尔多斯盆地东胜铀矿田成矿作用研究若干问题[J]. 地质调查与研究, 42(2): 96-108.
- 付星辉, 赵红格, 周义军, 彭治超, 蒋盛, 张孙玄琦, 王海然, 李亚男. 2016. 内蒙古狼山地区侏罗系 LA-ICP-MS 碎屑锆石 U-Pb 定年及其物源意义[J]. 地质通报, 35(12): 2063-2075.
- 葛玉辉, 郝爱华, 汪志刚, 王玉芬, 孙春林. 2010. 内蒙古大青山地区中侏罗世古气候分析[J]. 中国地质, 37(1): 204-211.
- 韩会平, 武春英, 白清华, 陈鹏, 刘新社, 秦百平. 2014. 鄂尔多斯盆地乌审旗地区上古生界砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 沉积学报, 32(4): 643-653.
- 侯明才, 江文剑, 倪师军, 黄虎, 罗文, 石鑫, 缪宗利. 2016. 伊犁盆地南缘中下侏罗统碎屑岩地球化学特征及对物源制约[J]. 地质学报, 90(12): 337-3351.
- 蒋孝君, 徐仲元, 刘正宏, 薛伟, 剡鹏兵, 邢亚杰. 2016. 内蒙古中部红格图地区花岗岩的成因及构造背景——LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学的制约[J]. 地质通报, 35(5): 750-765.
- 焦养泉, 陈安平, 王敏芳, 吴立群, 原海涛, 杨琴, 张承泽, 徐志诚. 2005. 鄂尔多斯盆地东北部直罗组底部砂体成因分析——砂岩型铀矿床预测的空间定位基础[J]. 沉积学报, 23(3): 371-379.
- 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.
- 雷开宇, 刘池洋, 张龙, 吴柏林, 王建强, 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.
- 李洪颜, 徐义刚, 黄小龙, 何斌, 罗震宇, 燕滨. 2009. 华北克拉通北缘晚古生代活化: 山西安武-静乐盆地上石炭统太原组碎屑锆石 U-Pb 测年及 Hf 同位素证据[J]. 科学通报, 54(5): 632-640.
- 李相博, 刘化清, 完颜容, 冯明, 魏立花. 2012. 鄂尔多斯晚三叠世盆地构造属性及后期改造[J]. 石油实验地质, 34(4): 376-394.
- 李延兴, 张静华, 郭良迁, 张中伏, 张俊青. 2005. 鄂尔多斯的逆时针旋转与动力学[J]. 大地测量与旋转动力学, 25(3): 50-56.
- 李振宏, 董树文, 冯胜斌, 渠洪杰. 2015. 鄂尔多斯盆地中一晚侏罗世构造事件的沉积响应[J]. 地球学报, 36(1): 22-30.
- 李子颖, 陈安平, 方锡珩, 欧光习, 张珂, 焦养泉, 夏毓亮, 陈法正, 周文斌, 刘忠厚, 吴仁贵, 肖新建, 孙晔. 2006. 鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿成矿机理和叠合成矿模式[J]. 矿床地质, 25(Z2): 245-248.
- 梁子若, 侯明才, 曹海洋, 晁晖. 2020. 内蒙古大青山石拐盆地侏罗系元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 47(3): 307-317.
- 刘璐, 彭云彪, 戴明建. 2018. 鄂尔多斯盆地东北部区域大规模叠合氧化形成条件与铀成矿作用[J]. 世界核地质科学, 35(1): 16-23.
- 刘晓雪, 汤超, 司马献章, 朱强, 李光耀, 陈印, 陈路路. 2016. 鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿常量元素地球化学特征及地质意义[J]. 地质调查与研究, 39(3): 169-183.
- 陆鹿, 陈树光, 李壮福, 秦勇, 屈争辉, 沈玉林. 2022. 河套盆地临河坳陷白垩纪—古近纪沉积环境演化及油气地质意义[J]. 古地理学报, 22(2): 308-331.
- 马醒华, 邢历生, 杨振宇, 徐树金, 张景鑫. 1993. 鄂尔多斯盆地晚古生代以来古地磁研究[J]. 地球物理学报, 36(1): 68-79.
- 彭胜龙, 田家鹏, 郭晓宇, 靳云鹏, 孙波, 窦洪鑫, 张帆, 郝静, 胡英莲, 陈琳, 许伟, 佟野. 2023. 鄂尔多斯盆地塔然高勒地区砂岩型铀矿含矿层砂岩特征及成矿作用[J]. 中国地质, 50(1): 264-276.
- 屈红军, 韩星, 陈硕, 杨博, 杜美迎, 董阳阳, 赵冲. 2020. 鄂尔多斯盆地东北部上古生界碎屑锆石测年及盆山耦合探讨[J]. 大地构造与成矿学, 44(3): 501-527.
- 司庆红, 俞初安, 蔡洪广, 王善博, 王道华, 张超, 朱强. 2021. 鄂尔多斯盆地乃马岱地区直罗组砂岩元素地球化学特征及其地质意义[J]. 华北地质, 44(2): 49-57.
- 王金平, 闵茂中, 陈跃辉, 彭新建. 2005. 砂岩型铀矿床中 SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 比值与含矿性的关系研究: 以库捷尔太和乌库尔其铀矿床为例[J]. 高校地质学报, 11(1): 77-84.
- 王思力, 聂逢君, 严兆彬, 何乃烁, 张媛媛, 张鹏飞. 2018. 鄂尔多斯盆地纳岭沟铀矿床目的层岩石学及铀存在形式[J]. 中国地质, 45(3): 573-590.
- 汪正江, 张锦泉, 陈洪德. 2001. 鄂尔多斯盆地晚古生代陆源碎屑沉积源区分析[J]. 成都理工学院学报, 28(1): 7-12.
- 谢惠丽, 吴立群, 焦养泉, 荣辉, 汪洪强. 2016. 鄂尔多斯盆地罕台庙地区铀储层非均质性定量评价指标体系[J]. 地球科学, 41(2): 279-292.
- 杨德相, 屈争辉, 陈树光, 李壮福, 吴健平, 王建广, 武函. 2020. 河套盆地吉兰泰凹陷中生代构造层划分及意义[J]. 高校地质学报, 26(6): 691-703.
- 易超, 韩效忠, 李西得, 张康, 陈心路. 2014. 鄂尔多斯盆地东北部直罗组砂岩岩石学特征与铀矿化关系研究[J]. 高校地质学报, 20(2): 185-197.
- 易超, 高贺伟, 李西得, 张康, 陈心路, 李静贤. 2015. 鄂尔多斯盆地东北部直罗组砂岩型铀矿床常量元素指示意义探讨[J]. 矿床地质, 34(4): 801-813.
- 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.
- 张宾, 刘红旭, 丁波, 易超, 张艳. 2020a. 鄂尔多斯盆地纳岭沟铀矿床岩石学、矿物学特征及其对铀成矿作用的指示意义[J]. 地质论评, 66(2): 410-423.
- 张宾, 刘红旭, 易超, 丁波, 张艳. 2020b. 鄂尔多斯盆地北部纳岭沟地区直罗组下段下亚段砂岩岩石地球化学特征及对物源的指示[J]. 铀矿地质, 36(2): 84-95.
- 张道锋, 杨文敬, 漆亚玲, 闫小雄. 2009. 鄂尔多斯盆地神木地区上古生界山西组物源分析[J]. 天然气地球科学, 20(9): 902-906.

- 张泓, 晋香兰, 李贵红, 杨志远, 张慧, 贾建称. 2008. 鄂尔多斯盆地侏罗纪-白垩纪原始面貌与古地理演化[J]. 古地理学报, 10(1): 1-11.
- 张龙, 吴柏林, 刘池洋, 雷开宇, 侯惠群, 孙莉, 寸小妮, 王建强. 2016. 鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿直罗组物源分析及其铀成矿意义[J]. 地质学报, 90(12): 3441-3453.
- 张天福, 张云, 程先钰, 孙立新, 程银行, 周小希, 王少轶, 马海林, 鲁超. 2020. 鄂尔多斯盆地北部东胜地区侏罗系-白垩系钻孔数据库与三维地质模型[J]. 中国地质, 47(S1): 220-230.
- 张媛媛, 张鹏飞, 聂逢君, 剡鹏兵, 张治波, 严兆彬, 张鑫. 2021. 鄂尔多斯盆地北部直罗组砂岩重矿物分布特征及其指示意义[J]. 煤田地质与勘探, 49(4): 142-152.
- 张云, 张天福, 程先钰, 孙立新, 程银行, 王少轶, 王善博, 马海林, 鲁超. 2022. 鄂尔多斯盆地东北部侏罗纪含铀岩系三维地质结构与铀成矿规律浅析[J]. 中国地质, 49(1): 66-80.
- 张玉清, 张婷, 陈海东, 张永清. 2016. 内蒙古凉城蛮汗山石榴石二长花岗岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及成因讨论[J]. 中国地质, 43(3): 769-779.
- 赵俊峰, 刘池洋, 梁积伟, 王晓梅, 喻林, 黄雷, 刘永涛. 2010. 鄂尔多斯盆地直罗组-安定组沉积期原始边界恢复[J]. 地质学报, 84(4): 553-569.
- 赵俊峰, 刘池洋, 赵建设, 王晓梅. 2008. 鄂尔多斯盆地侏罗系直罗组沉积相及其演化[J]. 西北大学学报(自然科学版), 38(3): 480-486.
- 钟焱, 陈雅丽, 翟明国, 马旭东. 2016. 华北克拉通西部古元古代孔兹岩系的地层对比、岩相古地理特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 32(3): 713-726.
- 周科. 2014. 常量元素与微量元素特征在物源分析中的应用[J]. 辽宁化工, 43(4): 515-520.