



引文格式: 孟繁敏, 聂逢君, 夏菲, 等. 海拉尔盆地克鲁伦凹陷伊敏组铀矿物赋存特征及铀成矿条件分析[J]. 西北地质, 2026, 59(3): 264–278. DOI: 10.12401/j.nwg.2025040

Citation: MENG Fanmin, NIE Fengjun, XIA Fei, et al. Analysis on the Occurrence Characteristics of Uranium Minerals and Mineralization Conditions in the Yimin Formation of Kelulun Depression, Hailar Basin[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(3): 264–278. DOI: 10.12401/j.nwg.2025040

## 海拉尔盆地克鲁伦凹陷伊敏组铀矿物赋存特征及 铀成矿条件分析

孟繁敏<sup>1</sup>, 聂逢君<sup>1,\*</sup>, 夏菲<sup>1</sup>, 严兆彬<sup>1</sup>, 孙达<sup>1</sup>, 周文博<sup>2</sup>, 张荣<sup>2</sup>, 王长虹<sup>2</sup>

(1. 东华理工大学地球科学学院, 江西南昌 330013; 2. 核工业二四三大队, 内蒙古赤峰 024000)

**摘要:** 克鲁伦凹陷砂岩型铀矿是海拉尔盆地中首次发现具有工业价值的铀矿床。为初步查明研究区铀矿物类型、赋存特征及其成矿意义等问题, 笔者基于野外调查基础上, 利用偏光显微镜结合电子探针微区分析方法, 对区内含矿目的层含矿砂岩进行系统研究。结果表明: 研究区铀矿化主要分布在伊敏组辫状河三角洲前缘, 含矿目的层岩石类型主要以中-细粒长石岩屑砂岩为主, 整体发育一系列后生蚀变。矿石中铀矿物主要为铀石, 其次含一定量的铀钛氧化物, 铀石以胶结状、星点状形式分布于黄铁矿晶内或周围, 其次少数以不规则粒状充填于碎屑颗粒边缘、裂隙或溶蚀凹坑内。铀钛氧化物多呈不规则粒状分布于黑云母解理缝中。铀石和铀钛氧化物作为区内首次揭露的独立铀矿物, 总体填补了海拉尔盆地无独立铀矿物的空白。铀成矿机理方面, 研究区西侧富铀花岗岩和中酸性火山岩为区内铀矿化提供了充足的铀源, 在区内油气、有机碳及硫化物等还原性介质作用下, 将成矿流体中  $U^{6+}$  还原成  $U^{4+}$  并以铀石和铀钛氧化物形式沉淀成矿。

**关键词:** 砂岩型铀矿; 铀石; 铀钛氧化物; 伊敏组; 克鲁伦凹陷

中图分类号: P619.14

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)03-0264-15

### Analysis on the Occurrence Characteristics of Uranium Minerals and Mineralization Conditions in the Yimin Formation of Kelulun Depression, Hailar Basin

MENG Fanmin<sup>1</sup>, NIE Fengjun<sup>1,\*</sup>, XIA Fei<sup>1</sup>, YAN Zhaobin<sup>1</sup>, SUN Da<sup>1</sup>, ZHOU Wenbo<sup>2</sup>,  
ZHANG Rong<sup>2</sup>, WANG Changhong<sup>2</sup>

(1. College of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China;

2. Geological Party No. 243, CNNC, Chifeng 024000, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** The sandstone-type uranium deposit in the Kelulun Depression is the first industrial uranium deposit

收稿日期: 2023-04-20; 修回日期: 2025-01-12; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目 (U2244205、U2067202), 核技术研发科研项目 (202411GFKGJHJSYF01) 联合资助。

作者简介: 孟繁敏 (1995–), 男, 博士研究生, 主要从事砂岩型铀矿相关研究。E-mail: 1967984228@qq.com。

\* 通讯作者: 聂逢君 (1962–), 男, 教授, 博士后, 长期从事砂岩型铀矿相关研究。E-mail: niefj@263.net。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

discovered in the Hailar Basin. In order to preliminarily identify the types, occurrence characteristics, and mineralization significance of uranium minerals in the study area, this paper conducts a systematic study of the ore-bearing sandstone in the target layer by using polarized light microscopy combined with electron probe analysis on the basis of a field investigation. The results show that uranium mineralization in the study area occurs at the front edge of the braided river delta of the Yimin Formation. The rock type of the ore-bearing target layer is mainly medium-fine-grained feldspathic litharenite, with the overall development post-generation alteration. Uranium minerals are mainly coffinite, followed by uranium-titanium oxide. Coffinite is mainly distributed in colloidal or stellate forms in or around pyrite, and a few are filled in the edges of debris particles or dissolution pits in irregular granular form. Uranium-titanium oxides are mostly distributed in irregular granular forms in the biotite cleavage cracks. The coffinite and uranium-titanium oxide, as the first discovered independent uranium minerals in the study area, fill the gap left by the absence of uranium minerals in the Hailar Basin. In terms of uranium mineralization conditions, the Permian granite and intermediate-acidic volcanic rocks in the west of the study area provide sufficient uranium sources for the sandstone-type uranium mineralization in the area. Under the action of reducing media such as oil and gas, organic carbon, and sulfides in the area,  $U^{6+}$  in the ore-forming fluid is reduced to  $U^{4+}$  and precipitated into mineralization in the form of coffinite and uranium-titanium oxide.

**Keywords:** sandstone-type uranium deposit; coffinite; U-Ti oxide; Yimin Formation; Kelulun Depression

砂岩型铀矿因其规模大、埋藏浅、开采成本低和绿色环保等优点,已成为当今国内外铀矿找矿领域的主攻方向(Hall et al., 2017; Cheng et al., 2019; Zhang et al., 2022)。近年来,中国在伊犁盆地、准噶尔盆地、鄂尔多斯盆地、松辽盆地和二连盆地等地发现了一系列大型、超大型砂岩型铀矿床(聂逢君等, 2015, 2021, 2022; Han et al., 2018; Jin et al., 2019; 彭云彪等, 2019; Zhu et al., 2019; Zhang et al., 2019; Rong et al., 2021; Lu et al., 2021; Rallakis et al., 2021; 焦养泉等, 2021; 刘坤鹏等, 2024; 何泽宇等, 2025; 赖天功等, 2025)。与此同时,随着找矿勘探的不断深入,首次在海拉尔盆地白垩系地层中发现存在一定规模的砂岩型铀矿化。

海拉尔盆地坐落于内蒙古东北部,盆地内富含煤、石油、天然气等多种矿产能源(Fu et al., 2013; 郭彪等, 2014)。此外,近年在盆地西南部的克鲁伦凹陷内新发现有多处铀矿点、矿化点,铀矿化主要分布于区内白垩系地层伊敏组中(黄少华等, 2021)。尽管前人对该地区砂岩型铀矿开展了少量研究,主要集中于目的层厘定(黄少华等, 2020)、砂体特征(马汉峰等, 2011)、水文地质条件(张海阳等, 2021)、航空放射性测量(钟延秋等, 2010)及铀成矿前景分析(张志杰等, 2005; 周文博等, 2020)等方面。然而针对含矿目的层砂岩岩石学特征、铀矿物类型及赋存状态等方面目前鲜有报道。鉴于此,笔者在野外地质调研基础上,通过对克鲁伦凹陷进行野外钻孔编录、系统采样等工作,选

取代表性砂岩岩矿石样品,利用显微镜结合电子探针微区和元素面扫描分析,初步厘定目的层岩石类型、铀矿化特征,重点研究铀矿物类型、赋存状态及其分布规律,继而探讨区内铀矿化成因,以期进一步为海拉尔盆地克鲁伦凹陷砂岩型铀矿找矿提供重要的理论依据。

## 1 区域地质背景

海拉尔盆地位于中亚造山带东段,是发育于西伯利亚板块和华北板块之间的古生代碰撞造山带之上的中生代—新生代陆相裂谷盆地(余本善等, 2013; Guo et al., 2015; Dai et al., 2021; 刘恒麟等, 2022)。受NE向德尔布干和额尔古纳断裂带控制,经多期叠加变形作用,现形成“东西分带、南北分块”和“两隆三拗”构造格局(余本善等, 2013; 周文博等, 2020; 黄少华等, 2021; Roche et al., 2021; 赵德锋等, 2023)。

研究区克鲁伦凹陷位于海拉尔盆地西南部(图1a),整体呈NE向展布的狭长箕状断陷,具有“西断东超”特点(彭威等, 2006; 马艳玲, 2014; 黄少华等, 2020)。该凹陷西接塔尔巴格特隆起,东至汗乌拉凸起,北接呼伦湖凹陷,向南延伸至盆地边界(图1b)。区内基底从老到新依次出露前寒武纪、古元古界和侏罗纪。其中,前寒武纪中—深变质岩仅出露于凹陷北西缘,以残留体形式存在于晚华力西期花岗岩体中;古生代浅变质岩主要分布于凹陷北东缘;

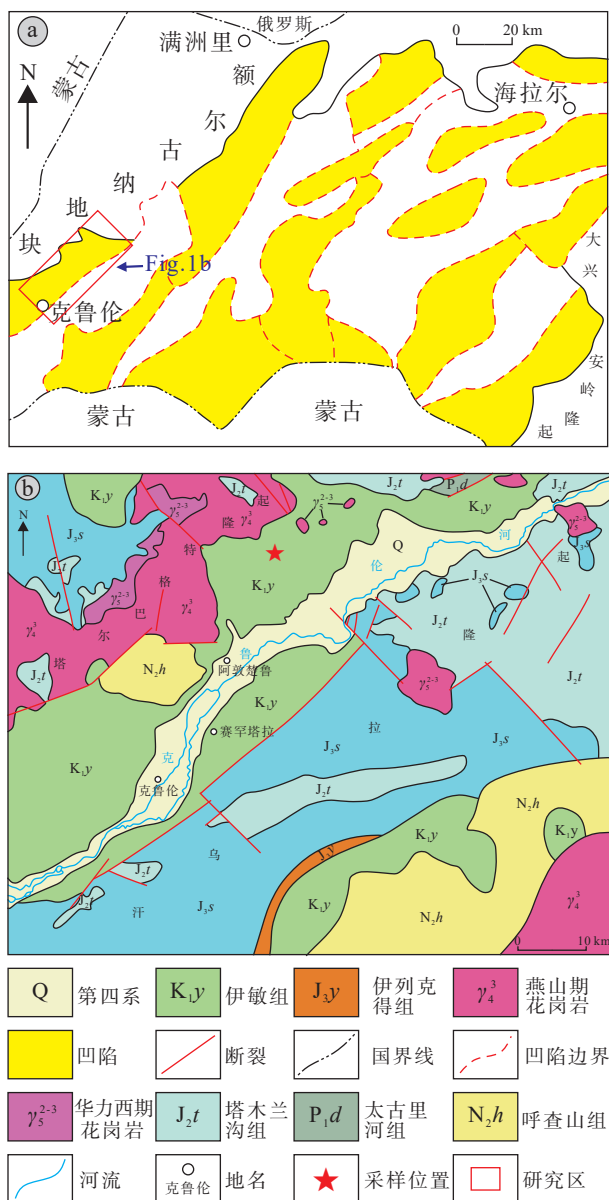


图1 海拉尔盆地构造单元划分(a; 据刘志宏等, 2012 修改)、克鲁伦凹陷区域地质图(b; 据黄少华等, 2021 修改)

Fig. 1 (a) Schematic diagram of tectonic unit division of Hailar basin, and (b) regional geological map of Kelulun depression

华力西期花岗岩多呈岩基和岩株形式分布在凹陷西北缘; 中侏罗纪主要发育塔木兰沟组安山岩, 不整合于中生代基底之上; 晚侏罗纪发育流纹岩、火山角砾岩和粗面岩等中酸性火山岩(陈崇阳等, 2016; 纪政, 2020; 贾进华等, 2021; 赵德锋等, 2023)。沉积盖层由老至新为白垩系的南屯组(K<sub>1</sub>t)、铜钵庙组(K<sub>1</sub>n)、大磨拐河组(K<sub>1</sub>d)和伊敏组(K<sub>1</sub>y); 新近纪呼查山组(N<sub>2</sub>h)及第四系(Q)。其中, 白垩系伊敏组是一套还原容量较高的暗色含煤碎屑岩沉积建造(张云鹤等, 2018; Guo et al., 2018; 周文博等, 2020), 岩性整体以含碳屑

和黄铁矿的灰色、黑色砂质砾岩为主, 局部夹黑色泥岩和褐黄色含砾中-细砂岩。伊敏组砂体具有埋藏浅、渗透性和连通性好以及泥-砂-泥结构稳定特点(黄少华等, 2021), 是克鲁伦凹陷砂岩型铀矿的含矿目的层。

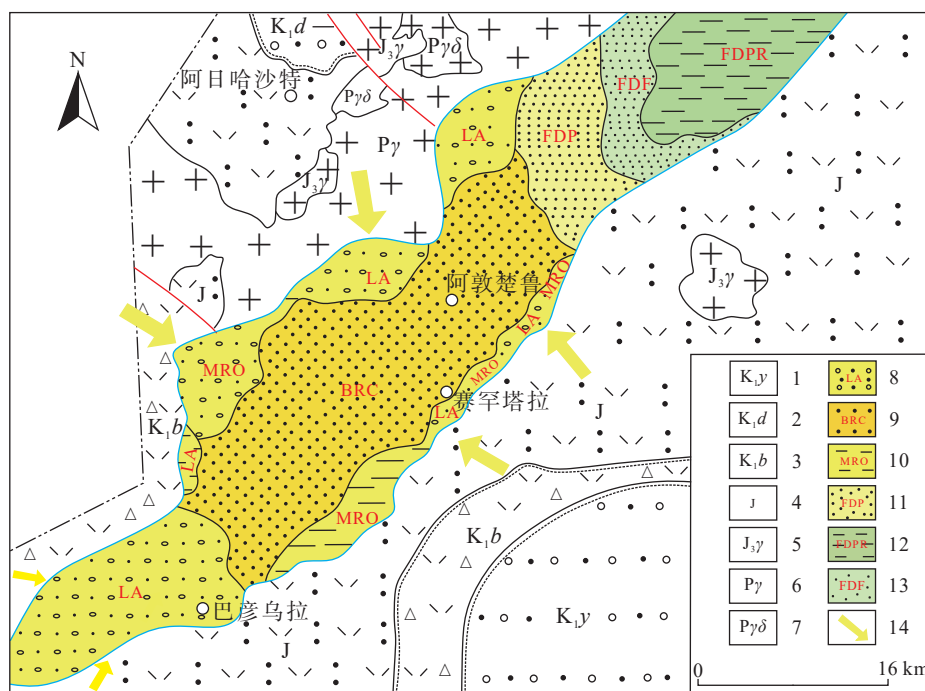
克鲁伦凹陷自形成以来经历了晚侏罗纪裂陷期、早白垩纪断陷期、早白垩纪晚期萎缩期和晚白垩纪—新近纪差异升降夷平期 4 个演化阶段(张科峰等, 2016; Song et al., 2019; 崔军平等, 2020; Zheng et al., 2021; Zhu et al., 2022; Jia et al., 2022)。在早白垩纪早、中期断陷沉积阶段, 研究区构造活动强烈, 形成 40 余条各类型断裂, 按断裂平面展布方向可划分成 NE 向、NNE 向和 NS 向 3 组断裂体系(张鲁庭, 2013)。其中, NE 向断裂体系与克鲁伦凹陷主体展布方向一致, 控制凹陷现今构造格局, 是区内主控断裂体系, 具有形成早、发育时间长等特点。该组断裂体系切穿侏罗系至第四系, 为区内含矿流体运移和深部油气等还原性物质上升提供通道。

## 2 沉积相特征

通过沉积构造、颜色、岩性组合及变化特征等对克鲁伦凹陷内 25 个钻孔进行综合分析, 可识别出研究区伊敏组主要有冲积扇相、辫状河相及三角洲相沉积, 进一步可细分为扇端亚相、辫状河河道亚相等 6 类沉积亚相(图 2)。区内冲积扇相发育不全, 扇根亚相及扇中亚相均被剥蚀殆尽, 仅剩余扇端亚相分布于凹陷南端和东西两侧蚀源区附近。岩性主要为砾岩、砂质砾岩, 砾石成分以花岗岩砾为主, 含少量凝灰质砾石, 砾石呈棱角-次棱角状, 砾径为 2~10 cm, 分选较差。辫状河相分布于凹陷中心, 可进一步分为辫状河河道亚相和辫状河河漫亚相, 并以辫状河河道亚相为主。岩性主要为灰色、褐黄色中-粗砂岩、砂质砾岩, 可见星点状褐铁矿化及炭屑。三角洲相分布于凹陷北侧, 可进一步细分为三角洲平原亚相、三角洲前缘亚相及前三角洲亚相。其中, 平原亚相发育灰色中砂岩、细砂岩, 岩石中见大量碳屑等有机质; 前三角洲亚相位于凹陷最北端, 岩性主要为灰色、深灰色泥岩、粉砂岩, 含大量碳屑。

克鲁伦凹陷白垩系伊敏组铀矿化形成于辫状河三角洲前缘中(图 3), 进一步可划分出水下分流河道、辫状河河道、席状砂以及分流河道间 4 个沉积微相。

(1) 辫状河河道: 岩性为砖红色、灰白色和褐黄色



LA. 冲积扇端亚相; BRC. 辫状河河道亚相; MRO. 河漫亚相; FDP. 三角洲平原亚相; FDPR. 前三角洲亚相; FDF. 三角洲前缘亚相;  
1. 伊敏组; 2. 大磨拐河组; 3. 白音高老组; 4. 侏罗系; 5. 晚侏罗系花岗岩; 6. 二叠系花岗岩; 7. 二叠系花岗岩闪长岩; 8. 砂质砾岩;  
9. 粗砂岩; 10. 红色泥岩; 11. 中砂岩; 12. 黑色泥岩; 13. 细砂岩; 14. 物源方向

图2 克鲁伦凹陷早白垩世岩性-岩相图

Fig. 2 Early Cretaceous lithologic facies map of Kelulun Depression

砂砾岩、中-粗砂岩,中间夹薄层状粉砂岩,颗粒分选较差,砾石呈棱角-次棱角状,主要为花岗岩砾,垂向上发育复合正韵律,反映出沉积时水动力由强到弱逐渐变化。

(2)席状砂:岩性为褐黄、砖红和灰绿色中-细砂岩、粉砂质泥岩互层,垂向上呈反韵律,指示沉积时波浪作用较强。

(3)水下分流河道:岩性为褐黄、褐红、灰色砂砾岩、粗砂岩,局部夹杂薄层状泥岩,分选磨圆差,砾石主要为花岗岩砾和石英砾,垂向上发育复合正韵律,底部见平行层理。水下分流河道测井曲线以箱形和锯齿状为主,顶部呈突变接触关系,指示物源供给的间歇性。

(4)分流河道间:岩性为褐红色、灰绿色中-细砂岩和黑色泥岩。其中含砾中砂岩含大量碳屑,局部夹杂约 30 cm 的碳质纹层;细砂岩中含大量碳屑,中部发育有约 1.5 m 的煤层,见少量团块状黄铁矿结核,是区内主要含铀部位。

### 3 岩石学特征

伊敏组( $K_1y$ )是克鲁伦凹陷的主要含矿目的层。

笔者共选取克鲁伦凹陷 10 个钻孔进行取样,并磨制 21 个普通薄片和 10 个探针片来研究伊敏组砂岩的岩石学特征。普通薄片和电子探针片磨制均由廊坊市地科勘探技术服务有限公司完成。室内显微岩石学观察及碎屑颗粒成分统计在东华理工大学基础地质实验室完成,显微镜仪器型号为蔡司 Axiolmager. M2m。通过偏光显微镜对 21 件薄片进行镜下鉴定及碎屑成分统计(表 1),意在查明研究区内伊敏组的岩石组成、结构以及蚀变特征。为了减少碎屑颗粒成分统计时的误差,选取的砂岩样品具有以下特征:砂岩样品的粒径在中-粗粒(0.062 5~2 mm)之间;统计时正方网格交点法在每个薄片中选取不少于 300 个点,统计的样品杂基含量小于 25%。将统计的 21 件砂岩样品中碎屑颗粒含量在 Folk(1968)分类图解上进行投图。目的层砂岩绝大多数落在 VI 区,少量落在 VII 和 V 区(图 4),说明克鲁伦凹陷含矿目的层砂岩主要以长石岩屑砂岩为主,次为岩屑砂岩和岩屑长石砂岩。

伊敏组砂岩整体具中-细粒砂状结构(图 5a),块状构造。碎屑颗粒主要由石英、长石、岩屑及少量黑云母组成,重矿物见锆石及磷灰石、黄铁矿和磁铁矿。碎屑颗粒支撑类型以颗粒支撑为主,颗粒间以基底式

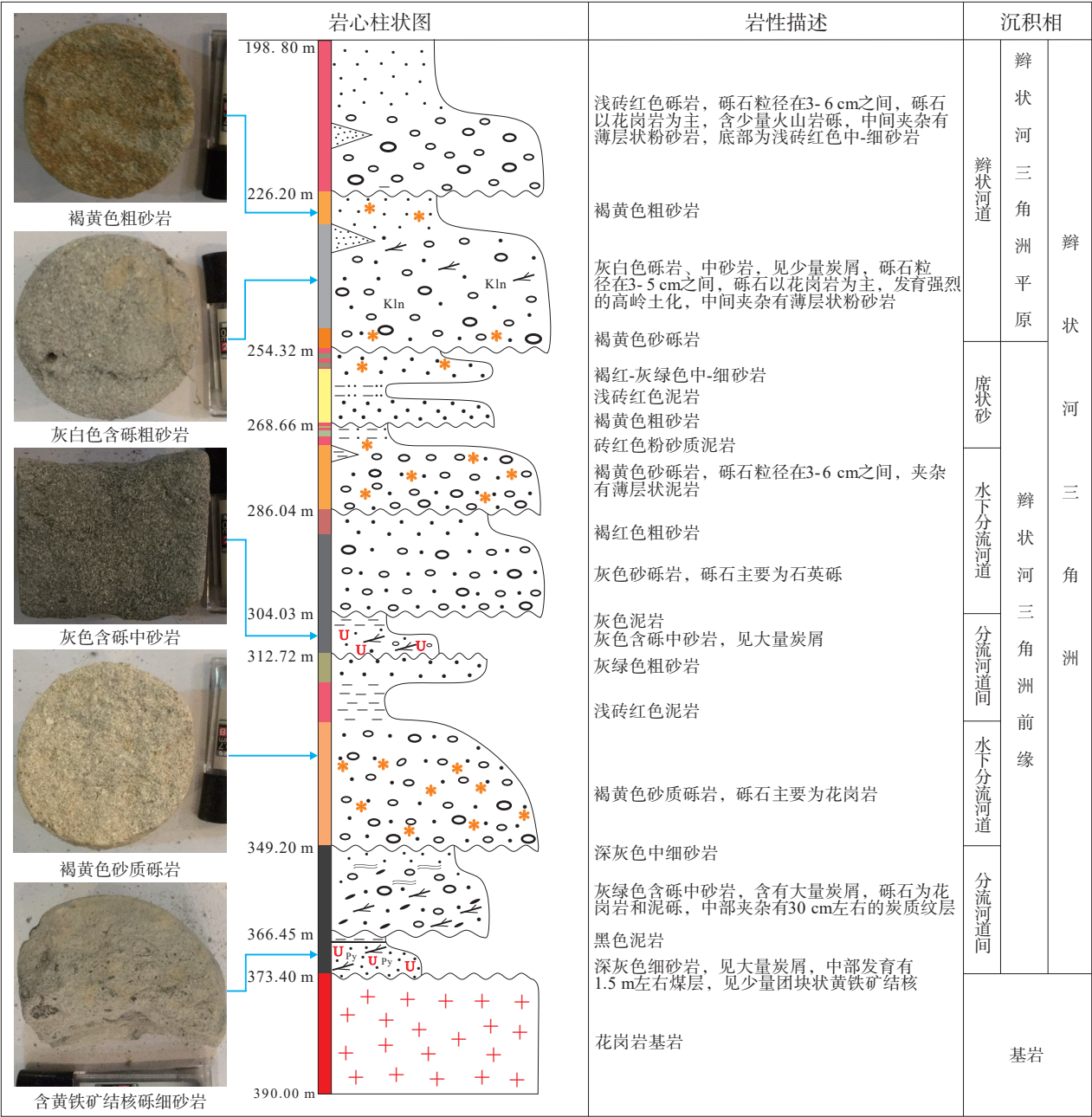


图3 XXX-1 钻孔素描图

Fig. 3 XXX-1 Drill hole sketch

—孔隙式胶结为主，胶结物以钙质胶结为主(图 5b)，局部为泥质胶结。碎屑占全岩含量的 85%~90%，填隙物占全岩含量的 10%~15%。岩石整体分选磨圆差，成分成熟度及结构成熟度低，反映出沉积物搬运距离较近，具有近源堆积特点。碎屑石英呈棱角—次棱角状，粒径为 0.13~0.50 mm，少数石英发育后期重结晶作用明显，具波状消光。个别石英颗粒间呈线接触，偶见石英内部包裹有细柱状磷灰石和云母等细小颗粒，石英占碎屑含量的 35%~55%。长石呈棱角—次棱

角状，粒径为 0.11~0.46 mm，由斜长石、钾长石、微斜长石和条纹长石组成。其中，斜长石发育聚片双晶，黏土化和绢云母化较强，钾长石见卡式双晶发育，黏土化强烈，微斜长石发育格子状双晶(图 5c)，个别微斜长石内部包裹有蚀变黑云母，条纹长石发育条纹结构，黏土化强烈，长石占碎屑含量的 10%~25%。岩屑呈棱角—次棱角状，粒径为 0.12~0.53 mm，个别粒径大于 2.00 mm，主要为花岗岩岩屑(图 5d)，少量为安山岩岩屑(图 5e)、晶屑凝灰岩岩屑(图 5f)及石英岩岩屑，

表 1 伊敏组砂岩骨架矿物成分统计表(%)

Tab. 1 Statistical table of skeleton mineral composition of the Yimin Formation sandstone (%)

| 样品编号    | 粒径 (mm)   | Qm | Qp | Q  | F  | L  | Lt |
|---------|-----------|----|----|----|----|----|----|
| 21HL001 | 0.14~0.22 | 35 | 13 | 48 | 19 | 33 | 46 |
| 21HL002 | 0.12~0.40 | 45 | 5  | 50 | 15 | 35 | 40 |
| 21HL003 | 0.10~0.40 | 35 | 7  | 42 | 20 | 38 | 45 |
| 21HL004 | 0.14~0.45 | 33 | 9  | 42 | 23 | 35 | 44 |
| 21HL005 | 0.15~0.51 | 40 | 5  | 45 | 25 | 30 | 35 |
| 21HL006 | 0.16~0.32 | 37 | 8  | 45 | 20 | 25 | 33 |
| 21HL007 | 0.15~0.37 | 39 | 11 | 50 | 20 | 30 | 31 |
| 21HL008 | 0.13~0.25 | 30 | 5  | 35 | 15 | 50 | 55 |
| 21HL009 | 0.20~0.50 | 31 | 8  | 39 | 25 | 36 | 44 |
| 21HL010 | 0.25~0.43 | 40 | 10 | 50 | 25 | 20 | 30 |
| 21HL011 | 0.05~0.20 | 26 | 12 | 38 | 14 | 48 | 60 |
| 21HL012 | 0.15~0.49 | 35 | 5  | 40 | 25 | 35 | 40 |
| 21HL013 | 0.17~0.30 | 29 | 11 | 40 | 17 | 43 | 54 |
| 21HL014 | 0.10~0.30 | 30 | 16 | 46 | 15 | 39 | 55 |
| 21HL015 | 0.15~0.50 | 20 | 5  | 35 | 15 | 50 | 55 |
| 21HL016 | 0.25~0.45 | 33 | 5  | 38 | 20 | 32 | 37 |
| 21HL017 | 0.35~0.49 | 35 | 10 | 45 | 10 | 35 | 45 |
| 21HL018 | 0.45~0.48 | 40 | 12 | 52 | 15 | 38 | 50 |
| 21HL019 | 0.25~0.50 | 35 | 20 | 55 | 13 | 32 | 52 |
| 21HL020 | 0.10~0.45 | 40 | 10 | 50 | 12 | 38 | 48 |
| 21HL021 | 0.20~0.44 | 45 | 10 | 55 | 20 | 25 | 35 |

注: Qm. 单晶石英; Qp. 多晶石英; Q. 石英; F. 长石; L. 岩屑; Lt(L+Qp). 总岩屑含量。

岩屑占碎屑含量的 20%~50%。黑云母呈他形片状, 少数受压实作用, 晶体弯曲(图 5g), 具较强绿泥石化, 蚀变析出铁质充填在黑云母解理缝或周围, 黑云母占

碎屑含量的 2%~4%。此外, 岩石内穿插有后期黄铁矿脉(图 5h)和沥青脉(图 5i)。

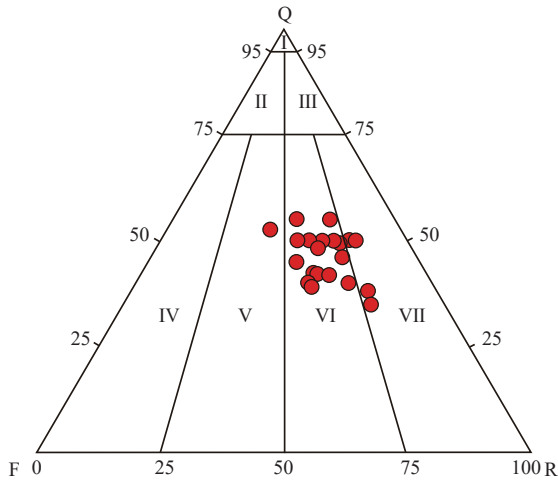
4 矿石及铀矿物特征

4.1 矿石特征

截至目前, 克鲁伦凹陷已发现 3 个砂岩型铀矿工业孔、7 个矿化孔和 9 个异常孔, 其所在地层均为早白垩世伊敏组(K<sub>1y</sub>)。为了系统判别区内铀矿物形态、类型及赋存状态等特征, 笔者在伊敏组铀矿工业孔的矿段内共采集 5 件矿石样品, 埋深为 306.10~367.00 m, 岩性为灰黑色中-细砂岩, 矿石含大量碳屑和团块状黄铁矿。

4.2 铀矿物特征

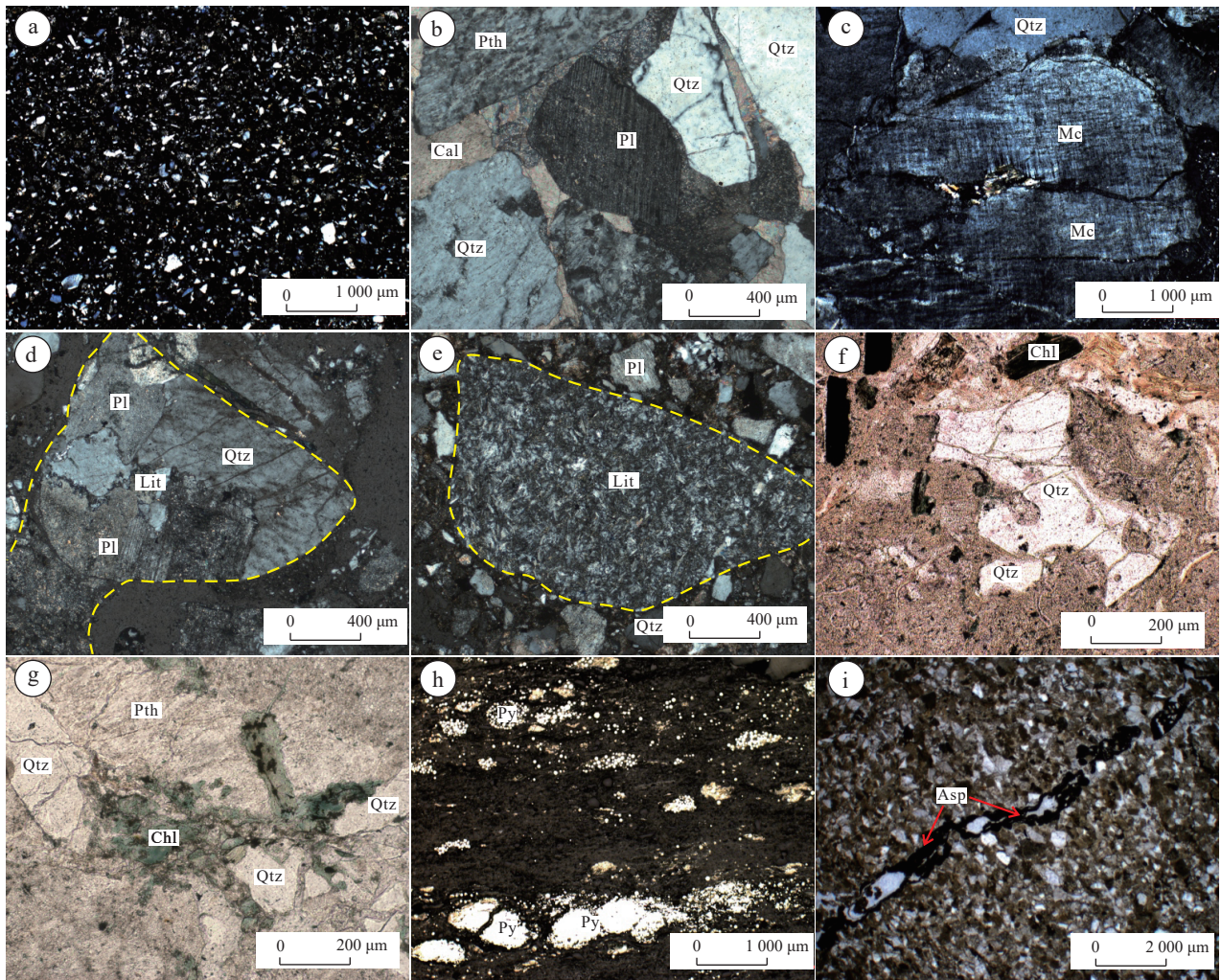
铀矿物微区化学成分分析在东华理工大学核资源与环境教育部重点实验室完成, 实验所用仪器为 JEOL-JXA 8530 型电子探针和与之耦合的 Inca Energy 型能谱仪。测试条件为: 加速电压为 15.0 kV, 探针电流为 20.0 nA, 束斑直径<2 μm, 校正使用 ZAF 修正法



I. 石英砂岩; II. 长石石英砂岩; III. 岩屑石英砂岩; IV. 石英砂岩;  
V. 岩屑长石砂岩; VI. 长石岩屑砂岩; VII. 岩屑砂岩

图4 伊敏组砂岩分类图解(据 Folk, 1968 修改)

Fig. 4 Classification diagram of Yimin Formation sandstone



a. 中细粒砂状结构, 正交偏光,  $\times 4$  倍; b. 斜长石发育聚片双晶, 表面发生弱绢云母化, 正交偏光,  $\times 5$  倍; c. 微斜长石发育格子状双晶, 正交偏光,  $\times 4$  倍; d. 花岗岩岩屑, 正交偏光,  $\times 5$  倍; e. 安山岩岩屑, 正交偏光,  $\times 5$  倍; f. 凝灰岩岩屑, 见溶蚀港湾状石英, 单偏光,  $\times 10$  倍; g. 黑云母发生绿泥石化, 单偏光,  $\times 10$  倍; h. 草莓状黄铁矿, 反射光,  $\times 4$  倍; i. 沥青细脉, 单偏光,  $\times 4$  倍; Qtz. 石英; Pl. 斜长石; Pth. 条纹长石; Mc. 微斜长石; Py. 黄铁矿; Lit. 岩屑; Chl. 绿泥石; Asp. 沥青; Lit. 岩屑; Cal. 方解石

图5 克鲁伦凹陷含矿目的层样品岩相学特征

Fig. 5 Microscopic characteristics of target sandstone composition in Kelulun Depression

(李洁等, 2013)。

研究区铀矿物电子探针化学成分分析结果(表2)显示, 伊敏组矿石中铀矿物以铀石为主, 少量为铀钛氧化物。截至目前, 铀石和铀钛氧化物是克鲁伦凹陷内首次揭露的砂岩型独立铀矿物。铀石中  $\text{UO}_2$  含量为 59.49%~69.69%(均值为 63.89%);  $\text{SiO}_2$  含量为 8.85%~15.41%(均值为 12.25%);  $\text{CaO}$  含量为 1.10%~4.25%(均值为 2.70%);  $\text{Y}_2\text{O}_3$  含量为 0.02%~2.94%(均值为 1.43%);  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量为 0.77%~6.85%(均值为 3.41%);  $\text{FeO}$  含量为 0.33%~3.69%(均值为 2.10%); 总含量为 84.95%~92.03%(均值为 87.26%)。铀钛氧化物中  $\text{UO}_2$  含量为 22.56%~29.40%(均值为 25.73%);  $\text{TiO}_2$  含量

为 43.32%~55.20%(均值为 47.99%);  $\text{SiO}_2$  含量为 2.15%~11.42%(均值为 5.62%); 总含量为 84.75%~89.14%(均值为 86.82%), 总体表现出  $\text{UO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  含量较高,  $\text{CaO}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{Y}_2\text{O}_3$  和  $\text{FeO}$  含量偏低。

克鲁伦凹陷砂岩型铀矿床中铀矿物赋存形式多样, 依据背散射图像中铀矿物出露形态及矿物共生等特征, 本次共划分出以下 3 类形态特征及赋存形式。

(1) 铀石以胶结物形式充填在草莓状黄铁矿内部(图 6a)或亚微米立方体黄铁矿晶体间(图 6b), 少数草莓状黄铁矿颗粒周围存在胶状铀石(图 6c)。由于黄铁矿本身就有强还原性, 能为含铀含氧流体运移提供良好的还原环境, 将流体中的  $\text{U}^{6+}$  还原为  $\text{U}^{4+}$  并沉淀富

表2 克鲁伦凹陷伊敏组铀矿物电子探针分析结果(%)

Tab. 2 EPMA analysis of Uranium minerals in the Yimin Formation, Kelulun Depression (%)

| 点号   | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | TiO <sub>2</sub> | ZrO <sub>2</sub> | Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | UO <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | FeO  | Total | 类型    |
|------|------------------|--------------------------------|------|------------------|------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|------|-------|-------|
| HL-1 | 12.28            | 0.08                           | 1.71 | 0.12             | 0.02             | 1.33                          | 65.91           | 1.14                          | 3.04 | 85.63 | 铀石    |
| HL-2 | 8.85             | 0.00                           | 4.24 | 0.32             | 0.03             | 1.07                          | 63.89           | 5.08                          | 2.18 | 85.66 |       |
| HL-3 | 14.06            | 0.07                           | 1.69 | 0.14             | 0.03             | 1.59                          | 65.80           | 1.47                          | 0.33 | 85.18 |       |
| HL-4 | 13.18            | 0.03                           | 1.82 | 0.13             | 0.00             | 1.87                          | 68.26           | 2.42                          | 1.99 | 89.70 |       |
| HL-5 | 12.12            | 0.01                           | 4.25 | 1.88             | 0.02             | 0.02                          | 62.96           | 1.58                          | 2.78 | 85.62 |       |
| HL-6 | 11.89            | 0.99                           | 3.21 | 0.38             | 0.11             | 2.27                          | 63.78           | 4.15                          | 1.47 | 88.25 |       |
| HL-7 | 11.72            | 0.31                           | 4.04 | 0.22             | 0.06             | 2.02                          | 60.03           | 3.82                          | 3.23 | 85.45 |       |
| HL-8 | 10.89            | 0.56                           | 3.81 | 0.35             | 0.00             | 2.85                          | 62.84           | 6.85                          | 3.07 | 91.22 |       |
| HL-9 | 9.98             | 0.22                           | 3.56 | 0.37             | 0.00             | 2.94                          | 63.38           | 5.71                          | 2.83 | 88.99 |       |
| HL10 | 14.48            | 0.17                           | 1.10 | 0.36             | 0.03             | 1.91                          | 59.49           | 5.22                          | 2.19 | 84.95 |       |
| HL11 | 11.50            | 0.19                           | 2.43 | 0.34             | 0.18             | 1.11                          | 65.12           | 3.81                          | 1.77 | 86.45 |       |
| HL12 | 10.85            | 0.15                           | 2.42 | 0.33             | 0.17             | 1.07                          | 65.31           | 3.45                          | 2.07 | 85.82 |       |
| HL13 | 13.31            | 0.21                           | 1.76 | 0.42             | 0.44             | 1.32                          | 59.91           | 4.31                          | 3.69 | 85.37 |       |
| HL14 | 13.29            | 0.33                           | 2.25 | 2.04             | 2.54             | 0.03                          | 69.69           | 1.37                          | 0.49 | 92.03 |       |
| HL15 | 15.41            | 0.46                           | 2.22 | 2.19             | 2.56             | 0.02                          | 61.99           | 0.77                          | 0.42 | 86.04 |       |
| HL16 | 4.30             | 2.60                           | 1.12 | 51.56            | 0.44             | 0.07                          | 24.43           | 0.02                          | 3.01 | 87.55 | 铀钛氧化物 |
| HL17 | 11.42            | 5.03                           | 1.39 | 43.55            | 0.41             | 0.00                          | 23.22           | 0.04                          | 1.68 | 86.74 |       |
| HL18 | 8.69             | 3.40                           | 1.30 | 43.32            | 0.68             | 0.04                          | 26.87           | 0.04                          | 1.41 | 85.75 |       |
| HL19 | 7.18             | 5.24                           | 0.72 | 44.55            | 0.68             | 0.00                          | 26.94           | 0.00                          | 1.07 | 86.38 |       |
| HL20 | 2.15             | 1.88                           | 2.16 | 55.20            | 0.72             | 0.00                          | 24.31           | 0.05                          | 1.70 | 88.17 |       |
| HL21 | 5.05             | 2.31                           | 0.73 | 51.97            | 0.34             | 0.00                          | 27.59           | 0.01                          | 1.14 | 89.14 |       |
| HL22 | 4.89             | 2.67                           | 1.09 | 43.93            | 0.57             | 0.03                          | 29.40           | 0.07                          | 2.10 | 84.75 |       |
| HL23 | 8.18             | 0.16                           | 1.05 | 49.85            | 0.02             | 2.09                          | 22.56           | 1.68                          | 0.21 | 85.80 |       |

集,形成铀石与黄铁矿紧密共生现象。

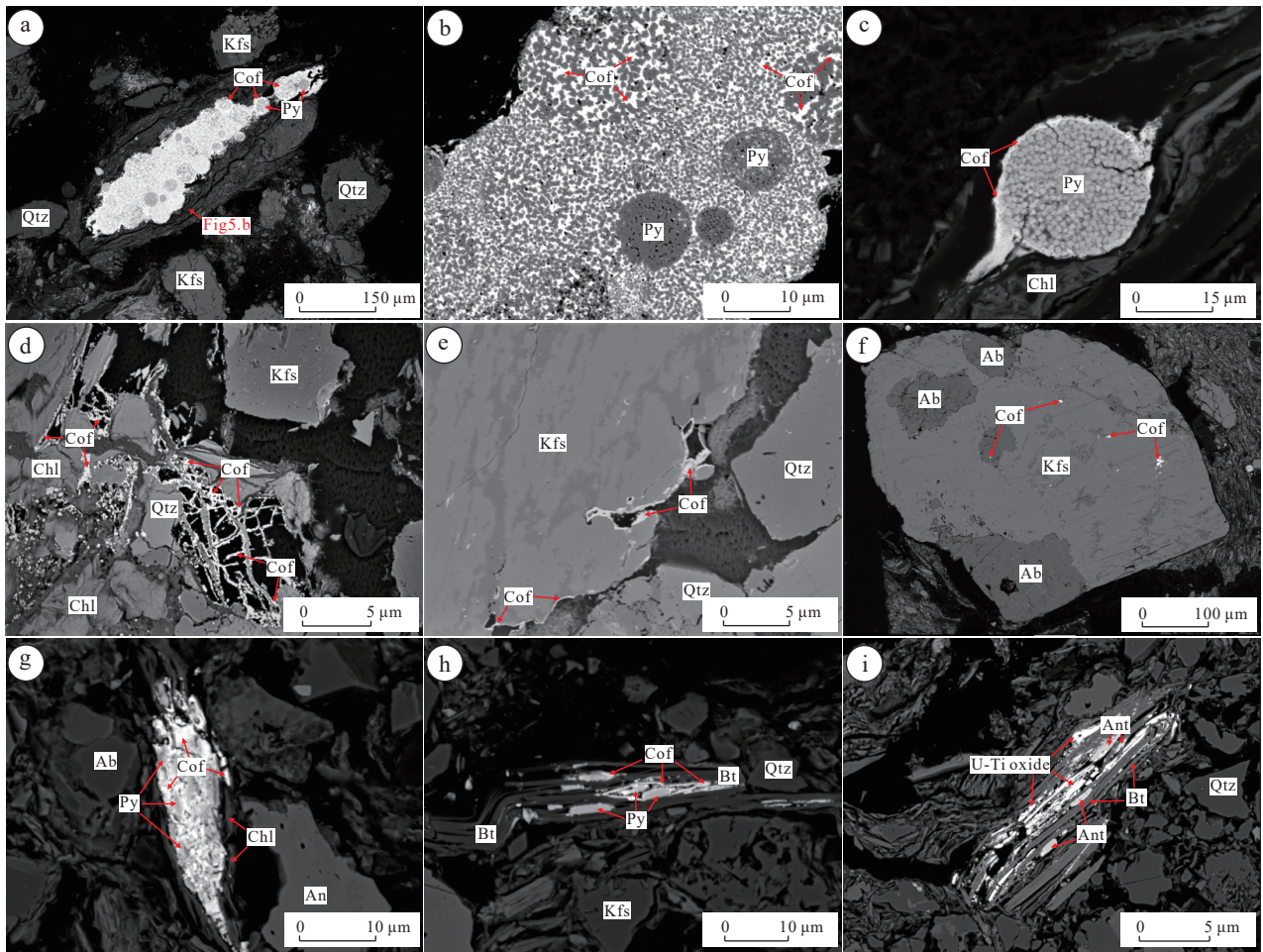
(2) 铀石呈星点状和微细脉状分布在碎屑石英、钾长石和黑云母边缘、裂隙或溶蚀凹坑内(图 6d~图 6f)。钾长石和黑云母等富钾硅酸盐矿物在矿化砂岩蚀变过程中析出大量 K<sub>2</sub>O, 形成高岭石和水白云母等, 与砂岩孔隙水中 CO<sub>2</sub> 反应形成 K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 进入孔隙水溶液中形成强碱溶液, 从而形成局部碱性环境。在碱性条件下, 砂岩碎屑中石英会发生溶解, 这一过程提供大量 SiO<sub>2</sub>, 在 [UO<sub>2</sub>]<sup>2+</sup> 中 U<sup>6+</sup> 被还原为 U<sup>4+</sup> 时, 周围流体中大量 SiO<sub>2</sub> 参与反应, 与 U<sup>4+</sup> 结合形成铀石(李华明等, 2020)。

(3) 黑云母在发生绿泥石化过程中释放 Si<sup>4+</sup>、Fe<sup>2+</sup>、Ti<sup>4+</sup> 等离子, 这些离子在黑云母周围原位形成其他矿物(张展适等, 2007; 夏菲等, 2016)。Si 能够为铀石的形成提供部分 Si 源, Fe 在还原条件下形成黄铁矿, Ti 在中低温条件下形成锐钛矿(丁波等, 2020)。背散射图像显示, 铀石和铀钛氧化物呈胶状(图 6g)、毛刺状或微细柱状围绕黄铁矿(图 6h)和锐钛矿(图 6i)产出, 形成绿泥石-黄铁矿-铀石和绿泥石-锐钛矿-铀钛氧化物的热液蚀变矿物组合, 初步推断区内砂岩型铀成矿过程中存在热流体改造作用。

研究区铀主要以独立铀矿物的形式存在, 铀矿物主要为铀石, 见少量吸附态铀或胶状结合态铀, 吸附态铀主要吸附在黑云母解理缝中, 胶状结合态铀主要以铀铁铀氧化物的形式存在, 吸附态铀与胶状结合态铀中的铀含量较低(图 6, 表 2)。电子探针元素面扫描图像(图 7d、图 7e)中 Fe、S 元素高度重合, 为黄铁矿, U 元素主要分布在微晶粒状集合体状黄铁矿或草莓集合体状黄铁矿的颗粒间隙, 说明铀石分布在黄铁矿集合体的间隙之间, 草莓状黄铁矿边缘也有少量 U 元素。由此可知, 本矿区铀主要以独立铀矿物形式赋存于黄铁矿的周围或黄铁矿集合体的间隙中。

## 5 铀成矿条件分析

海拉尔盆地克鲁伦凹陷碎屑沉积具备物源广泛、近物源、堆积迅速和变化大的特点, 且研究区伊敏组中石英、长石等碎屑颗粒呈棱角至次棱角状, 石英颗粒边缘被溶蚀呈不规则港湾状, 表明该部分碎屑组分主体来自中酸性火山岩类, 其次含矿岩石内出露有少量安山岩、晶屑凝灰岩等岩屑。研究区西侧花岗岩(中-粗粒黑云母花岗岩、细粒花岗岩和花岗闪长岩)



a. 铀石充填在草莓状黄铁矿集合体之间,  $\times 330$  倍; b. 图 a 的局部放大,  $\times 700$  倍; c. 铀石围绕在草莓状黄铁矿边缘,  $\times 1900$  倍; d. 铀石呈星点状和微细脉状分布在碎屑石英、钾长石边缘,  $\times 550$  倍; e. 铀石呈微细脉状分布在碎屑石英边缘,  $\times 700$  倍; f. 铀石呈星点状分布在钾长石的溶蚀凹坑内,  $\times 120$  倍; g. 绿泥石-黄铁矿-铀石,  $\times 1400$  倍; h. 黑云母-黄铁矿-铀石,  $\times 2300$  倍; i. 绿泥石-锐钛矿-铀钛氧化物,  $\times 950$  倍; Cof. 铀石; U-Ti oxide. 铀钛氧化物; Qtz. 石英; Kfs. 钾长石; Ab. 钠长石; An. 钙长石; Bt. 黑云母; Ant. 锐钛矿; Chl. 绿泥石; Py. 黄铁矿

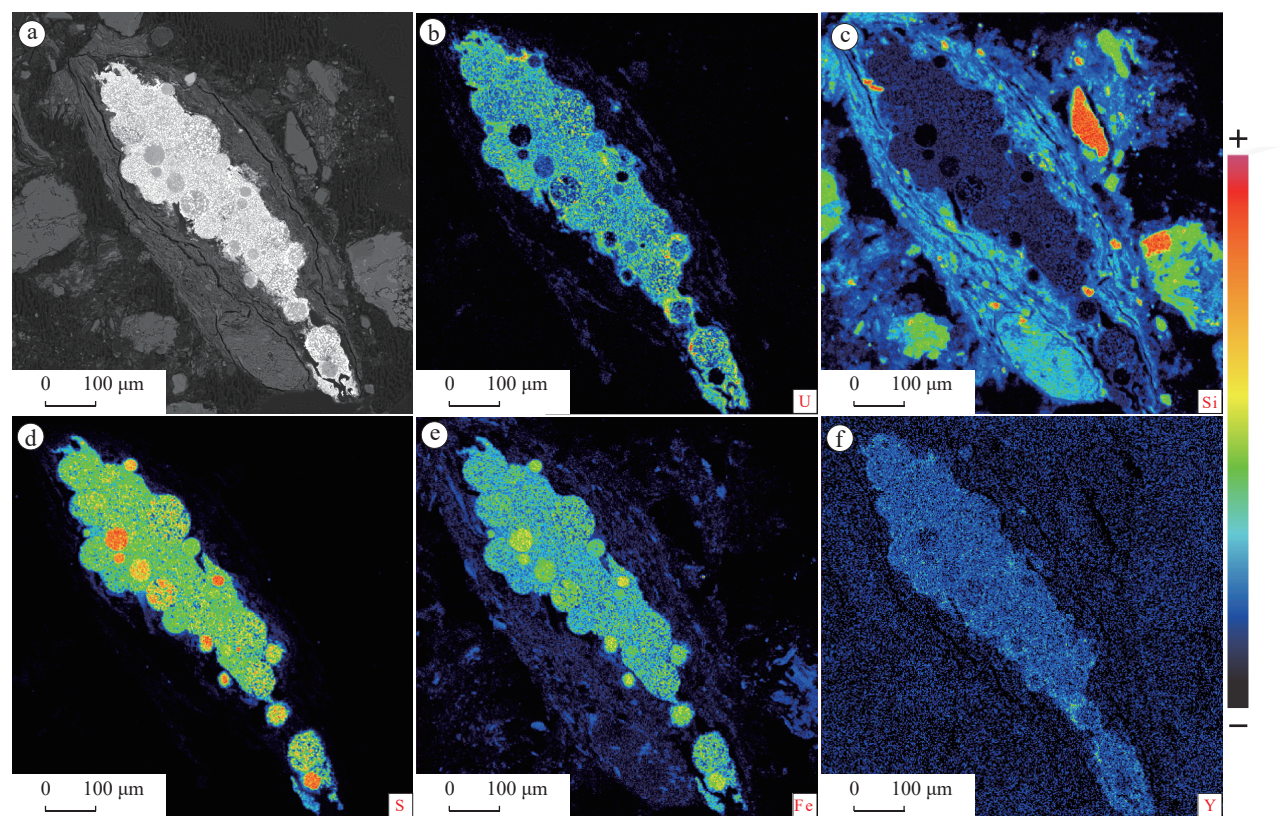
图6 克鲁伦凹陷铀矿物背散射图像

Fig. 6 Backscattering image of uranium minerals in Kelulun Depression

和中酸性火山岩(流纹岩、粗面岩等)是研究区中新生代盖层的主要蚀源区。其中,华力西期花岗岩 U 含量为  $2.7 \times 10^{-6} \sim 22.3 \times 10^{-6}$  (均值为  $5.12 \times 10^{-6}$ ), 铀活化率在 65%~75%; 燕山期花岗岩 U 含量为  $2.8 \times 10^{-6} \sim 5.4 \times 10^{-6}$  (均值为  $4.45 \times 10^{-6}$ ), 铀活化率为 55%~90% (表 3; 夏毓亮等, 2006); 中酸性火山岩 U 含量为  $2.1 \times 10^{-6} \sim 12.3 \times 10^{-6}$  (均值为  $5.23 \times 10^{-6}$ ) (张书义, 2020; 李晓光等, 2021), 整体 U 含量和 U 丢失率较高, 而研究区伊敏组 U 含量也相对较高 (U 含量为  $1.48 \times 10^{-6} \sim 5.50 \times 10^{-6}$ , 均值为  $3.22 \times 10^{-6}$ ; 数据引自核工业二四三大队内部报告), 自身存在一定的铀预富集作用。以上特征表明源岩在蚀变过程中有铀活化迁出, 继而指明蚀源区花岗岩和中酸性火山岩为克鲁伦凹陷砂岩

型铀成矿提供丰富的铀源。

克鲁伦凹陷在早白垩系末期构造活动变弱, 发育河流-三角洲相沉积, 形成一定规模含煤碎屑岩建造 (余本善等, 2013)。晚白垩纪区内成岩作用强烈, 成岩过程中流体多期次溶蚀形成大量次生孔隙, 增加砂体孔隙度及连通性, 为区内含铀含氧水运移提供运移通道。区内溶蚀流体以大气降水和下渗水为主, 其中蚀源区(花岗岩、闪长岩等)基岩裂隙水铀浓度为  $14.4 \times 10^{-6} \sim 225 \times 10^{-6}$  (均值为  $86.22 \times 10^{-6}$ ), 孔隙水铀浓度为  $130 \times 10^{-6} \sim 204 \times 10^{-6}$  (均值为  $45.17 \times 10^{-6}$ ), 潜水铀浓度为  $0.78 \times 10^{-6} \sim 243 \times 10^{-6}$  (均值为  $37.75 \times 10^{-6}$ ) (郭华等, 2002; 黄少华等, 2020; 张海阳等, 2021), 表明大气降水和下渗水将蚀源区铀活化迁移至凹陷内, 为砂体



a. 铀石充填在草莓状黄铁矿集合体之间; b. U 元素含量的分布; c. Si 元素含量的分布; d. S 元素含量的分布;  
e. Fe 元素含量的分布; f. Y 元素含量的分布

图7 克鲁伦凹陷铀矿物及共生矿物电子探针元素面扫描图像

Fig. 7 EPMA element surface scanning image of uranium minerals and symbiotic minerals in Kelulun Depression

内铀矿富集提供有利条件。

砂岩型铀矿在成岩过程中后生蚀变作用能够改变目的层砂体的地球化学环境,为铀的富集沉淀提供有利条件(宋昊等,2016;黄广文等,2021)。研究区岩石学特征显示,含矿目的层砂岩发育高岭石化、绿泥石化等后生蚀变,这些蚀变形成的黏土矿物能够改变含矿目的层砂体的地球化学环境。此外,黏土矿物具有一定吸附性,能够减缓含铀流体移速,并吸附含铀流体中的铀。克鲁伦凹陷为海拉尔盆地重要的煤和油气资源勘探区(彭威等,2006),其煤和油气资源多富

含于中生代铜钵庙组、南屯组和大磨拐河组中(Yang et al., 2022; Zhang et al., 2022),在成煤、生油过程中能够产生大量还原性气体  $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{CO}$ , 气体沿区内发育的断裂向上运移至伊敏组中形成还原性地球化学障,将含铀流体中  $\text{U}^{6+}$  还原成  $\text{U}^{4+}$  沉淀。笔者共编录 3 个砂岩型铀矿工业孔、7 个矿化孔、9 个异常孔和 6 个普通钻孔,在野外钻孔岩心编录过程中发现,克鲁伦凹陷伊敏组岩石样品中出露大量黄铁矿、炭屑及薄层煤线,在工业铀矿段内黄铁矿和碳屑的含量更高。结合显微镜下观察、电子探针背散射图像和面扫描发

表 3 海拉尔盆地蚀源区岩石铀活化率表

Tab. 3 Uranium activation rate of rocks in erosion source area of Hailar Basin

| 岩性       | 样品数 | 现测铀值( $10^{-6}$ ) | 古铀值( $10^{-6}$ ) | 活化率(%)    | 数据来源                  |
|----------|-----|-------------------|------------------|-----------|-----------------------|
| 变质混合岩类   | 7   | 2.9~7.6           | 9~10             | 15.0~55.0 | 何建国, 2002             |
| 古生代浅变质岩类 | 8   | 4.95              | 7.0              | 30.0      | 何建国, 2002             |
| 华力西期花岗岩类 | 29  | 2.7~22.3          | 18.0~50.0        | 55.0~90.0 | 夏毓亮等, 2006            |
| 燕山期花岗岩类  | 20  | 2.8~5.4           | 11.0~15.0        | 65.0~75.0 | 夏毓亮等, 2006            |
| 酸性火山岩类   | 18  | 2.1~12.3          | 22.0             | 87.0      | 张书义, 2020; 李晓光等, 2021 |

现,伊敏组矿石中铀矿物主要充填在草莓状黄铁矿集合体中。此外,长石的高岭石化和绿泥石化的黑云母也吸附一定的铀,反映出区内铀矿物赋存形式的多样性。

克鲁伦凹陷的铀源、构造、砂体、还原剂及首次发现的铀矿物说明海拉尔盆地具有较大的砂岩型铀矿成矿潜力。其中,研究区西侧蚀源区花岗岩和中酸性火山岩能够为区内砂岩铀成矿提供充足的铀源,其次,伊敏组砂岩本身也存在一定的铀预富集,也能为区内提供一定的内部铀源。伊敏组铀矿化形成于辫状河三角洲沉积的分流河道间,砂体内部见大量炭屑和团块状黄铁矿结核,能够形成有利于铀还原沉淀的环境。伊敏组砂岩以中-细粒砂岩为主,具有成分成熟度较低,胶结程度较差,孔隙度和连通性较好的特

点,能够为富氧含铀水的长距离搬运提供运移通道。晚白垩纪—新近系,盆地发生了4次大幅度整体抬升(110~80 Ma、65 Ma、37~32 Ma、16.5~9 Ma),形成“西段东超,南高北低”的构造格局。伊敏组沉积后,海拉尔盆地整体抬升进入后期改造阶段(杨旭,2020;尚尧等,2021)。晚白垩世早期受抬升作用影响,伊敏组长期暴露地表,遭受淋滤、风化和剥蚀,沉积作用间断,自凹陷西部物源区形成的含铀含氧水渗入到伊敏组中,富铀流体不断产生游离的 $[\text{UO}_2]^{2+}$ ,当其浓度达到饱和时, $[\text{UO}_2]^{2+}$ 与伊敏组内还原性介质(碳屑、黄铁矿及沿断裂上升的 $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CO}$ 等还原性气体)发生还原反应,含铀流体中 $\text{U}^{6+}$ 被还原成 $\text{U}^{4+}$ 以铀石和铀钛氧化物形式沉淀,最终在含砾粉砂岩、炭质粉砂岩和细砂岩内形成工业铀矿化(图8)。

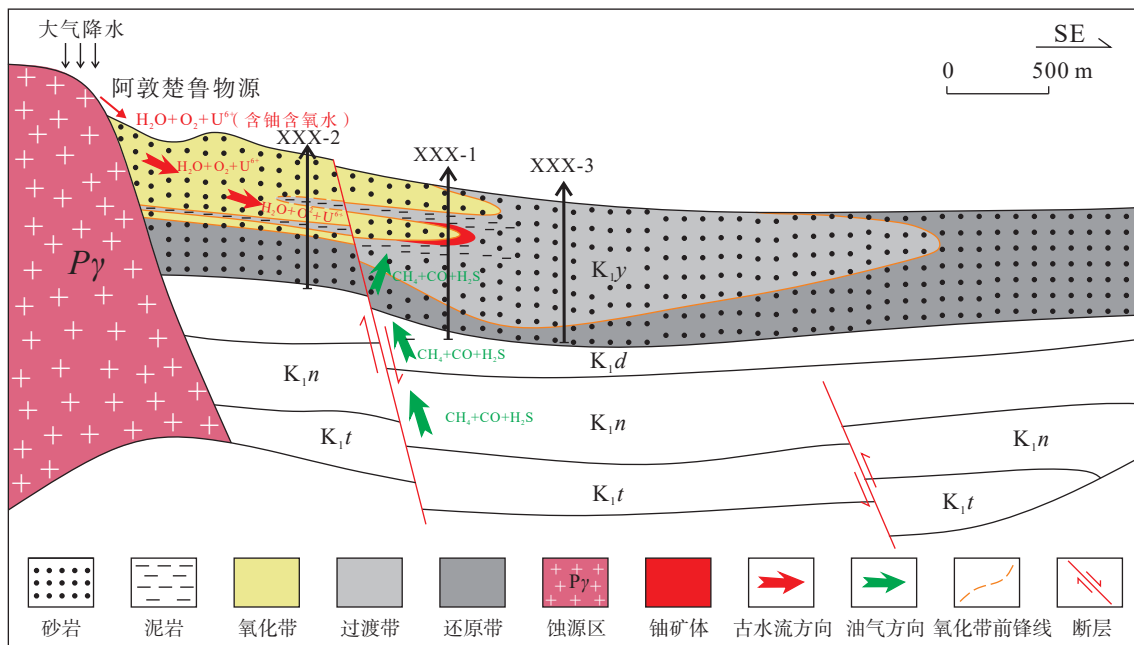


图8 克鲁伦凹陷砂岩型铀成矿过程示意图

Fig. 8 Schematic diagram of sandstone type uranium mineralization process in Kelulun depression

## 6 结论

(1) 克鲁伦凹陷伊敏组以中-细粒长石岩屑砂岩为主,整体发育明显高岭石化和绿泥石化等后生蚀变。研究区西侧花岗岩和中酸性火山岩为砂岩铀成矿提供了丰富的铀源。

(2) 伊敏组中铀矿物主要为铀石,含少量铀钛氧化物。铀石以胶结物形式充填在黄铁矿内部及周围或呈星点状和不规则粒状产出于碎屑颗粒的边缘、裂

隙或溶蚀凹坑内;铀钛氧化物呈胶状、毛刺状或微细柱状分布在黑云母的解理缝中。区内首次发现的铀矿物能够为海拉尔盆地进一步寻找砂岩型铀矿提供理论依据。

(3) 克鲁伦凹陷伊敏组铀矿化赋存于辫状河三角洲前缘的分流河道间沉积亚相中。大规模的后生氧化流体把研究区西侧花岗岩、中酸性火山岩中的铀带入至凹陷内,其次出露的众多还原性介质(油气: $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CO}$ ;有机碳;硫化物:黄铁矿),为本区铀成矿提供必要的还原剂,将流体中 $\text{U}^{6+}$ 还原成 $\text{U}^{4+}$ 以铀石和铀

钛氧化物形式沉淀成矿。

## 利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

## 参考文献(References):

- 陈崇阳, 高有峰, 吴海波, 等. 海拉尔盆地火山岩的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地球科学, 2016, 41(8): 1259–1274.
- CHEN Chongyang, GAO Youfeng, WU Haibo, et al. Zircon U-Pb Chronology of Volcanic in the Hailar Basin, NE China and Its Geological Implication[J]. Earth Science, 2016, 41(8): 1259–1274.
- 崔军平, 赵金, 任战利, 等. 海拉尔盆地呼和湖凹陷下白垩统烃源岩地球化学特征及热演化史[J]. 地球科学, 2020, 45(1): 238–250.
- CUI Junping, ZHAO Jin, REN Zhanli, et al. Geochemical Characteristics of Lower Cretaceous Source Rocks and Thermal History in the Huhehu Depression, Hailar Basin[J]. Earth Science, 2020, 45(1): 238–250.
- 丁波, 刘红旭, 张宾, 等. 鄂尔多斯盆地北缘砂岩型铀矿板状矿体形成机制: 来自含矿层不同分带砂岩中高岭石含量研究的约束[J]. 地质学报, 2020, 94(10): 2874–2882.
- DING Bo, LIU Hongxu, ZHANG Bin, et al. The formation mechanism of tabular ore body of sandstone-type uranium in the northern Ordos Basin: constraints on the study of kaolinite content from different zones of ore-bearing sandstone[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(10): 2874–2882.
- 郭彪, 邵龙义, 张强, 等. 内蒙古海拉尔盆地早白垩世含煤岩系层序地层与聚煤规律[J]. 古地理学报, 2014, 16(5): 631–640.
- GUO Biao, SHAO Longyi, ZHANG Qiang, et al. Sequence Stratigraphy and Coal Accumulation Pattern of the Early Cretaceous Coal Measures in Hailar Basin, Inner Mongolia[J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(5): 631–640.
- 郭华, 卫三元, 刘红旭. 海拉尔盆地可地浸砂岩型铀成矿条件分析及远景区预测[R]. 北京: 核工业北京地质研究院, 2002.
- 黄少华, 秦明宽, 周文博, 等. 内蒙古克鲁伦凹陷伊敏组下段砂岩铀成矿条件、特征及成因[J]. 地球科学与环境学报, 2020, 42(2): 199–214.
- HUANG Shaohua, QIN Mingkuan, ZHOU Wenbo, et al. Metallogenic Conditions, Characteristics and Genesis of Sandstone-type Uranium Deposit of the Lower Member of Yimin Formation in Kelulun Sag of Inner Mongolia, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2020, 42(2): 199–214.
- 黄少华, 周文博, 东艳, 等. 海拉尔盆地贝尔凹陷伊敏组上段骨架砂体特征及其铀成矿潜力[J]. 西北地质, 2021, 54(2): 166–178.
- HUANG Shaohua, ZHOU Wenbo, DONG Yan, et al. Characteristics of Host Sandbody and Its Uranium Metallogenic Potential of the Upper Member of Yimin Formation in Bei'er Depression, Hailar Basin[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(2): 166–178.
- 黄广文, 潘家永, 黄广楠, 等. 柴北缘鱼卡地区路乐河组砂岩岩石学及碎屑锆石稀土元素地球化学特征研究[J]. 稀土, 2021, 42(3): 21–33.
- HUANG Guangwen, PAN Jiayong, HUANG Guangnan, et al. Petrological Characteristics of the Lulehe Formation Sandstone and Geochemical Characteristics of Detrital Zircon Rare Earth Elements in Yuqia Area, Northern Margin of Qaidam Basin[J]. Chinese Rare Earths, 2021, 42(3): 21–33.
- 何建国. 沉积主岩中底部型铀矿床的地质环境[J]. 国外铀金地质, 2002(4): 192–202.
- HE Jianguo. Geological settings of basal-type uranium deposits in sedimentary host rocks[J]. World Nuclear Geoscience, 2002(4): 192–202.
- 何泽宇, 陈磊, 李成元, 等. 内蒙古川井坳陷巴彦花组砂岩碎屑锆石年代学特征对物源及砂岩型铀矿勘查的启示[J]. 西北地质, 2025, 58(1): 186–203.
- HE Zeyu, CHEN Lei, LI Chengyuan, et al. Inspiration of Zircon Chronological Characteristics of Sandstone Fragments from Bayanhua Formation in Chuanjing Depression, Inner Mongolia on Exploration of Source and Sandstone Type Uranium Deposits[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(1): 186–203.
- 纪政. 海拉尔-塔木察格盆地中生代火山岩年代学与地球化学研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- Ji Zheng. Geochronological and geochemical studies of the Mesozoic volcanic rocks in the Hailar-Tamtsag Basin[J]. Changchun: Jilin University, 2020.
- 贾进华, 陶士振, 方向, 等. 东北地区深层侏罗系火山—沉积序列与储盖组合及勘探意义——以海拉尔盆地侏罗系为例[J]. 地质学报, 2021, 95(2): 377–395.
- JIA Jinhua, TAO Shizhen, FANG Xiang, et al. Deep Jurassic volcano-sedimentary succession, reservoir-seal assemblage and their exploration significance in Northeast China: a case study of Jurassic in the Hailar basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(2): 377–395.
- 焦养泉, 吴立群, 荣辉, 等. 中国盆地铀资源概述[J]. 地球科学, 2021, 46(8): 2675–2696.
- JIAO Yangquan, WU Liquan, RONG Hui, et al. Review of Basin Uranium Resources in China[J]. Earth Science, 2021, 46(8): 2675–2696.
- 李洁, 黄小龙. 江西雅山花岗岩岩浆演化及其 Ta-Nb 富集机制[J]. 岩石学报, 2013, 29(12): 4311–4322.

- LI Jie, HUANG Xiaolong. Mechanism of Ta-Nb enrichment and magmatic evolution in the Yashan granites, Jiangxi Province, South China[J]. *Acta Petrologica*, 2013, 29(12): 4311-4322.
- 李晓光, 薛春纪, 卫三元. 内蒙古新巴尔虎右旗地区塔木兰沟组火山岩地球化学特征及其构造意义[J]. *铀矿地质*, 2021, 37(2): 216-226.
- LI Xiaoguang, XUE Chunji, WEI Sanyuan. Geochemical Characteristics and Tectonic Setting of Volcanic Rocks in Tamulangou Formation from Xinbaerhuyouqi Area, Inner Mongolia[J]. *Uranium Geology*, 2021, 37(2): 216-226.
- 刘恒麟, 李忠权, 李根, 等. 先存构造对断层后期生长及形态的影响: 以海拉尔盆地红旗凹陷为例[J]. *地球科学*, 2022, 47(7): 2646-2666.
- LIU Henglin, LI Zhongquan, LI Gen, et al. Influences of Pre-Existing Structures on Future Growth and Geometry of Faults: A Case Study of Hongqi Sag, Hailar Basin[J]. *Earth Science*, 2022, 47(7): 2646-2666.
- 刘志宏, 梅梅, 柳行军, 等. 海拉尔盆地贝尔凹陷伸展断层转折褶皱作用及其对沉积作用的制约[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(5): 1330-1337.
- LIU Zhihong, MEI Mei, LIU Xingjun, et al. Extensional Fault-Bend Folding and Its Constraints on the Sedimentation of Beier Sag in Hailar Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2012, 42(5): 1330-1337.
- 刘坤鹏, 刘凯鹏, 王晓鹏, 等. 鄂尔多斯盆地南部建庄地区直罗组铀矿化定位研究[J]. *西北地质*, 2024, 57(1): 230-238.
- LIU Kunpeng, LIU Kaipeng, WANG Xiaopeng, et al. Study on Uranium Mineralization Location of Zhiluo Formation in Jianzhuang Area, Southern Ordos Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(1): 230-238.
- 赖天功, 张成勇, 夏菲, 等. 柴达木盆地北缘绿草山地区油砂山组沉积、改造与铀矿化成因分析[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2025, 48(4): 332-344.
- LAI Tiangong, ZHANG Chengyong, XIA Fei, et al. Analysis of sedimentation, transformation, and uranium mineralization origin of the Youshashan Formation in the Lyucaoshan area of the northern margin of the Qaidam basin[J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 2025, 48(4): 332-344.
- 李华明, 李玲, 彭云彪, 等. 鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿床粘土矿物特征与地质意义[J]. *矿物学报*, 2020, 40(5): 539-548.
- LI Huaming, LI Ling, PENG Yunbiao, et al. Characteristics of clay minerals in sandstone-type uranium deposits in the northern Ordos Basin and their geological significances[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2020, 40(5): 539-548.
- 马汉峰, 罗毅, 李子颖, 等. 特征对地浸砂岩型铀矿成矿的制约——以扎赉诺尔坳陷带为例[J]. *铀矿地质*, 2011, 27(1): 30-35.
- MA Hanfeng, LUO Yi, LI Ziyang, et al. Characteristics of Sandbodies in Zhalailluoer depression and analysis of uranium exploration direction[J]. *Uranium Geology*, 2011, 27(1): 30-35.
- 马艳玲. 巴彦呼舒凹陷沉积相及储层特征研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2014.
- MA Yanling. Study on Sedimentary and Reservoir Characteristics of Bayanhushu Sag[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2014.
- 聂逢君, 李满根, 邓居智, 等. 内蒙古二连裂谷盆地“同盆多类型”铀矿床组合与找矿方向[J]. *矿床地质*, 2015, 34(4): 711-729.
- NIE Fengjun, LI Mangen, DENG Juzhi, et al. Multiple type uranium deposit assemblage and uranium exploration in Erlian rift Basin, Inner Mongolia[J]. *Deposit Geology*, 2015, 34(4): 711-729.
- 聂逢君, 夏菲, 严兆彬, 等. 二连盆地西部隆起区卫境岩体铀丢失与盆内铀矿成矿关系探讨[J]. *地球学报*, 2022, 43(5): 616-632.
- NIE Fengjun, XIA Fei, YAN Zhaobin, et al. Study on Uranium Loss of Weijing Granite and Sandstone-type Uranium Mineralization in Erlian Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 43(5): 616-632.
- 聂逢君, 严兆彬, 夏菲, 等. 砂岩型铀矿的“双阶段双模式”成矿作用[J]. *地球学报*, 2021, 42(6): 823-848.
- NIE Fengjun, YAN Zhaobin, XIA Fei, et al. Two-stage and Two-mode Uranium Mineralization for Sandstone-type Uranium Deposits[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 42(6): 823-848.
- 彭云彪, 鲁超. 二连盆地乌兰察布坳陷西部赛汉塔拉组下段砂岩型铀矿成矿模式[J]. *西北地质*, 2019, 52(3): 46-57.
- PENG Yunbiao, LU Chao. Metallogenic Model of Sandstone-type Uranium Deposits in the Lower Section of Saihantala Formation, Western Wulanchabu Depression, Erlian Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(3): 46-57.
- 彭威, 宋玉梅, 杨旭, 等. 海拉尔盆地巴彦呼舒凹陷油气成藏条件[J]. *石油学报*, 2006, 27(S1): 18-24.
- PENG Wei, SONG Yumei, YANG Xu, et al. Reservoir-forming conditions in Bayanhushu Sag of Hailar Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 27(S1): 18-24.
- 尚尧, 陈均亮, 林春华, 等. 中国东北盆地群白垩纪末构造反转特征[J]. *大庆石油地质与开发*, 2021, 40(4): 26-31.
- SHANG Yao, CHEN Junliang, LIN Chunhua, et al. Characteristics of late cretaceous tectonic inversion for China Northeast Basin group[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2021, 40(4): 26-31.
- 宋昊, 倪师军, 侯明才, 等. 新疆伊犁盆地砂岩型铀矿床层间氧化带中粘土矿物特征及与铀矿化关系研究[J]. *地质学报*, 2016, 90(12): 3352-3366.
- SONG Hao, NI Shijun, HOU Mingcai, et al. The Characteristics of Clay Minerals in Sandstone-type Uranium Deposit in the Yili Basin, NW China and Its Relationship With Uranium Mineralization

- ation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(12): 3352–3366.
- 夏毓亮, 刘汉彬. 海拉尔盆地西部蚀源区岩石提供铀源能力的研究[J]. *铀矿地质*, 2006, 22(2): 99–103.
- XIA Yuliang, LIU Hanbin. Research on supplying potential of Uranium source from rocks[J]. *Uranium Geology*, 2006, 22(2): 99–103.
- 杨旭. 巴彦呼舒凹陷原型盆地恢复及构造演化[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(1): 18–25.
- YANG Xu. Recovery of the prototype basin and structural evolution for Bayanhushu Sag[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(1): 18–25.
- 夏菲, 孟华, 聂逢君, 等. 鄂尔多斯盆地纳岭沟铀矿床绿泥石特征及地质意义[J]. *地质学报*, 2016, 90(12): 3473–3482.
- XIA Fei, MENG Hua, NIE Fengjun, et al. Characteristics of Chlorite from the Nalinggou Uranium Deposit in the Ordos Basin and Its Geological Significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(12): 3473–3482.
- 余本善, 李薇薇, 王兴宇, 等. 海拉尔盆地构造演化及对沉积的控制作用[J]. *石油地球物理勘探*, 2013, 48(2): 289–296+332+161.
- YU Benshan, LI Weiwei, WANG Xingyu, et al. Tectonic evolution and its controlling on sedimentation in Hailar Basin[J]. *Petroleum Geophysical Prospecting*, 2013, 48(2): 289–296+332+161.
- 张海阳, 高柏, 葛勤, 等. 海拉尔盆地地下水铀的分布特征及富集规律[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(1): 223–231.
- ZHANG Haiyang, GAO Bai, GE Qin, et al. The distribution and enrichment of Uranium in groundwater of Hailar Basin[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(1): 223–231.
- 张科峰, 邓彬, 章凤奇, 等. 海拉尔盆地早白垩世早期挤压变形事件的厘定及其构造意义[J]. *地球科学*, 2016, 41(7): 1141–1155.
- ZHANG Kefeng, DENG Bin, ZHANG Fengqi, et al. Determination of Early Stage of Early Cretaceous Compressive Event in Hailar Basin, NE China, and Its Tectonic Significance[J]. *Earth Science*, 2016, 41(7): 1141–1155.
- 张鲁庭. 巴彦呼舒凹陷构造特征及其对油气聚集的控制作用[D]. 大庆: 东北石油大学, 2013.
- ZHANG Luting. The tectonic characteristics and its effect on the control of the oil and gas accumulation in Bayanhushu Sag[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013.
- 张书义. 内蒙古新巴尔虎右旗塔木兰沟组火山岩年代学与地球化学特征[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(1): 129–138.
- ZHANG Shuyi. Geochronology and Geochemistry of Volcanic Rocks in Tamulangou Formation from New Barag Right Banner, Inner Mongolia[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2020, 50(1): 129–138.
- 张云鹤, 邵龙义, 孙钦平, 等. 海拉尔盆地旧桥凹陷伊敏组层序-古地理及聚煤特征[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(4): 177–187.
- ZHANG Yunhe, SHAO Yongyi, SUN Qinqing, et al. Sequence-paleogeography and coal accumulation features of Jiuqiao Sag Yimin Formation in Hailar Basin[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(4): 177–187.
- 张展适, 华仁民, 季峻峰, 等. 201 和 361 铀矿床中绿泥石的特征及其形成环境研究[J]. *矿物学报*, 2007, 27(2): 161–172.
- ZHANG Zhanshi, HUA Renmin, JI Junfeng, et al. Characteristics and Formation Conditions of Chlorite in No. 201 and No. 361 Uranium Deposits[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2007, 27(2): 161–172.
- 张志杰, 于兴河, 陈占坤, 等. 克鲁伦凹陷大磨拐河组沉积体系演化与赋铀性[J]. *铀矿地质*, 2005, 21(1): 23–29.
- ZHANG Zhijie, YU Xinghe, CHEN Zhankun, et al. Evolution of depositional system and uriferous characteristics of Damoguaihe Formation in Kelulun Sag[J]. *Uranium Geology*, 2005, 21(1): 23–29.
- 赵德锋, 史冠中, 侯艳平, 等. 海拉尔盆地西部坳陷带侏罗系火山机构识别及发育特征[J]. *地球科学*, 2023, 48(4): 1517–1531.
- ZHAO Defeng, SHI Guanzhong, HOU Yanping, et al. Identification and Developmental Characteristics of the Jurassic Volcanic Edifice in the Western Depression Zone of Hailar Basin[J]. *Earth Science*, 2023, 48(4): 1517–1531.
- 钟延秋, 徐庆霞, 谷社峰. 航空放射性测量资料在成矿远景预测中的应用——以海拉尔盆地砂岩型铀矿为例[J]. *地质与资源*, 2010, 19(4): 319–324.
- ZHONG Yanqiu, XU Qingxia, GU Shefeng. Application of Airborne Radioactivity Survey Data in Metallogenic Prospect of Sandstone-type Uranium Deposit in Hailar Basin[J]. *Geology and Resources*, 2010, 19(4): 319–324.
- 周文博, 张荣, 刘彤, 等. 贝尔-乌尔逊凹陷砂岩型铀矿成矿地质特征及远景预测[J]. *西北地质*, 2020, 53(3): 201–209.
- ZHOU Wenbo, ZHANG Rong, LIU Tong, et al. Metallogenic Geological Features and Prospective Study for Sandstone-type Uranium Deposit in Bel-Ulson Depression[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(3): 201–209.
- Cheng Y H, Wang S Y, Jin R S, et al. Global Miocene Tectonics and Regional Sandstone-Style Uranium Mineralization[J]. *Ore Geology Review*, 2019, 106: 238–250.
- Dai H K, Zheng J P, Xiong Q, et al. Deep Lithosphere of the North China Craton Archives the Fate of the Paleo-Asian Ocean[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 215: 103554.
- Fu X F, Chen Z, Yan B Q, et al. Analysis of Main Controlling Factors for Hydrocarbon Accumulation in Central Rift Zones of the Hailar-Tamtsag Basin Using a Fault-Caprock Dual Control

- Mode[J]. Science China Earth Sciences, 2013, 56(8): 1357–1370.
- Folk R L. Petrology of Sedimentary Rocks[M]. Austin: Hemphill's, 1968.
- Guo B, Shao L Y, Hilton J, et al. Sequence Stratigraphic Interpretation of Peatland Evolution in Thick Coal Seams: Examples from Yimin Formation (Early Cretaceous), Hailar Basin, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 196: 211–231.
- Guo F, Liu H X, Fan W M, et al. Early Jurassic Subduction of the Paleo-Pacific Ocean in NE China: Petrologic and Geochemical Evidence from the Tumen Mafic Intrusive Complex[J]. Lithos, 2015, 224–225: 46–60.
- Hall S M, Mihalasky M J, Tureck K R et al. Genetic and Grade and Tonnage Models for Sandstone-hosted Roll-type Uranium Deposits, Texas Coastal Plain, USA[J]. Ore Geology Review, 2017, 80: 716–753.
- Han J B, Jiang H C, Xu J X, et al. Hydraulic Connection Affects Uranium Distribution in the Gas Hure Salt Lake, Qaidam Basin, China[J]. Environmental Science Pollution Research, 2018, 25: 4481–4895.
- Jia R K, Liu J J, Han Q C, et al. Mineral Matter Transition in Lignite During Ashing Process: A Case Study of Early Cretaceous Lignite from the Hailar Basin, Inner Mongolia, China[J]. Fuel, 2022, 328: 125252.
- Jin R S, Yu R A, Yang J, et al. Pale-environmental Constraints on Uranium Mineralization in the Ordos Basin: Evidence from the Color Zoning of U-bearing Rock Series[J]. Ore Geology Review, 2019, 104: 175–189.
- Lu M, Ye R, Zhang B M. Source Identification of the Geochemical Anomaly from the Fine-grained Soil Survey in the Nuheting Sandstone-type Uranium Deposit, Erlian Basin, North China[J]. Journal of Geochem Explore, 2021, 227: 106797.
- Rallakis D, Michels R, Cathelineau M, et al. Conditions for Uranium Biomineralization During the Formation of the Zoovch Ovoo Roll-front-type Uranium Deposit in East Gobi Basin[J]. Ore Geology Review, 2021, 138: 104351.
- Roche V, Camanni G, Childs C, et al. Variability in the Three-Dimensional Geometry of Segmented Normal Fault Surface[J]. Earth-Science Review, 2021, 216: 103523.
- Rong H, Jiao Y Q, Liu W H, et al. Effects of Basic Intrusions on REE Mobility of Sandstones and Their Geological Significance: A Case Study from the Qianjiadian Sandstone-hosted Uranium Deposit in the Songliao Basin[J]. Applied Geochemistry, 2021, 120: 104665.
- Song J, Liu Z H, Wang C, et al. Multistage Structural Deformations of a Superimposed Basin System and Its Tectonic Response to Regional Geological Evolution: A Case Study from The Late Jurassic-Early Cretaceous Tanan Depression, Hailar-Tamtsag Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 110: 1–20.
- Yang J X, Xia Y, Yuan J P, et al. The Depositional Model of the Lower Cretaceous Nantun Formation and Its Implications for Oil Accumulation in The Northern Wuerxun Sag of Hailar Basin, NE China[J]. Sedimentary Geology, 2022, 438: 106208.
- Zhang C, Wang S B, Yu R A, et al. Occurrence of Uranium Minerals in the Xiaomeigou Formation in Northern Qaidam Basin, Northwest China[J]. Ore Geology Review, 2022, 142: 104692.
- Zhang C Y, Nie F J, Jiao Y Q, et al. Characterization of Ore-forming Fluids in the Tamusu Sandstone-type Uranium Deposit, Bayingobi Basin, China: Constraints from Trace Elements, Fluid Inclusions and C-O-S Isotopes[J]. Ore Geology Review, 2019, 111: 102999.
- Zhang Y, Xue Y F, Bu C Y, et al. Climate Characteristics of the Eastern Mongolian Plateau, China During the Early Cretaceous (145–132 Ma): Palynological Evidence from the Tongbomiao Formation in Well Hong-6, Hailar Basin[J]. China Geology, 2022, 5(3): 439–456.
- Zheng H, Mao A Q, Chen W, et al. Fracture Evolution in Oil-rich Rhyolitic Lavas of the Hailar Basin, Northeastern China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 124: 104811.
- Zhu M Y, Shao L Y, Sun B, et al. Sequence Paleogeography and Coal Accumulation Model in the Fluvio-lacustrine Rift Basin: The Lower Cretaceous of the Huhehu Sag of Hailar Basin, Inner Mongolia (NE China)[J]. Marine and Petroleum Geology, 2022, 145: 105879.
- Zhu Q, Yu R A, Feng X X, et al. Mineralogy, Geochemistry, and Fluid Action Process of Uranium Deposits in the Zhiluo Formation, Ordos Basin, China[J]. Ore Geology Review, 2019, 111: 102984.