

doi: 10.12029/gc20210807001

段明, 张博, 汤超, 谢瑜, 滕雪明, 张祺, 徐增连, 魏安军, 蒋职权. 2024. 内蒙古额仁淖尔凹陷赛汉组砂(泥)岩地球化学特征及其对铀成矿作用的制约[J]. 中国地质, 51(3): 932-950.

Duan Ming, Zhang Bo, Tang Chao, Xie Yu, Teng Xueming, Zhang Qi, Xu Zenglian, Wei Anjun, Jiang Zhiquan. 2024. Geochemical characteristics of sandstone (mudstone) of Saihan Formation in Erennur Sag, Inner Mongolia and their constraints on uranium mineralization[J]. Geology in China, 51(3): 932-950(in Chinese with English abstract).

内蒙古额仁淖尔凹陷赛汉组砂(泥)岩地球化学特征及其对铀成矿作用的制约

段明^{1,2}, 张博^{1,2}, 汤超^{1,2}, 谢瑜^{1,2}, 滕雪明^{1,2}, 张祺^{1,2}, 徐增连^{1,2}, 魏安军³,
蒋职权⁴

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 中国地质调查局铀矿地质重点实验室, 天津 300170; 3. 中核核工业集团地质调查院有限公司, 陕西 西安 710100; 4. 内蒙古自治区第二水文地质工程地质勘察院, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要:【研究目的】查明二连盆地额仁淖尔凹陷赛汉组含铀砂(泥)岩的岩石矿物及地球化学特征, 探讨铀成矿作用。【研究方法】包括野外地质编录、偏光显微镜、电子探针能谱分析、主微量元素、环境地球化学及铀的价态分析等。【研究结果】(1) 铀矿物以吸附态和独立铀矿物的形式存在, 常与炭屑和黄铁矿共(伴)生并发现闪锌矿。(2) 矿石具有高 $C_{\text{有}}$ 、S、 CO_2 的特征, 泥岩 $\text{U}^{6+}/\text{U}^{4+}$ 平均为 1.01, 砂岩 $\text{U}^{6+}/\text{U}^{4+}$ 平均为 0.57。(3) 砂(泥)岩的 CIA 值为 50.83~66.34, 稀土元素特征与蚀源区花岗岩一致, 主微量元素特征均显示存在明显的后期沉积-成岩阶段的水岩作用。【结论】(1) 海西期花岗岩是赛汉组砂(泥)岩的主要物源, 沉积环境为半干旱—半湿润古气候。(2) 吸附作用和氧化还原作用是研究区铀富集的主要机理, 泥岩型铀矿以吸附作用为主, 砂岩型铀矿以氧化还原作用为主。(3) 深部流体可能参与了成矿作用。

关键词: 砂岩型铀矿; 成矿环境; 富集机制; 地球化学; 二连盆地; 额仁淖尔; 矿产勘查工程

创新点: (1) 通过电子探针能谱分析和铀的价态分析查明了二连盆地额仁淖尔凹陷赛汉组砂(泥)岩中的铀矿物赋存状态。(2) 岩石地球化学和环境地球化学相结合, 把 CIA (化学蚀变指数) 和 ICV (成分变异系数) 引入研究区砂岩铀矿研究, 解析古气候和蚀源区基岩风化程度。(3) 提出吸附作用和氧化还原作用并存的铀富集机理。

中图分类号: P619.14 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)03-0932-19

Geochemical characteristics of sandstone (mudstone) of Saihan Formation in Erennur Sag, Inner Mongolia and their constraints on uranium mineralization

DUAN Ming^{1,2}, ZHANG Bo^{1,2}, TANG Chao^{1,2}, XIE Yu^{1,2}, TENG Xueming^{1,2}, ZHANG Qi^{1,2},
XU Zenglian^{1,2}, WEI Anjun³, JIANG Zhiquan⁴

(1. Tianjin Centre, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 2. Key Laboratory of Uranium Geology, China Geological

收稿日期: 2021-08-07; 改回日期: 2021-12-30

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0604200)和中国地质调查局项目(DD20190121)联合资助。

作者简介: 段明, 男, 1983 年生, 高级工程师, 主要从事铀矿预测与研究工作; E-mail: duanming000@126.com。

通讯作者: 张博, 男, 1991 年生, 工程师, 主要从事砂岩型铀矿调查及研究工作; E-mail: zhangbo0354@163.com。

Survey, Tianjin 300170, China; 3. Sino Shaanxi Nuclear Industry Group Geological Survey Co. Ltd., Xi'an 710100, Shaanxi, China; 4. The Second Hydrogeological Engineering Geological Exploration Institute of Inner Mongolia, Erdos 017000, Inner Mongolia, China)

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

[Objective] This study aims to ascertain the petrological, mineralogical, and geochemical signatures of the sandstone (mudstone) of the uranium bearing target layer in Erennur Sag, Erlian Basin, and to discuss uranium mineralization. **[Methods]** Research methods include field geological cataloging, polarized light microscopy, electron probe spectroscopy analysis, major trace elements, environmental geochemistry, and uranium valence analysis. **[Results]** (1) Uranium minerals exist in the form of adsorbed and independent uranium minerals, often co-existing (associated) with carbon chips and pyrite, with occasionally with presence of sphalerite. (2) The ore exhibits the characteristics of high organic carbon, S and CO₂. The average U⁶⁺/U⁴⁺ of mudstone is 1.01, and the average U⁶⁺/U⁴⁺ of sandstone is 0.57. (3) The CIA value of sandstone (mudstone) is 50.83 to 66.34. The characteristics of rare earth elements are consistent with those of granite in the erosion source area, the characteristics of main and trace elements all show that there is obvious water-rock interaction in the late sedimentation-diagenesis stage. **[Conclusions]** The following conclusions can be drawn: (1) The Hercynian granite is the dominant source of the sandstone (mudstone) of the Saihan Formation. The sedimentary environment is a semi-arid-semi-humid paleo-climate. (2) Adsorption and oxidation-reduction are the main mechanisms of uranium enrichment in the study area. Mudstone-type uranium enrichment is mainly in the form of adsorption, while sandstone-type uranium enrichment is mainly in the form of oxidation-reduction. (3) The deep fluid may have participated in the mineralization.

Key words: sandstone-type uranium deposit; metallogenic environment; enrichment mechanism; geochemistry; Erlian Basin; Erennur; mineral exploration engineering

Highlights: (1) The occurrence state of uranium minerals in the sandstone (mudstone) of Saihan Formation in Erennur Sag, Erlian basin is detected by electron microprobe energy spectrum analysis and uranium valence analysis. (2) In combination with rock-related and environment-related geochemical data, the CIA (chemical alteration index) and ICV (coefficient of variation of composition) are invoked to discuss the paleoclimate and the weathering degree of bedrock in the erosion source area for further studies of uranium mineralization. (3) Both the form of adsorption and redox have been proposed to illustrate the mechanism of uranium enrichment.

About the first author: DUAN Ming, male, born in 1983, senior engineer, mainly engaged in the uranium prediction and research; E-mail: duanming000@126.com.

About the corresponding author: ZHANG Bo, male, born in 1991, engineer, mainly engaged in investigation and research of sandstone type uranium deposit; E-mail: zhangbo0354@163.com

Fund support: Supported by National Key Research and Development Program Plan (No.2018YFC0604200) and the project of China Geological Survey (No.DD20190121).

1 引言

砂岩型铀矿具有矿床规模大、采矿成本低、环境污染小等优点,在世界铀资源量中的占比迅速攀升,已成为最重要的铀矿类型(Jaireth et al., 2008, 2015; 苗培森等, 2020; 陈军强等, 2021)。中国北方处于欧亚砂岩型铀矿成矿带的东端(王正邦, 2002),在近 20 余年的勘查中,前人已经在伊犁、吐哈、鄂尔多斯、二连、松辽等盆地发现和报道了一批砂岩型铀矿床(点)(刘汉彬等, 2004; 李子颖等, 2010; 聂

逢君, 2010; 罗毅等, 2012; 张金带, 2015; 彭云彪等, 2015; 刘晓雪等, 2016; 陈路路等, 2018; 丁波等, 2020; 张博等, 2021),同时针对这些盆地的砂岩型铀矿物源、铀源、成矿条件、成矿年龄及含矿目的层地球化学特征等方面也做过大量研究(Jin et al., 2020; Yu et al., 2021; Zhao et al., 2021; 汤超等, 2021; 张博等, 2021; 冯晓曦等, 2023; 文思博等, 2023; 赵丽君等, 2023; 程银行等, 2024)。

二连盆地作为中国典型的多能源富集盆地,盆地中蕴藏着丰富的油气、煤、芒硝、铀矿等其他能

源矿产(李月湘等, 2009; 刘武生等, 2013, 2015, 2018), 同时, 也是中国北方主要的砂岩型铀矿产地之一。盆地中产出多种类型的铀矿床, 其中同沉积泥岩型铀矿床包括努和廷超大型、苏崩中型和查干小型铀矿床, 古河道砂岩型铀矿床有巴彦乌拉和哈达图、赛汉高毕、巴润等铀矿床, 形成了以努和廷沉积成岩型为代表的额仁淖尔铀成矿带和以巴彦乌拉古河道型为代表的巴—赛—齐铀成矿带(刘武生等, 2013, 2015, 2018)。近年来, 随着国家对发展清洁能源的需求以及能源安全的战略需要, 砂岩型铀矿的勘探和开发越来越受到重视。2013 年以来新一轮北方砂岩型铀矿找矿工作在马尼特拗陷、乌兰察布拗陷、川井拗陷均取得了找矿突破, 发现了陆海为代表的砂岩型铀矿床, 使得二连盆地铀矿找矿工作和铀成矿作用研究越来越受到关注(卫三元等, 2006; 聂逢君等, 2007; 凡秀君等, 2008; 胡珺珺等, 2011; 鲁超等, 2013, 2016; 郭宏伟, 2014; 李华明等, 2015; 刘武生等, 2015, 2018; 彭云彪等, 2018; 彭云彪和鲁超, 2019; 蒋喆等, 2020; 齐天骄等, 2020; 张文东等, 2020)。

砂岩型铀矿作为一种外生矿床, 成因主要有层间氧化作用、潜水氧化作用和热流体改造作用等(陈肇博等, 2003; 聂逢君等, 2010), 沉积成岩阶段也可以成矿或发生铀的预富集作用。二连盆地的砂(泥)岩型铀矿类型几乎涵盖了前述的所有成矿作用。本文研究的额仁淖尔凹陷是二连盆地乌兰察布拗陷的次级凹陷, 该凹陷产出有努和廷超大型泥岩型铀矿床、道尔苏含煤泥(砂)岩型矿床。其铀矿石赋存状态、赋矿层位和岩性具有多样性, 成矿受多种因素控制, 包括铀源、构造、沉积体系、还原剂、古气候、水岩作用、热流体等(聂逢君等, 2019)。其中制约铀迁移沉淀富集的最主要控制因素是氧化还原作用, 氧化还原的地球化学障都是铀富集成矿的有利场所, 所以, 找矿目的层的 pH、Eh、有机质、铁氧化物等参数均能影响铀成矿。同时, 铀在迁移沉淀过程中离不开水岩作用, 而水岩作用的强度、作用时间等均会在岩石上留下一些地球化学痕迹。铀矿物的赋存状态、共伴生元素、全硫等特征也能反映氧化还原或吸附成矿的过程, 对深部烃类气体是否参与成矿有一定指示意义。

本文在前人研究成果的基础上针对额仁淖尔

凹陷不同类型铀矿石和找矿目的层开展了岩石地球化学、环境地球化学及矿物学特征研究, 试图还原铀迁移过程中留下的痕迹, 揭示成矿环境变化与流体岩石相互作用强度, 进一步完善该类型铀矿沉淀富集机理和成矿作用。

2 区域成矿背景

二连盆地大地构造位置处于华北板块与南蒙古地体之间, 是东亚中生代伸展裂陷作用形成的陆内裂谷型盆地(任建业等, 1998; Ren et al., 2002; 焦贵浩等, 2003; 聂逢君, 2010; Charles et al., 2013; 刘武生等, 2013)。在晚侏罗世末, 华北—蒙古板块出现伸展裂陷作用, 早白垩世地壳伸展作用达到高峰, 出现了裂陷式伸展盆地, 同时与伸展裂谷作用有关岩浆活动在晚侏罗世—早白垩世时期相当强烈(Wu et al., 1999)。早白垩世晚期至晚白垩世, 该地区地壳发生抬升, 盆地出现构造反转, 形成大量逆冲断层和挤压构造, 差异隆升造成构造天窗打开, 发生铀的大规模活化迁移。多期伸展和构造反转在二连盆地形成狭长的隆—凹相间的构造格局。盆地北东向展布, 由 5 个凹陷和 1 个隆起组成, 分别为川井拗陷、乌兰察布拗陷、马尼特拗陷、乌尼特拗陷、腾格尔拗陷以及苏尼特左旗隆起(中央隆起)(任建业等, 1998; 焦贵浩等, 2003; 聂逢君, 2010)。盆地中沉积相发育规律和古气候演化对整个盆地外生铀矿的形成起决定性作用。二连盆地下部沉积充填由侏罗纪伸展裂陷(第一裂陷期)含煤粗碎屑岩建造和火山岩建造组成, 主要沉积体系有冲积扇、湖泊和局部沼泽; 中部充填为早白垩世的早中期, 为强烈裂陷(第二裂陷期)的红色粗碎屑岩建造和黑色含油细碎屑岩建造, 主要沉积体系有扇三角洲、水下扇、湖泊; 上部沉积充填为早白垩世晚期至今的河流、沼泽、湖泊、冲积扇沉积体系。目前已发现产出在中部腾格尔组(K_1br)中的含煤泥(砂)岩型铀矿床(道尔苏), 产出在上部的赛汉组(K_1bs)中的古河道砂岩型(巴彦乌拉、赛汉高毕)、二连组(K_2e)中的泥(砂)岩型矿床(努和廷)。盆地西北缘隆起区花岗岩和盆地边缘火山岩中均有铀矿化显示, 为二连盆地提供了良好的铀源基础。盆地发育大量新生代玄武岩(张维杰和李述靖, 1998), 线性分布特征与北西向构造吻合较好, 断层与玄武岩岩浆活动为盆地内部成矿流体(热流体)成矿提供了诸多

条件; 盆内砂岩具有较高的还原容量, 主要还原剂类型包括植物碎屑、黄铁矿, 可能还有部分油气作用。总之, 二连盆地不同岩石、不同层位、不同类型的铀矿床组合以及多种有利的铀成矿条件共同描绘出良好的铀资源勘探研究前景。

3 研究区地质概况

研究区位于二连盆地乌兰察布坳陷北西部的额仁淖尔凹陷内(图 1), 为一北东向展布的东断西超的箕状凹陷, 东北部较宽, 南西部较狭窄, 面积约 1800 km²。额仁淖尔凹陷产出有超大型泥岩铀矿床(努和廷矿床)以及含煤泥(砂)岩型铀矿床(道尔苏矿床)。研究区位于两个矿床南部的斜坡带上, 基底埋深变化从北西向东南方向逐渐加深, 从 800 m 变化到 1600 m 左右, 靠近西边的卫井岩体, 距卫井岩体 5~15 km。

赛汉组为本区砂岩型铀矿的主要赋矿层位, 其

次为二连组、腾格尔组。赛汉组砂体的空间展布受控于沉积体系、物源方向与构造断裂的控制, 砂体厚度在 43.5~372.2 m, 平均 170.31 m。在凹陷中央厚度最大, 边缘逐渐减薄。在区内楔状断块单元的影响下, 形成多个砂体厚度集中区。赛汉组由下到上沉积相可以划分为三角洲相、湖泊相、辫状河相、辫状河三角洲相, 产铀层位主要位于赛汉组上段辫状河三角洲平原相沉积中的分流河道、心滩中。矿化以垂向上潜水氧化作用为主, 伴随着杂色蚀变带与灰色蚀变带之间产出, 主要蚀变作用为次生氧化-还原作用下形成的绿色、褐黄色蚀变为主, 由上到下可以划分为红色蚀变带(氧化带)、杂色蚀变带(过渡带)、灰色原生带(还原带)。红色蚀变带(氧化带)主要发育于二连组及赛汉组顶部, 以潜水氧化作用为主, 形成棕红色、褐红色砂砾岩、泥岩。杂色蚀变带(过渡带)位于赛汉组顶部, 以棕红色、灰绿色、绿色、灰白色蚀变为主, 伴随着黏土矿物的

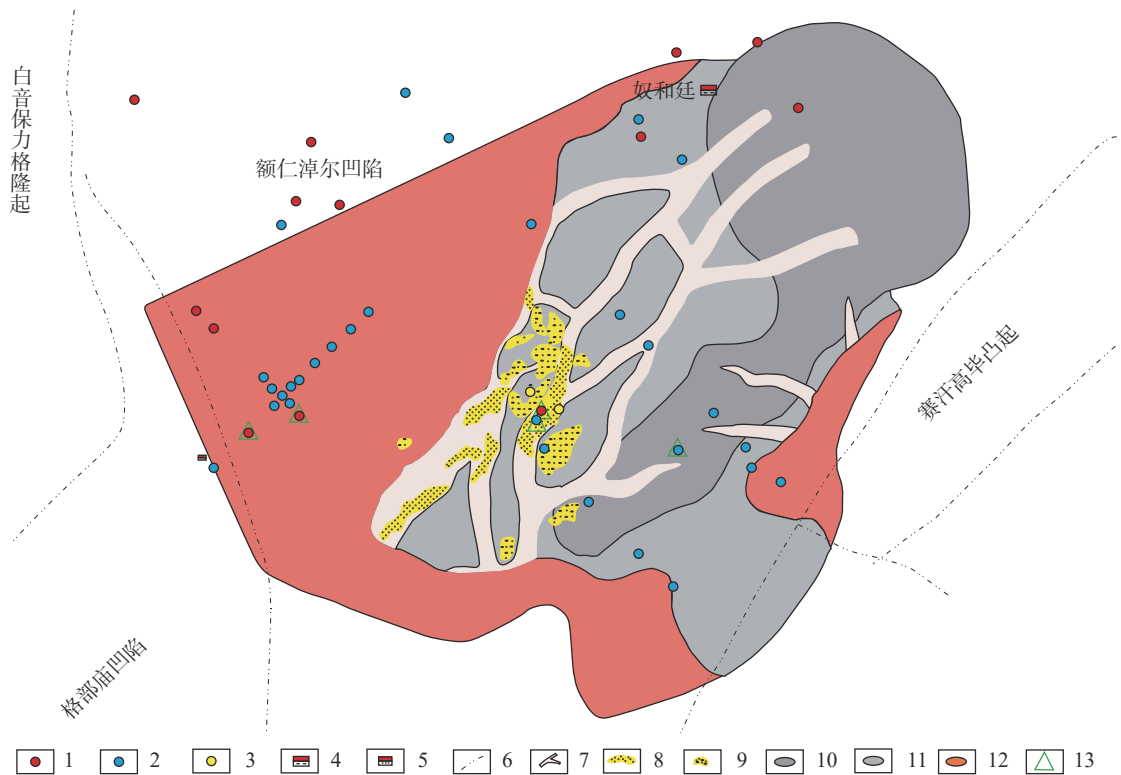


图 1 研究区赛汉期沉积相图

1—铀工业孔; 2—铀矿化孔; 3—铀异常孔; 4—超大型泥岩型铀矿床; 5—铀矿点; 6—凹陷边界; 7—河道; 8—河道砂; 9—心滩; 10—湖相; 11—过渡相; 12—陆相; 13—采样孔位

Fig.1 Sedimentary facies map of Saihan period in the study area

1—Uranium industrial hole; 2—Uranium mineralization hole; 3—Uranium anomaly hole; 4—Super large mudstone type uranium deposit; 5—Uranium ore occurrence; 6—Sag boundary; 7—River channel; 8—River channel sand; 9—Heart beach; 10—Lake facies; 11—Transition facies; 12—Continental facies; 13—Sampling hole locations

转化(高岭土化、绿泥石化),并多见杂斑、不规则条带产出。灰色原生带(还原带)位于赛汉组杂色带以下,整个地层以灰色、深灰色砂砾岩夹灰黑色泥岩为主,局部呈灰绿色。

4 样品采集与分析测试方法

本次研究样品采自二连盆地额仁淖尔凹陷施工的钻孔岩心,依据颜色、铀含量和产出位置将样品分为五类,铀矿化砂岩($U>0.01\%$),铀矿化泥岩($U>0.01\%$),红色-黄色氧化砂岩($U<0.005\%$),原生灰色不含矿砂岩($U<0.005\%$),原生灰黑色不含矿泥岩($U<0.005\%$)。

4.1 岩矿鉴定与电子探针

岩矿鉴定在偏光显微镜下完成的,鉴定方法依据《岩石薄片鉴定》(SY/T5368-2000)。在岩矿鉴定的基础上选取具有代表性的含矿样品制成探针片,利用偏光显微镜初步观察,在探针片中圈定部位后进行喷碳处理,然后应用 EMPA 进行背散射观察与微区化学成分测定。测试过程严格按照国家标准《硅酸盐矿物的电子探针定量分析方法》(GB/T15617-2002)进行。

4.2 放射性元素含量 (U、Ra、Th、K) 及环境地球化学样品分析 (有机 C、S、pH、Eh 等)

元素测试在中陕核工业集团综合分析测试有限公司完成,主量元素测试采用 ZSX-Primus II X 射线荧光光谱仪完成,测试方法参考《硅酸盐岩石化学分析方法 第 28 部分: 16 个主次成分分量测定》(GB/T 14506.28-2010); Ra 测试由 FD125 氡钍分析仪完成,采用的是 ^{226}Ra 的测定射气法,测试方法参考《原油和液体或固体石油产品密度或相对密度的测定毛细管塞比重瓶和带刻度双毛细管比重瓶法》(GB/T 13073-2010); Se、Ge、Re 测试由 AFS-9760 原子荧光光度计完成,采用的是原子荧光光谱法,测试方法分别参考《原子荧光光谱法测定含铀岩石中微量硒》(EJ/T 754-1993)、《区域地球化学样品分析方法 第 15 部分: 镭量测定 氢化物发生-原子荧光光谱法》(DZ/T 0279.15-2016); 其他微量元素测试由 iCAP6300 电感耦合等离子体发射光谱仪完成,测试方法参考《硅酸盐岩石化学分析方法 第 30 部分: 44 个元素量测定》(GB/T 14506.30-2010)。Fe³⁺测定应用 iCAP6300 电感耦合等离子体

发射光谱仪,Fe²⁺测定应用 25 mL 酸式滴定管,测试方法参考《硅酸盐岩石化学分析方法 第 14 部分: 氧化亚铁量测定》(GB/T 14506.14-2010); 全 S 测试采用 G5 CRIUS 碳硫分析仪,测试方法参考《铁矿石碳和硫含量的测定 高频燃烧红外吸收法》(GB/T6730.61-2005); 有机碳(C_有)测试采用总有机碳分析仪,测试方法参考《铁矿石碳和硫含量的测定 高频燃烧红外吸收法》(GB/T 6730.61-2005); ΔEh 测试采用 PHS-3C pH 计,测试方法参考地下水水质检验方法《地下水水质分析方法 第 7 部分: Eh 值的测定电位法》(DZ/T 0064.7-1998); S²⁻、CO₂ 含量测试采用 BSA224S-CW 电子天平,方法参考《铁矿石化学分析方法 硫酸钡重量法测定硫量》(GB/T 6730.16-1986)以及《岩石矿物分析第四版 硅酸盐岩石分析-二氧化碳的测定》(DZG 20.01-2011)。

5 结 果

5.1 铀矿石岩石矿物学特征

铀矿层主要位于赛汉组上段顶部,铀矿石以灰色、深灰色砂砾岩为主,局部夹有黑色炭质泥岩和薄层褐煤。含矿砂砾岩中岩屑含量 30%~40%,主要由花岗岩、片岩组成,石英约占 30%,长石约占 50%,杂基约为 20%。砾石多见,以花岗岩、石英砾石为主。该套砂岩分选性中等到差,呈次棱角状,基底式胶结,杂基-颗粒支撑。多见炭屑、有机质条带及黄铁矿。

在岩矿鉴定的基础上开展了电子探针和能谱分析,结果显示,研究区铀矿物以吸附态和独立铀矿物的形式存在。吸附态铀矿物颗粒细小,主要分布在炭屑、黏土和碎屑颗粒的表面,以超微铀矿物为主。独立铀矿物颗粒较大,多在 6~8 μm,以不定型集合体或胶状为主。电子探针和能谱分析结果显示,铀矿物以铀石为主,次为沥青铀矿。铀矿石中炭屑和黄铁矿含量很高,黄铁矿以草莓状黄铁矿为主,颗粒较大,粒径多在 5~30 μm,呈独立颗粒分布或集合体分布。经过系统的铀矿物共生组合分析,将研究铀赋存状态和矿物组合特征分为以下几类: ①产于炭屑细胞腔内的铀石-草莓状黄铁矿组合(图 2a); ②产于孔隙内的单颗粒草莓状黄铁矿-铀石或沥青铀矿共生组合(图 2b); ③草莓状黄铁矿集合体-铀石共生组合(图 2c); ④产于石英颗粒溶

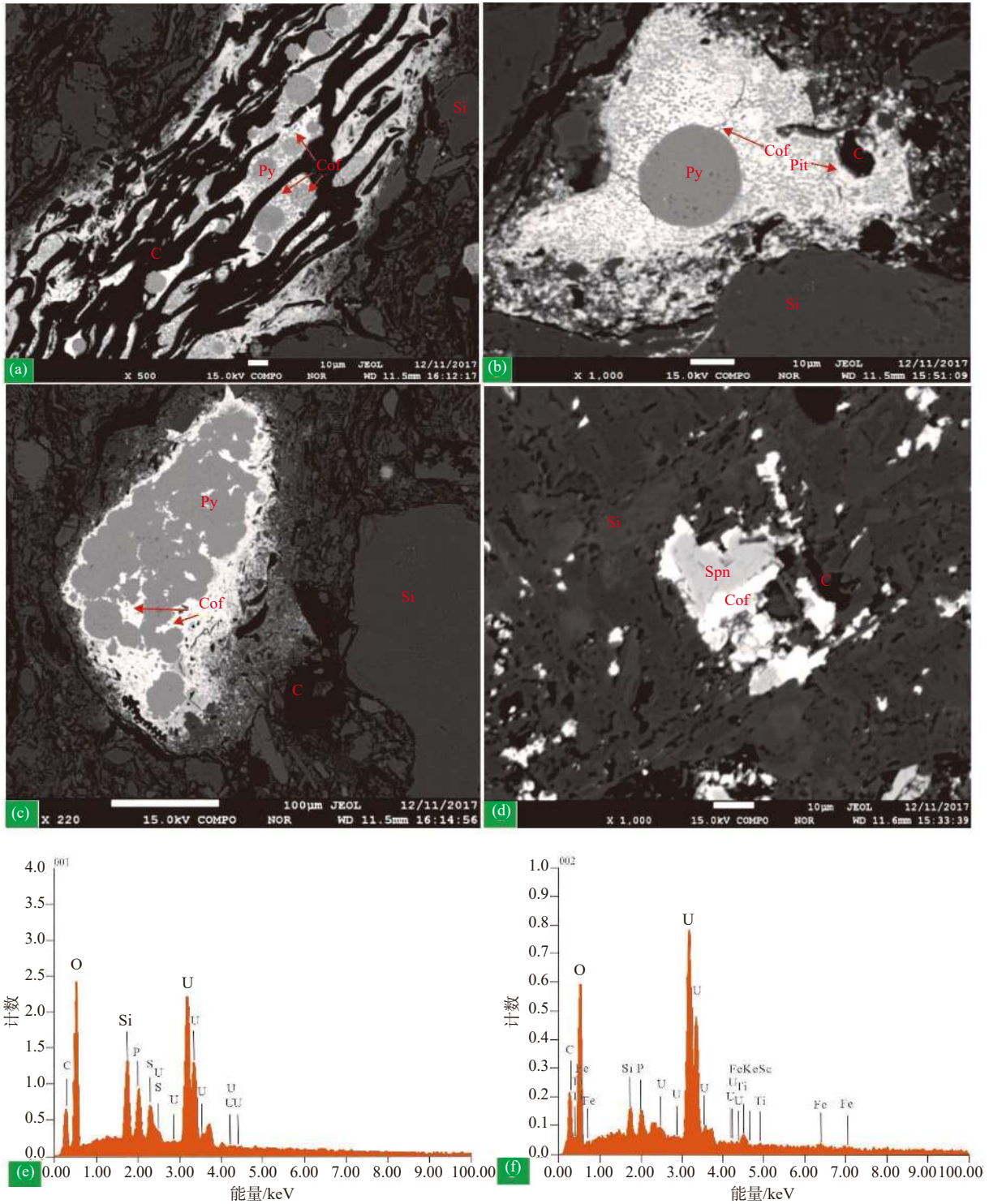


图 2 铀矿物赋存状态

a—铀石与草莓状黄铁矿共生充填于炭屑细胞腔内; b—产于碎屑颗粒间的草莓状黄铁矿与铀石或沥青铀矿共生; c—草莓状黄铁矿集合体与铀石共生; d—铀石与闪锌矿共生; e—铀石成分图; f—沥青铀矿成分图; C—炭质; Si—石英; Py—黄铁矿; Cof—铀石; Spn—闪锌矿

Fig.2 Occurrence state of uranium minerals

a—Uranite and strawberry pyrite coexist and fill the cavity of carbon debris cells; b—Strawberry pyrite produced between clastic particles is symbiotic with uranite or pitchblende; c—Strawberry pyrite aggregate is symbiotic with uranite; d—Symbiosis of uranite and sphalerite; e—Diagram of Uranium ore composition; f—Diagram of pitchblende composition; C—Carbonaceous; Si—Quartz; Py—Pyrite; Cof—Uranite; Spn—Sphalerite

蚀孔内的闪锌矿-铀石共生矿物组合(图 2d)。

铀矿物类型和赋存状态分析显示,研究区铀矿物与还原性物质关系密切,草莓状黄铁矿一般为沉积和早成岩阶段的产物(刘大锰等, 1999),铀矿物与草莓状黄铁矿和炭屑共生,指示该地区存在吸附作用和后期的氧化还原成矿作用,而闪锌矿-铀石共生组合的出现和该地区的铀矿物以铀石为主的特征,指示该地区可能存在深部物质的参与。

5.2 常量元素特征

研究区砂(泥)岩 SiO₂ 含量在 55.12%~79.06%, 平均值 65.58%; Al₂O₃ 为 10.58%~18.69%, 平均值 15%; Fe₂O₃ 在 0.89%~6.83%, 平均值 2.8%; FeO 在 0.93%~4.03%, 平均值 1.98%; MgO 在 0.20%~2.07%, 平均值 0.95%; P₂O₅ 在 0.02%~0.43%, 平均值 0.13%。砂岩样品在不同分带中 SiO₂ 和 Al₂O₃ 的特征变化比较明显(表 1, 图 3), 还原带具有高 SiO₂ 低 Al₂O₃ 的特点, SiO₂ 含量在 71.43%~79.06%, Al₂O₃ 含量在 10.58%~14.53%; 氧化带内 SiO₂ 含量在 69.3%~71.96%, Al₂O₃ 含量在 13.51%~14.85%; 砂岩型铀矿石与还原砂岩和氧化砂岩相比明显具有低 SiO₂ 和高 Al₂O₃ 的特点, SiO₂ 含量在 60.76%~68.76%, Al₂O₃ 含量在 13.63%~18.23%。原生灰色泥岩中 SiO₂ 含量在 55.12%~61.85%, Al₂O₃ 含量在 14.20%~18.69%; 泥岩型铀矿石相对原生灰色泥岩具有高 SiO₂ 低 Al₂O₃ 的特点, SiO₂ 含量在 58.39%~65.59%, Al₂O₃ 含量在 13.2%~17.00%。

5.3 稀土及伴生元素特征

不同类型砂(泥)岩样品稀土元素配分模式图型式基本一致(表 2, 图 4), 以略右倾为主, 指示物源的一致性。灰色砂岩 $\sum\text{REE}$ 为 $191.39 \times 10^{-6} \sim 315.3 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 为 9.91~12.5; 氧化砂岩 $\sum\text{REE}$ 为 $158.74 \times 10^{-6} \sim 224.65 \times 10^{-6}$; 铀矿石 $\sum\text{REE}$ 在 $104.64 \times 10^{-6} \sim 320.98 \times 10^{-6}$ 。 δEu 在氧化带和还原带具有弱的正异常, 在矿石带具有弱的负异常。

泥岩型矿石与不含矿泥岩明显具有稀土亏损的特征, 泥岩型矿石的 $\sum\text{REE}$ 为 $116.24 \times 10^{-6} \sim 251.41 \times 10^{-6}$, 不含矿泥岩的 $\sum\text{REE}$ 为 $88.58 \times 10^{-6} \sim 277.45 \times 10^{-6}$ 。

砂岩铀矿石中 V、Re、Mo、Se、Ga 等元素与 U 的富集相关性不明显, Ga 含量相对较高, 达到综合伴生利用的指标(表 3)。

泥岩铀矿石中部分样品 Mo 含量较高, 达到 $1.39 \times 10^{-6} \sim 1079 \times 10^{-6}$, Se 含量亦不高, 多在 $0.18 \times 10^{-6} \sim 3.1 \times 10^{-6}$, 个别样品大于 30×10^{-6} (表 3); 指示泥岩矿石中铀富集的机制可能存在两种不同类型。

5.4 环境地球化学数据变化

灰色泥岩有机碳(C_有)含量较高, 平均值 0.37%, 泥岩铀矿石有机碳含量更高, 平均值为 1.4%; 从砂岩型铀矿石到原生灰色砂岩再到氧化砂岩 C_有 含量明显降低(表 4, 图 5), 平均值依次为 0.19%、0.1%、0.04%, C_有 与 pH 具有负相关关系(表 4, 图 5); S_全 在灰色砂岩和灰色泥岩中的平均含量分别为 0.12%、0.25%, 在氧化砂岩中硫含量明显丢失, 平均值为 0.02%, 在砂岩和泥岩铀矿石中 S_全 显著增高(表 4, 图 5), 平均值为 0.72%、0.9%; 铀矿石中 S²⁻ 含量也比较高, 氧化砂岩中含量最低, 其次是原生砂岩和原生泥岩, S²⁻ 与 Eh 值具有很好的负相关性, 与 ΔEh 具有正相关性(表 4, 图 5); 灰色不含矿泥岩和不含矿砂岩 Fe³⁺/Fe²⁺ 值(平均为 3.72 和 4)比较接近; 氧化砂岩和铀矿化砂岩明显具有较高的 Fe³⁺/Fe²⁺ 值(平均为 5.17 和 5.23); 而灰色泥岩型矿石则具有明显的强还原性, Fe³⁺/Fe²⁺ 值平均为 1.9(表 4, 图 5); CO₂ 含量在砂岩型铀矿石中明显较高, 平均值为 1.8%, 可能与深部烃类流体在成矿带内富集有关(表 4)。

5.5 铀的价态分析

铀的价态分析结果(表 5)显示, 研究区砂(泥)岩铀附存形式以四价铀为主, U⁶⁺/U⁴⁺ 在 0.23~2.01, 平均 0.85; 其中泥岩矿石和围岩中的 U⁶⁺ 所占比例相对高一些, U⁶⁺/U⁴⁺ 平均 1.01; 砂砾岩和粉砂岩以 U⁴⁺ 为主, U⁶⁺/U⁴⁺ 平均 0.57。由此可见泥岩和砂岩存在两种铀赋存机制, 泥岩中铀可能与沉积成岩时吸附铀为主, 除个别泥岩矿石样品 U⁶⁺/U⁴⁺ 为 0.23, 以还原态铀为主; 而粒度和孔隙度更大的粉砂岩和砂砾岩铀的赋存机制以氧化还原作用为主, 还原态的 U⁴⁺ 约为 U⁶⁺ 的 2 倍。

6 讨 论

6.1 源岩风化程度及成岩期古气候环境

化学蚀变指数 CIA 可以用于定量表示源岩的风化程度(Nesbitt and Young, 1982), 其计算公式为: $\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) \times 100]$ (成分为摩尔分数, CaO* 为硅酸盐中的 CaO, 即全岩中

表 1 额仁淖尔凹陷砂(泥)岩主要元素测试结果(%)

样品编号	铀矿化砂岩										铀矿化泥岩										氧化砂岩										原生砂岩										原生泥岩									
	N463-319-U21	N22-139-U9	N85-3-U5	N6-13-U8	N463-319-U22	N6-13-U12	N85X-U5	N399-159-U9	N85X-U3	351-U4	N80-U3	N6-13-U2	N85-4-U4	N6-13-U1	N85-1-U1	N85-1-U2	N85-1-U3	N85-1-U1	N85-1-U2	N85-1-U3	N85-5-U1	N6-13-U16	N6-13-U10	N6-13-U11	N80-U2	N463-319-U21	N22-139-U9	N85-3-U5	N6-13-U8	N463-319-U22	N6-13-U12	N85X-U5	N399-159-U9	N85X-U3	351-U4	N80-U3	N6-13-U2	N85-4-U4	N6-13-U1	N85-1-U1	N85-1-U2	N85-1-U3	N85-5-U1	N6-13-U16	N6-13-U10	N6-13-U11	N80-U2			
SiO ₂	67.87	63.11	66.94	60.76	68.16	60.75	65.59	62.05	64.57	62.41	58.39	69.44	71.96	69.3	71.43	79.06	73.95	71.69	71.69	71.69	55.12	61.85	57.39	60.91	67.87	63.11	66.94	60.76	68.16	60.75	65.59	62.05	64.57	62.41	58.39	69.44	71.96	69.3	71.43	79.06	73.95	71.69	71.69	55.12	61.85	57.39	60.91			
Al ₂ O ₃	15.15	16.74	17.24	18.23	13.63	17	13.2	14.38	13.76	16.17	14.96	14.85	13.51	15.69	14.53	10.58	13.71	14.25	14.25	14.25	14.58	14.2	18.69	14.98	15.15	16.74	17.24	18.23	13.63	17	13.2	14.38	13.76	16.17	14.96	14.85	13.51	15.69	14.53	10.58	13.71	14.25	14.25	14.58	14.2	18.69	14.98			
MgO	0.2	1.26	0.63	1.73	0.43	1.57	0.62	0.97	0.65	1.6	2.01	0.44	0.39	0.48	0.47	0.31	0.24	0.38	0.38	0.38	1.48	0.99	1.95	2.07	0.2	1.26	0.63	1.73	0.43	1.57	0.62	0.97	0.65	1.6	2.01	0.44	0.39	0.48	0.47	0.31	0.24	0.38	0.38	1.48	0.99	1.95	2.07			
CaO	4.45	0.82	0.85	0.86	2.4	1.6	0.45	0.76	0.48	0.86	1.27	1.22	0.77	0.87	0.81	0.54	0.87	0.63	0.63	0.63	5.53	3.3	1	1.22	4.45	0.82	0.85	0.86	2.4	1.6	0.45	0.76	0.48	0.86	1.27	1.22	0.77	0.87	0.81	0.54	0.87	0.63	0.63	5.53	3.3	1	1.22			
Na ₂ O	2.38	3.44	2.8	2.39	3.36	2.46	2.03	2.79	2.09	2.97	1.75	2.72	2.57	2.88	2.53	1.55	3.17	2.06	2.06	2.06	2	2.56	2.32	1.96	2.38	3.44	2.8	2.39	3.36	2.46	2.03	2.79	2.09	2.97	1.75	2.72	2.57	2.88	2.53	1.55	3.17	2.06	2.06	2	2.56	2.32	1.96			
K ₂ O	3.28	3.62	3.14	3.7	3.55	3.52	3.78	3.68	3.91	3.53	3.76	4.3	4.24	4.41	3.8	3.77	3.88	3.84	3.84	3.84	3	3.8	3.5	3.59	3.28	3.62	3.14	3.7	3.55	3.52	3.78	3.68	3.91	3.53	3.76	4.3	4.24	4.41	3.8	3.77	3.88	3.84	3	3.8	3.5	3.59				
P ₂ O ₅	0.05	0.12	0.06	0.15	0.07	0.16	0.05	0.14	0.06	0.17	0.39	0.06	0.07	0.05	0.03	0.02	0.09	0.03	0.03	0.03	0.43	0.15	0.13	0.29	0.05	0.12	0.06	0.15	0.07	0.16	0.05	0.14	0.06	0.17	0.39	0.06	0.07	0.05	0.03	0.02	0.09	0.03	0.03	0.43	0.15	0.13	0.29			
MnO	0.08	0.06	0.02	0.03	0.05	0.1	0.03	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.74	0.22	0.36	0.05	0.08	0.06	0.02	0.03	0.05	0.1	0.03	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.74	0.22	0.36	0.05				
TiO ₂	0.23	0.74	0.5	0.73	0.31	0.65	0.43	0.44	0.49	0.61	0.65	0.45	0.4	0.41	0.32	0.2	0.19	0.34	0.34	0.34	0.54	0.41	0.69	0.65	0.23	0.74	0.5	0.73	0.31	0.65	0.43	0.44	0.49	0.61	0.65	0.45	0.4	0.41	0.32	0.2	0.19	0.34	0.34	0.54	0.41	0.69	0.65			
FeO	0.93	2.28	1.55	5.82	1.04	5.38	2.03	1.22	2.02	1.26	1.34	2.74	2.74	3.8	2.48	2.03	4.03	4.03	4.03	4.03	5.07	4.39	6.83	1.01	0.93	2.28	1.55	5.82	1.04	5.38	2.03	1.22	2.02	1.26	1.34	2.74	2.74	3.8	2.48	2.03	4.03	4.03	5.07	4.39	6.83	1.01				
Fe ₂ O ₃	1.44	2.18	2.36	5.82	0.98	5.38	0.89	1.67	0.98	1.94	2.53	2.45	3.1	2.55	2.82	1.62	1.75	2.16	2.16	2.16	5.07	4.39	6.83	2.73	1.44	2.18	2.36	5.82	0.98	5.38	0.89	1.67	0.98	1.94	2.53	2.45	3.1	2.55	2.82	1.62	1.75	2.16	2.16	5.07	4.39	6.83	2.73			
TFe ₂ O ₃	2.47	4.71			2.14		3.15	3.03	3.22	3.34	4.02					4.01								3.85	2.47	4.71			2.14		3.15	3.03	3.22	3.34	4.02												3.85			
SO ₃	0.59	0.25			1.3		0.71	1.74	1.04	0.67	1.57													2.04	0.59	0.25			1.3		0.71	1.74	1.04	0.67	1.57												2.04			
LOI	3.63	4.44	0.53	5.56	3.99	7.09	9.38	9.41	9.27	7.03	10.55	3.05	0.06	3.06	0.31	0.06	0.32	0.13	0.13	0.13	11.09	7.3	7.17	7.75	3.63	4.44	0.53	5.56	3.99	7.09	9.38	9.41	9.27	7.03	10.55	3.05	0.06	3.06	0.31	0.06	0.32	0.13	0.13	0.13	11.09	7.3	7.17	7.75		
H ₃ O ⁺			3	5.42		4.64						2.4	1.82	2.58	2.42	1.74	1.32	3.18	3.18	3.18	5.3	3.72	6.08																											
H ₂ O																																																		

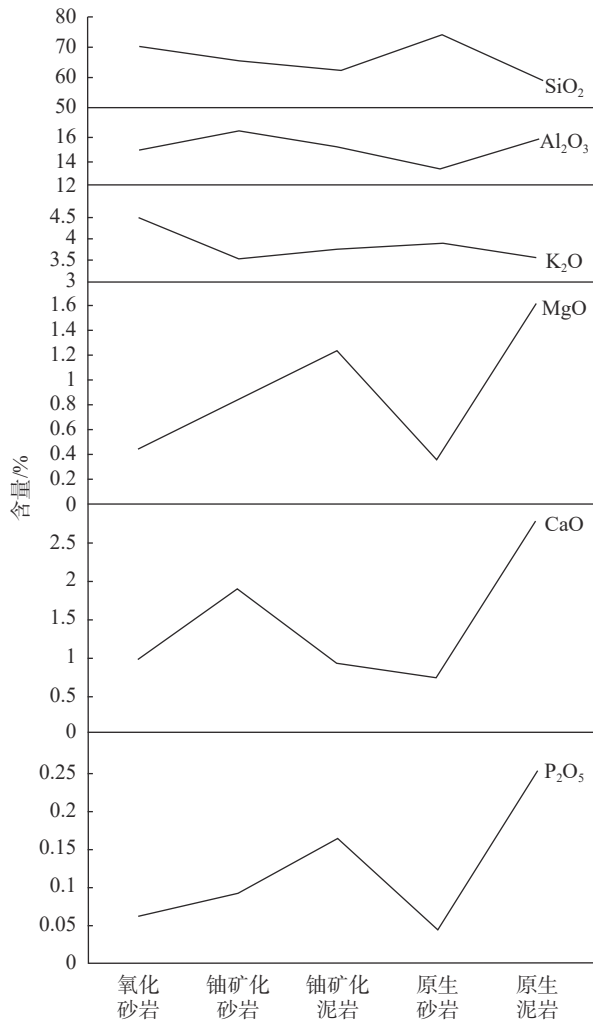


图3 额仁淖尔凹陷赛汉组不同类型砂(泥)岩主量元素平均值趋势图

Fig.3 Trend graph of average content of major elements in different kinds of Saihan Formation sandstone (mudstone) in Erennur Sag

的CaO扣除掉化学沉积的CaO的摩尔分数),主要反映硅酸盐矿物的化学风化作用,CIA越大,表明岩石遭受的化学风化作用越强。CIA变化趋势也可以大致反映沉积时期古气候特征。CIA为50~60时指示低等风化强度,代表寒冷干燥的气候;CIA为60~80时指示中等风化强度,气候温暖湿润;CIA为80~100时指示强烈风化强度,气候炎热潮湿(冯连君等,2006;张天福等,2018)。研究区砂泥岩的CIA值为50.83~66.34,平均值59.76,代表了半干旱—半湿润古气候下的沉积环境或者干旱湿润古气候交替频繁,风化强度低—中等(图6)。

成分变异系数ICV用于估计碎屑岩的原始成分变化程度,判断碎屑岩是代表第一次沉积的沉积

物还是源于再循环的沉积物或沉积物经历强烈风化作用(胡俊杰等,2019)。当ICV值<1时,可能是经历了再沉积的产物或者是强化学风化环境的首次沉积物,说明沉积环境温暖潮湿易于风化;当ICV>1时,表明该岩石含黏土矿物较少,是处于稳定构造环境的首次沉积,说明其沉积环境为寒冷干燥。ICV值计算公式为:

$$ICV = \frac{(Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + MnO + TiO_2)}{Al_2O_3}$$

本次研究所采集砂泥岩样品的ICV值为0.6~1.26,平均值0.8,其中大于1的测值只有3个,较小的ICV值说明沉积环境温暖潮湿易于风化或者经历了再沉积。二连盆地赛汉组沉积期处于断拗转换阶段,盆地差异隆升频繁,局部赛汉组接受剥蚀缺失(鲁超等,2019),说明该区的赛汉组砂岩极有可能经历了再沉积,使本就预富集的砂岩中的铀重新活化再迁移富集。

前人研究认为Fe/MnO、Mg/Ca、Al₂O₃/MgO比值也具有指示意义:Mn在干旱环境中含量比较高,在相对潮湿的条件下含量较低,Fe在潮湿环境中易以Fe(OH)₃胶体快速沉淀,因此,沉积物中FeO/MnO高值对应温湿气候,低值是干热气候的响应;Mg/Ca值对气候变化也非常敏感,一般Mg/Ca高值指示干旱气候,低值反映潮湿气候;但在极度干旱的条件下,Mg/Ca比值指示意义正好相反(张天福等,2016)。研究区除了不含矿泥岩之外均具有较高的FeO/MnO,原生灰色不含矿砂岩更高,整体上Mg/Ca较低,尤其原生砂岩和矿化泥岩更低。原生砂岩、氧化砂岩和矿化泥岩Al₂O₃/MgO则相对较高。这些特征说明整体上沉积以潮湿气候为主,原生泥岩沉积时期可能经历了干旱期,铀矿化泥岩与原生砂岩有着相似的沉积成岩环境。

6.2 物源及源岩构造背景分析

碎屑岩中的稀土元素在沉积过程中具有弱的活动性并且难溶于水,风化、搬运及成岩过程中几乎无变化(Floyd and Leveridge, 1987),其地球化学特征可以较好的反映物源区性质(Taylor and McLennan, 1985; Bhatia and Crook, 1986; McLennan et al., 1990, 1995)。稀土元素配分模式图也可以反映沉积物物源性质,从研究区样品稀土元素的配分模式(图7)来看,以略右倾为主,指示物源的一致性,并且与蚀源区花岗岩的稀土配分模式一致(作者

表 2 额仁淖尔凹陷砂(泥)岩稀土元素测试结果 (10⁻⁶)
Table 2 Results of REE in sandstone (mudstone) in Erennur Sag (10⁻⁶)

样品编号	氧化砂岩						铀矿化泥岩						铀矿化砂岩						原生砂岩						原生泥岩																				
	N6-13- H1	N6-13- H2	N6-13- H4	N85-4- H1	N85-4- H2	N85-4- H4	N6-13- U12	N85X- U3	N85X- U5	N399- U3	N399- U5	N80- U3	N22- U3	N351- U4	N463- U21	N463- U22	N319- U22	N319- U21	N463- U21	N463- U22	N85-3- U5	N6-13- U8	N399- U8	159-U6	N80- U2	N6-13- U16	N6-13- U11	N85- 1-H1	N85- 1-H2	N85-3- U1	N85- 3-U4	N22- 55X- H1													
La	41.5	51.5	35.4	38.4	29.2	31.8	44.6	56.4	45.7	24.9	28.9	47.3	70.8	45.1	46.4	56.9	75.6	19.5	42.5	27.1	19.8	61.7	41.5	51.5	35.4	38.4	29.2	31.8	44.6	56.4	45.7	24.9	28.9	47.3	70.8	45.1	46.4	56.9	75.6	19.5	42.5	27.1	19.8	61.7	
Ce	77.1	97.5	76.2	72	54.6	50.1	91.6	105	86.6	45.8	70	91.1	129	85.4	93.1	106	139	42.3	84.2	49.8	36.3	116	77.1	97.5	76.2	72	54.6	50.1	91.6	105	86.6	45.8	70	91.1	129	85.4	93.1	106	139	42.3	84.2	49.8	36.3	116	
Pr	9.48	11.6	6.94	7.73	5.63	5.74	9.87	11.7	9.61	4.76	8.38	12	17	9.3	10	13	15.6	2.91	8.19	6.77	4.8	14.9	9.48	11.6	6.94	7.73	5.63	5.74	9.87	11.7	9.61	4.76	8.38	12	17	9.3	10	13	15.6	2.91	8.19	6.77	4.8	14.9	
Nd	31.5	37.8	24.5	24.8	17.5	19.1	34.2	37.7	32.4	16	27.4	38.1	55.4	30.2	34.9	42.6	50.8	14.4	27.9	21.2	15.5	50.3	31.5	37.8	24.5	24.8	17.5	19.1	34.2	37.7	32.4	16	27.4	38.1	55.4	30.2	34.9	42.6	50.8	14.4	27.9	21.2	15.5	50.3	
Sm	5.65	6.66	3.89	3.79	2.85	3.96	6.7	6.53	6.5	3.29	4.41	6.05	10.5	5.7	6.75	7.78	9.09	2.27	4.74	3.29	2.51	8.45	5.65	6.66	3.89	3.79	2.85	3.96	6.7	6.53	6.5	3.29	4.41	6.05	10.5	5.7	6.75	7.78	9.09	2.27	4.74	3.29	2.51	8.45	
Eu	1.33	1.24	1	1.49	0.68	0.62	1.16	1.22	1.04	0.74	0.73	1.4	2.33	0.95	1.15	1.66	1.86	0.66	1.07	0.9	0.8	1.71	1.33	1.24	1	1.49	0.68	0.62	1.16	1.22	1.04	0.74	0.73	1.4	2.33	0.95	1.15	1.66	1.86	0.66	1.07	0.9	0.8	1.71	
Gd	5.71	6.3	3.87	3.26	2.37	3.77	5.84	6.05	5.78	3.94	3.94	6.03	11.2	4.84	5.85	7.93	8.64	2.06	4.5	3.19	2.6	8.12	5.71	6.3	3.87	3.26	2.37	3.77	5.84	6.05	5.78	3.94	3.94	6.03	11.2	4.84	5.85	7.93	8.64	2.06	4.5	3.19	2.6	8.12	
Tb	0.93	0.93	0.54	0.99	0.31	0.26	0.46	0.74	0.82	0.73	0.88	0.47	0.96	1.81	0.61	0.72	1.15	1.24	0.34	0.63	0.46	0.43	0.93	0.93	0.54	0.99	0.31	0.26	0.46	0.74	0.82	0.73	0.88	0.47	0.96	1.81	0.61	0.72	1.15	1.24	0.34	0.63	0.46	0.43	0.43
Dy	4.66	4.47	2.37	4.8	1.63	1.41	2.98	4.68	5.39	4.58	2.49	2.6	5.06	9.38	3.75	4.52	5.68	5.45	1.54	2.69	2.32	2.41	4.66	4.47	2.37	4.8	1.63	1.41	2.98	4.68	5.39	4.58	2.49	2.6	5.06	9.38	3.75	4.52	5.68	5.45	1.54	2.69	2.32	2.41	2.41
Ho	0.94	0.9	0.49	0.99	0.26	0.23	0.5	0.87	1.02	0.79	0.43	0.46	0.96	1.94	0.67	0.78	1.2	1.1	0.32	0.52	0.42	0.49	0.94	0.9	0.49	0.99	0.26	0.23	0.5	0.87	1.02	0.79	0.43	0.46	0.96	1.94	0.67	0.78	1.2	1.1	0.32	0.52	0.42	0.49	0.49
Er	2.9	2.71	1.45	2.93	0.78	0.69	1.51	2.63	2.86	2.4	1.25	1.38	2.85	5.87	1.97	2.45	3.33	3.37	0.97	1.48	1.27	1.46	2.9	2.71	1.45	2.93	0.78	0.69	1.51	2.63	2.86	2.4	1.25	1.38	2.85	5.87	1.97	2.45	3.33	3.37	0.97	1.48	1.27	1.46	1.46
Tm	0.42	0.37	0.25	0.42	0.1	0.1	0.23	0.37	0.41	0.34	0.18	0.2	0.44	0.75	0.3	0.35	0.46	0.44	0.15	0.23	0.2	0.23	0.42	0.37	0.25	0.42	0.1	0.1	0.23	0.37	0.41	0.34	0.18	0.2	0.44	0.75	0.3	0.35	0.46	0.44	0.15	0.23	0.2	0.23	0.52
Yb	2.48	2.27	1.6	2.38	0.83	0.68	1.46	2.62	2.77	2.49	1.31	1.4	3.01	4.28	2.29	2.46	2.8	2.67	1	1.41	1.45	1.53	2.48	2.27	1.6	2.38	0.83	0.68	1.46	2.62	2.77	2.49	1.31	1.4	3.01	4.28	2.29	2.46	2.8	2.67	1	1.41	1.45	1.53	3.22
Lu	0.39	0.4	0.24	0.42	0.11	0.096	0.22	0.35	0.39	0.35	0.17	0.19	0.44	0.72	0.34	0.32	0.46	0.44	0.16	0.22	0.22	0.23	0.39	0.4	0.24	0.42	0.11	0.096	0.22	0.35	0.39	0.35	0.17	0.19	0.44	0.72	0.34	0.32	0.46	0.44	0.16	0.22	0.22	0.23	0.55
Y	24.1	23.6	12.5	23.4	8.41	7.17	19.3	30.5	36.1	28.8	15.6	17.3	27.9	47.2	23.9	26.3	27	26.7	8.74	14.2	16.7	21.1	24.1	23.6	12.5	23.4	8.41	7.17	19.3	30.5	36.1	28.8	15.6	17.3	27.9	47.2	23.9	26.3	27	26.7	8.74	14.2	16.7	21.1	30
ΣREE	184.99	224.65	158.74	251.41	154.68	116.24	222.50	206.23	238.26	199.31	104.64	150.46	215.70	320.98	191.29	209.75	250.95	315.30	88.58	180.28	118.59	89.09	184.99	224.65	158.74	251.41	154.68	116.24	222.50	206.23	238.26	199.31	104.64	150.46	215.70	320.98	191.29	209.75	250.95	315.30	88.58	180.28	118.59	89.09	277.45
LREE	166.56	206.30	147.93	231.86	147.40	110.40	111.37	188.13	218.55	181.85	95.49	139.82	195.95	285.03	176.52	192.30	227.94	291.95	82.04	168.60	109.06	79.71	166.56	206.30	147.93	231.86	147.40	110.40	111.37	188.13	218.55	181.85	95.49	139.82	195.95	285.03	176.52	192.30	227.94	291.95	82.04	168.60	109.06	79.71	253.06
HREE	18.43	18.35	10.81	19.55	7.28	5.84	11.13	18.10	19.71	17.46	9.15	10.64	19.75	35.95	14.77	17.45	23.01	23.35	6.54	11.68	9.53	9.38	18.43	18.35	10.81	19.55	7.28	5.84	11.13	18.10	19.71	17.46	9.15	10.64	19.75	35.95	14.77	17.45	23.01	23.35	6.54	11.68	9.53	9.38	24.39
LREE/HREE	9.04	11.24	13.68	11.86	20.25	18.92	10.01	10.39	11.09	10.42	10.44	13.14	9.92	7.93	11.95	11.02	9.91	12.50	12.54	14.43	11.44	8.50	9.04	11.24	13.68	11.86	20.25	18.92	10.01	10.39	11.09	10.42	10.44	13.14	9.92	7.93	11.95	11.02	9.91	12.50	12.54	14.43	11.44	8.50	10.38
La/Yb) _N	1.58	2.14	2.09	2.33	4.36	4.05	2.05	1.61	1.92	1.73	1.79	1.95	1.48	1.56	1.86	1.78	1.92	2.67	1.84	2.84	1.76	1.22	1.58	2.14	2.09	2.33	4.36	4.05	2.05	1.61	1.92	1.73	1.79	1.95	1.48	1.56	1.86	1.78	1.92	2.67	1.84	2.84	1.76	1.22	1.81
δEu	1.10	0.90	1.21	1.02	0.91	1.12	0.81	0.87	0.91	0.80	1.12	0.82	1.09	1.01	0.86	0.86	0.99	0.99	1.43	1.09	1.30	1.47	1.10	0.90	1.21	1.02	0.91	1.12	0.81	0.87	0.91	0.80	1.12	0.82	1.09	1.01	0.86	0.86	0.99	0.99	1.43	1.09	1.30	1.47	0.97
δCe	0.92	0.95	1.15	0.94	0.99	1.01	0.88	1.04	0.97	0.98	1.00	1.07	0.91	0.88	0.99	1.03	0.92	0.96	1.33	1.07	0.87	0.88	0.92	0.95	1.15	0.94	0.99	1.01	0.88	1.04	0.97	0.98	1.00	1.07	0.91	0.88	0.99	1.03	0.92	0.96	1.33	1.07	0.87	0.88	0.91

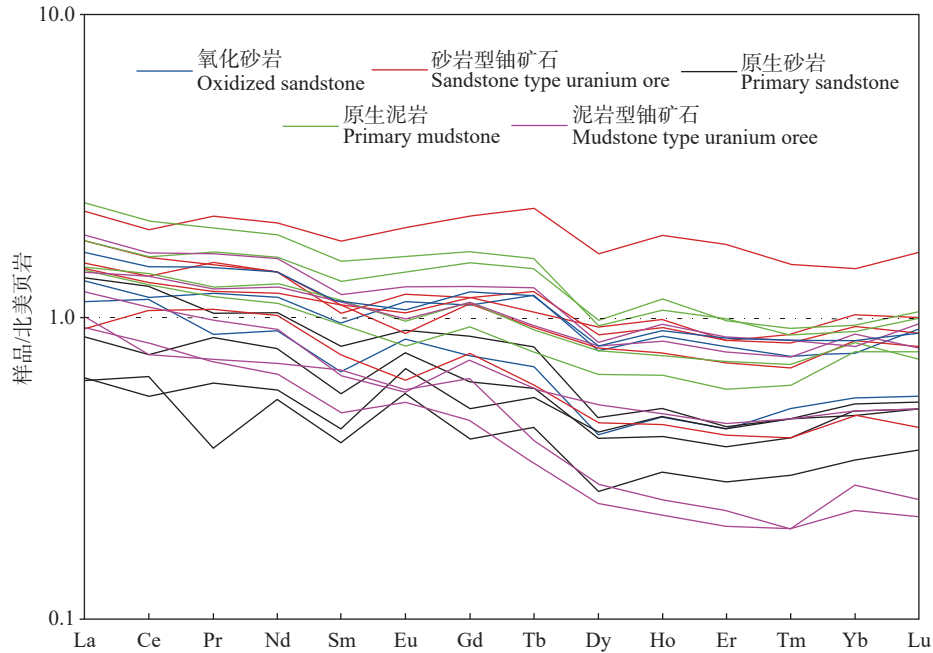


图4 研究区赛汉组砂(泥)岩稀土配分模式图(北美页岩标准化数据来自于 Haskin and Haskin, 1966)
Fig.4 REE distribution patterns of sandstone (mudstone) of Saihan Formation in the study area (North American shale standardization data from Haskin and Haskin, 1966)

未发表数据),指示蚀源区花岗岩提供了主要的物源。

碎屑岩的地球化学特征不仅可反映物源区岩石成分,而且能反映源岩构造背景(Bhatia, 1983; Bhatia and Crook, 1986)。根据地壳性质将盆地构造类型划分为大洋岛弧型、大陆岛弧、活动大陆边缘和被动大陆边缘4种(Bhatia, 1983, 1985)。在 $TiO_2-(TFe_2O_3+MgO)$ 和 $Al_2O_3/SiO_2-(TFe_2O_3+MgO)$ 图解中(图8),赛汉组砂(泥)岩样品主要落入大陆岛弧、活动大陆边缘及其附近,说明额仁淖尔凹陷赛汉组的碎屑沉积物主要来源于大陆岛弧和活动大陆边缘环境下的长英质物源,这与兴蒙造山带东段海西期构造岩浆活动性质一致,推断广泛分布的海西期蚀源区花岗岩可能提供了主要的物源。

6.3 成矿环境变化与铀沉淀富集机理

研究区铀矿物赋存形式以吸附态和独立铀矿物为主,铀多充填在炭屑细胞腔内,与草莓状黄铁矿伴生。一般认为草莓状黄铁矿为沉积-早成岩阶段的产物(刘大锰等, 1999; 毛世东等, 2009; 张光荣等, 2020),显然炭屑和草莓状黄铁矿形成的时间要早于氧化流体的渗入,而草莓状黄铁矿和炭屑都属于强还原的多孔介质,对成矿流体中的铀具有很强的吸附作用,同时也对碳酸铀酰离子具有很强的还原作用,这明显不同于典型层间氧化带内沥青铀矿

与细晶黄铁矿大量共生的特点(闵茂中等, 2006)。这说明吸附作用和氧化还原作用是该地区铀富集的主要机理,沉积与成岩阶段的砂岩和泥岩的因水岩作用不强,并没有大量细晶状黄铁矿的形成。闪锌矿-铀石矿物共生组合,指示了可能有深部中低温流体参与成矿。

微量元素特征显示原生砂岩到氧化砂岩再到铀矿化砂岩, SiO_2 含量有降低的趋势(图3),指示沉积与成岩阶段之后的砂岩氧化带内水岩相互作用较强,矿化带是氧化带水岩相互作用的延续。铀矿化砂岩中 Al_2O_3 含量增加,与该带内较强的黏土化有关。砂岩型铀矿石的这种低 SiO_2 高 Al_2O_3 的特点,指示了铀矿化与氧化流体有关,流体的渗入造成硅酸盐矿物的分解,导致 Al_2O_3 含量增加,但是氧化流体渗入后持续时间不长,使得该地区缺乏 SiO_2 流失后迁移再沉淀的现象,指示铀矿化带沉淀仍为弱碱性的成矿环境。 K_2O 和 MgO 的含量在过渡带较高,指示黏土矿物可能以绿泥石和蒙脱石为主。铀矿化砂岩相对于不含矿原生灰色砂岩和氧化砂岩具有较高的 CaO 和 CO_2 含量(图3),可能与局部酸性环境的出现导致氧化带 CaO 的迁出,U的迁移形式主要为 $[UO_2(CO_3)_2]^{2-}$ 和 $UO_2(CO_3)_2^{4-}$,铀的沉淀可以逸出较高浓度的 CO_2 。泥岩型铀矿石相比

表 3 额仁淖尔凹陷砂(泥)岩伴生元素地球化学测试结果 (10⁻⁶)

Table 3 Geochemical test results of associated elements of sandstone (mudstone) in Erennur Sag (10⁻⁶)

样品编号	原生砂(泥)岩										铀矿化砂岩										铀矿化泥岩									
	N6-13-U13	N6-13-U15	N85-3-U4	N85-4-U2	N6-13-U9	N6-13-U10	N85-13-U6	N85-3-U3	N80-U2	N399-159-U6	N351-U3	N463-319-U21	N22-139-U9	N85-3-U5	N6-13-U8	N463-319-U22	U7	N85-4-U3	N85X-U3	N85X-U5	N85X-U9	N80-159-U3	N6-13-U11	N351-U4						
U	7.79	12.2	13.2	15.6	21.3	25.5	27.2	38.8	42.3	42.6	46.9	49.9	120	142	344	558	1100	102	102	230	136	114	364	108						
V	3.41	10.5	5.59	47.9	6.76	11.5	12.4	9.63	11.8	90.6	53.4	70.4	17.8	75.8	7.03	14.7	58.5	59.3	54.5	56.2	158	10.5	55.9							
Ga	9.82	16.6	15.2	22.2	15.5	20.9	23.3	17.8	32.8	20.8	27.5	25.4	16.5	24.5	27.8	24.5	25.2	20.6	19	22.8	21.5	18.5	24.1							
Sc	25.3	57.2	15	12.1	41.7	61.5	80.6	54.8	104	11.3	7.81	10.2	2.46	10.7	72	88	3.69	7.37	6.17	6.78	13.2	65.6	9.58							
Mo	1.89	3.6	1.18	1.77	3.65	1.1	0.86	0.51	1.64	3.45	13.5	2.53	3.83	1.52	2.05	1.35	6.64	230	1079	1040	33.5	4.04	1.39	2.71						
Re	0.005							0.095	0.11	0.17	0.089	0.12					0.018	0.089	0.089	0.089	0.13	0.2								
Ge	0.17	0.35	2.8	0.96	0.28	1.23	0.74	1.04	4.45	1.18	1.29	4.5	2.48	2.01	6.32	1.47	5.14	8.1	16.1	22.5	0.62	1.19	0.41	6.89						
Se	1	1.35	0.13	0.16	1.36	0.19	1.36	1.07	11.1	0.49	0.17	21.6	3.85	0.13	2.43	0.31	1.7	0.18	0.58	0.51	0.83	3.1	1.5	31.9						

表 4 额仁淖尔凹陷砂(泥)岩环境地球化学测试结果

Table 4 Environmental geochemical test results of sandstone (mudstone) in Erennur Sag

样品编号	泥岩型轴矿石										砂岩型轴矿石										氧化砂岩										原生砂岩										原生泥岩									
	N351-U8	N463-319-U8	N463-319-U5	N85X-U5	N351-U18	N85X-U4	N85X-U1	N463-319-U22	N463-319-U11	N463-319-U19	N463-319-U29	N463-319-U15	N351-U16	N463-319-U15	N22-139-U6	N463-319-U14	N463-319-U26	N85X-H9	N85X-H12	N80-U1	N85-1-U1	N85-1-U9	N80-H1	N85X-U8																										
U	179	204	230	2577	1220	29.6	18.6	23	16.6	17.2	20.6	4.83	39.6	27.5	24.7	13.1	8.21	2.78	4.52	6.1	4.18	12.1	12.3	9.29																										
Th	30.7	32.4	16.2	18.6	29.6	18.6	18.6	23	16.6	17.2	20.6	4.83	39.6	27.5	24.7	13.1	8.21			31.2	9	27	25.6	13.2																										
Ra	4.33	4.81	22.4	13.8	58.2	15.5	15.5	2.9	2.98	2.75	3.08	2.94	2.87	2.85	3.24	2.95	2.72			1.46	0.14	0.54	0.689	0.616																										
K	2.71	2.81	3.14	2.51	2.9	3.19	3.19	1.6	1.49	0.39	0.04	0.03	0.05	0.26	0.1	0.05	0.06	0.03	0.07	2.74	3.26	2.75	3.23	3.41																										
C _有	1.04	0.04	3.33	0.9	1.6	1.49	1.6	1.49	0.39	0.04	0.03	0.05	0.26	0.1	0.05	0.06	0.03	0.07	0.44	0.06	0.077	1.11	0.19	0.49																										
CO ₂	0.45	0.54	0.11	0.61	0.05	0.07	1.41	2.65	0.37	8.51	0.33	0.29	0.29	0.26	0.4	0.21	0.13	0.17	0.38	<0.50	<0.50	1.73	0.07																											
S _全	0.4	0.94	0.45	0.092	1.08	0.56	0.35	0.43	0.52	1.64	0.48	0.016	0.067	0.071	0.53	0.39	0.014	0.02	0.11	0.13	0.065	0.4	0.17																											
Fe ²⁺	1.11	0.79	0.93	1.22	1.34	0.74	0.47	0.39	0.52	0.23	0.54	0.39	0.61	0.77	0.43	0.32	0.15	0.25	0.29	0.5	0.5	0.69	0.2																											
Fe ³⁺	1.99	2.53	0.78	2.36	0.9	1.3	0.85	1.88	1.44	2.11	1.8	2.29	1.19	1.68	1.62	1.51	1.97	1.18	3.62	1.09	2	2.12	0.78																											
Fe ³⁺ /Fe ²⁺	1.8	3.2	0.8	1.9	0.7	1.8	1.8	4.8	2.8	9.2	3.3	5.9	2	2.2	3.8	4.7	13.1	4.7	12.5	2.2	4	3.1	3.9																											
S ²⁻	72.84	49.1	10.64	13.91	52.7	1.96	18	33.55	15.71	43.38	46.98	4.58	9.49	18.99	17.02	15.22	1.31	4.18	11.78	37.5	21.5	30.33	8.51																											
Eh值	682	700	645	695	643	656	700	715	708	701	699	727	715	708	701	708	731	705	712	668	694	691																												
ΔEh值	64	46	103	51	103	90	46	31	38	45	47	19	31	38	45	38	15	39	34	32	75	52	55																											
pH	8.8	9.65	6.85	9.1	5.9	7.7	9.4	9.86	9.76	8.5	9.68	9.16	9.61	9.4	9.77	9.8	9.5	9.7	9.45	9.22	9.03	9.4	8.8																											

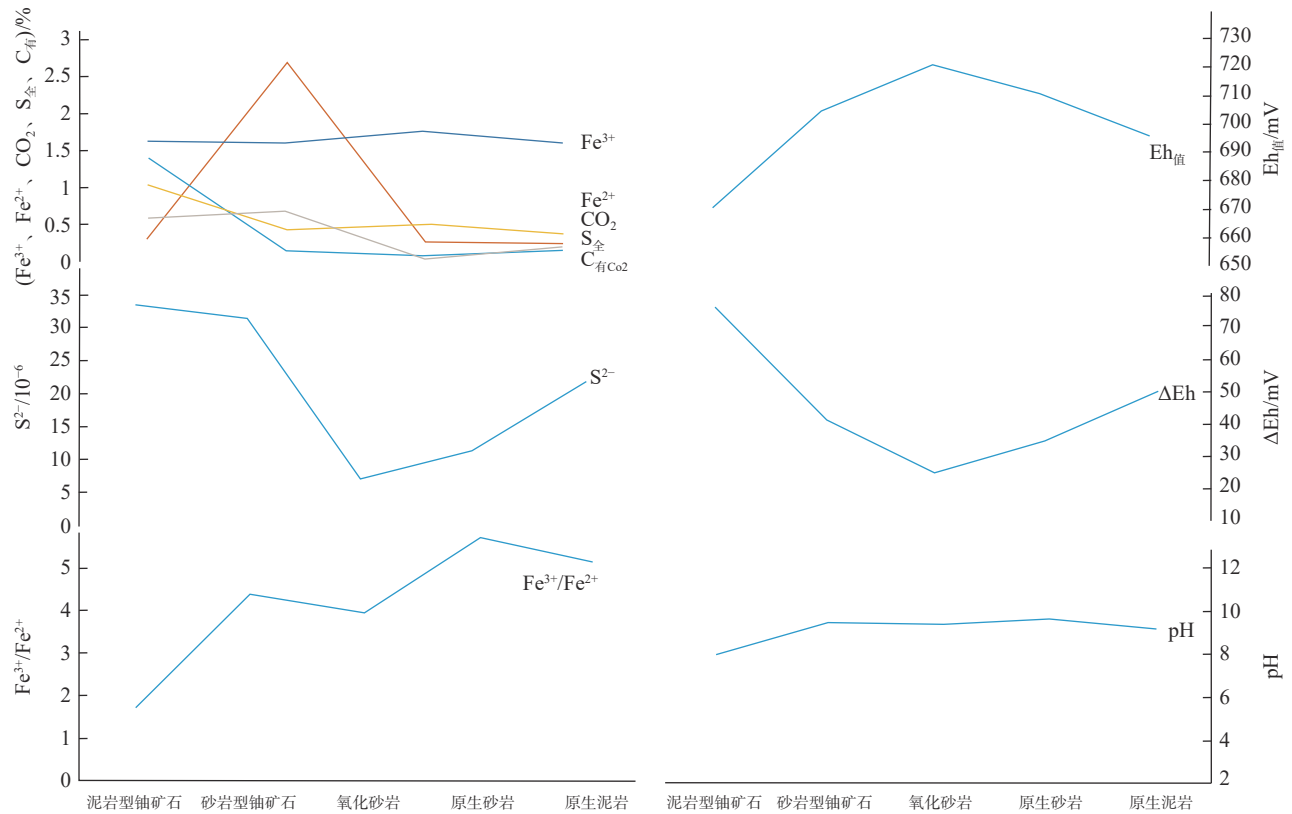


图 5 研究区赛汉组砂(泥)岩环境参数平均值变化趋势图

Fig.5 Variation trend of average environmental parameters of sandstone (mudstone) of Saihan Formation

表 5 额仁淖尔凹陷砂(泥)岩价态 U 测试结果 (10⁻⁶)

Table 5 Valence U test results of sandstone (mudstone) in Erennur Sag(10⁻⁶)

岩性	样品编号	U	U ⁶⁺	U ⁴⁺	U ⁶⁺ /U ⁴⁺
泥岩	ZKN85-1-U9	12.1	6.26	5.83	1.07
	ZKN85-1-U7	23	10.6	12.4	0.85
	ZKN85-1-U3	51	23.1	28	0.83
	YZK399-159-U8	110	52.9	56.8	0.93
	ZK淖80-U7	122	72.2	49.8	1.45
	ZK淖85X-U6	187	100	87	1.15
	ZK淖80-U4	350	65.2	285	0.23
	ZK淖85X-U1	571	329	242	1.36
砂岩	YZK399-159-U7	624	417	207	2.01
	ZK淖85X-U4	2577	512	2065	0.25
	ZK351-U11	55.5	19.8	35.7	0.55
	YZK463-319-U27	66.8	16.3	50.5	0.32
	YZK463-319-U22	942	328	614	0.53
	YZK463-319-U21	120	65.2	54.8	1.19
	ZK淖22-139-U2	154	40	114	0.35
	ZK淖22-139-U3	118	38.7	79.3	0.49

灰色不含矿泥岩具有相对高 SiO₂ 低 Al₂O₃、同时稀土总量显著亏损的特点,指示泥岩型铀矿石中铀的富集仍与氧化流体有关,同时泥岩相比砂岩具有高 P₂O₅ 的特征,暗示泥岩中生物作用的因素较大。

稀土元素配分模式显示原生砂岩相对北美页

岩具有明显的稀土亏损特征,表明存在明显的后期沉积-成岩阶段的水岩作用。氧化带和矿石带砂岩基本一致,整体表现出稀土略富集的特征。指示氧化带砂岩和矿石带砂岩水岩作用尚未达到平衡,以氧化水持续推进为特点,水岩作用的时间和强度并不强。原生灰色泥岩相对于北美页岩表现出 REE 略富集的特点,并出现明显的轻稀土富集和重稀土亏损的特点(图 4),指示其原始沉积本身具有富集的特点,相对北美页岩具有近源沉积和成分成熟度较低的特征。泥岩铀矿石则表现为明显的稀土总量较低的特点,指示其存在明显的后期水岩作用,在氧化流体作用下,造成了稀土元素的迁移。其中,大部分泥岩铀矿石表现出亏损的特点,表明水岩作用造成铀和稀土元素产生分异和富集,但其成矿作用方式仍以氧化还原作用为主。其中两个泥岩铀矿化样品与灰色泥岩稀土富集型式基本一致,指示这两个样品的铀矿化可能为同生沉积泥岩型铀矿化,吸附作用造成铀的富集。

有机碳在砂岩型铀矿石中略高,可为铀沉淀提供还原介质,砂岩型和泥岩型铀矿石中 S_全和 S²⁻均

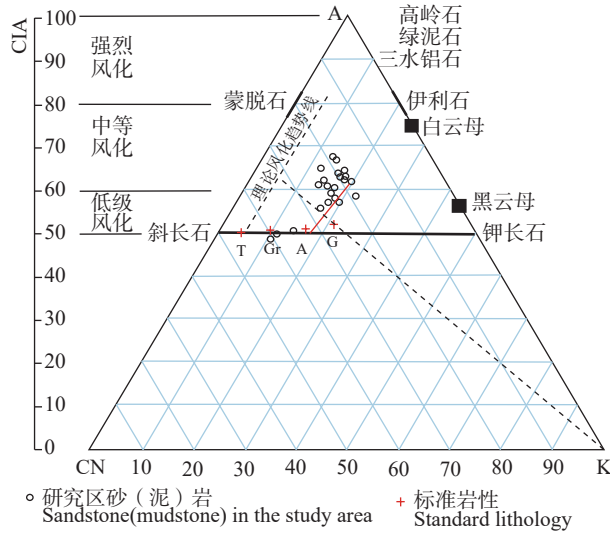


图 6 研究区赛汉组砂(泥)岩 A-CN-K 图解(底图据 Fedo et al., 1995)

T—英闪岩; Gr—花岗闪长岩; A—石英二长岩; G—花岗岩
Fig.6 A-CN-K triangle diagram for the sandstone (mudstone) of Saihan Formation in the study area (base map after Fedo et al., 1995)

T-Tonalite; Gr-Granodiorite; A-Quartz monzonite; G-Granite

远高于不含矿岩石(图 5), 指示深部烃类气体的离散参与了铀沉淀的过程, 其中砂岩矿石中明显较高的 CO₂ 含量也证实了深部流体参与了这一过程。

与砂(泥)铀矿石相比原生砂岩和泥岩均具有较高的 Fe³⁺/Fe²⁺ 比值, 说明额仁淖尔凹陷整体沉积环境为氧化环境, 还原作用仍是铀富集的主要因素。

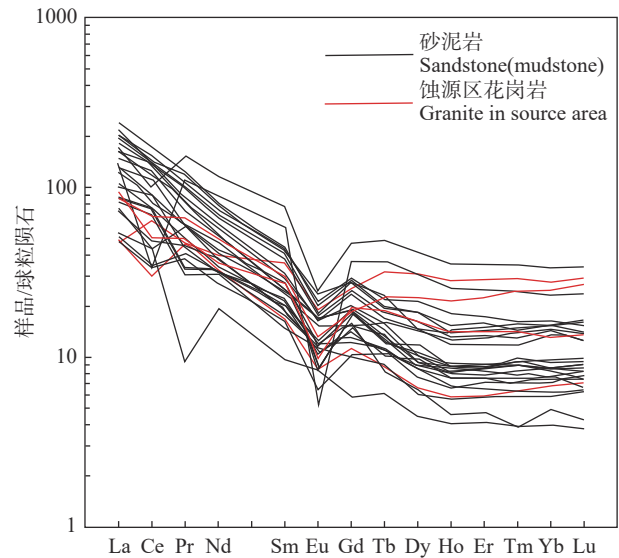
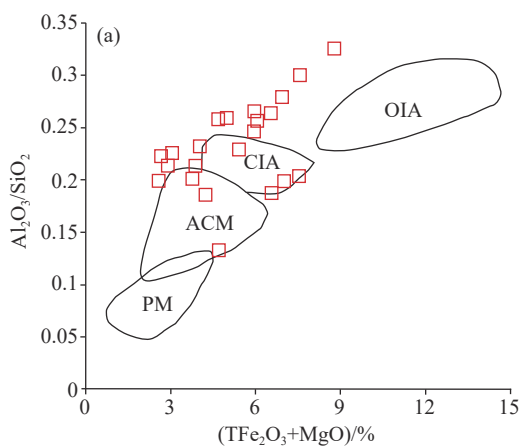


图 7 额仁淖尔凹陷赛汉组砂(泥)岩及蚀源区花岗岩稀土元素配分图(球粒陨石标准化数据据 Sun and McDonough, 1989; 蚀源区花岗岩来自于未发表数据)

Fig.7 The distribution of rare earth elements in the Saihan Formation sandstone (mudstone) and granites in erosion source area in Erennur Sag (The chondrite-normalized data according to Sun and McDonough, 1989; the granite data in the erosion source area is unpublished)

但是氧化带和矿化带的 Fe³⁺/Fe²⁺ 值很接近, 无明显的分带性, 说明水岩作用不充分, 故造成蚀变分带不清的现象。

Eh 和 pH 对铀的迁移沉淀具有重要意义, 当介质的 Eh 大于铀氧化还原临界电位(Eh_c, U)时, 铀处

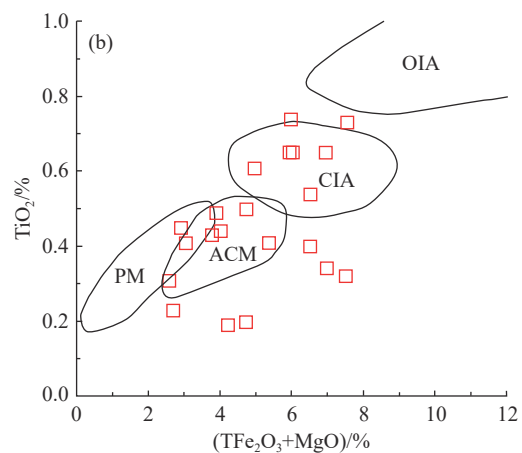


图 8 额仁淖尔凹陷赛汉组砂(泥)岩主量元素构造环境判别图解(底图据 Roser and Korsch, 1986)

OIA—大洋岛弧; CIA—大陆岛弧; ACM—活动大陆边缘; PM—被动大陆边缘

Fig.8 Major elements discrimination diagram of the Saihan Formation sandstone (mudstone) for tectonic setting in Erennur Sag (base map after Roser and Korsch, 1986)

OIA—Oceanic island arc; CIA—Continental island arc; ACM—Active continental margin; PM—Passive continental margin

于氧化环境,有利于水中铀的迁移,反之,铀则发生沉淀(刘金辉和孙占学,2004)。研究区整体上 Eh 和 pH 均较高,显示整体氧化环境和弱碱性环境,U 含量和 Eh 值及 pH 值含量均具有负相关性(图 5),铀的 Eh 沉淀区间非常高,暗示了成矿期中铀质量浓度相当高,氧化还原界面和酸碱转化界面是铀富集沉淀的主要场所。

通过对 U 的价态分析显示,研究区砂(泥)岩铀附存形式以 U^{4+} 为主,其中泥岩矿石和围岩中的 U^{6+} 所占比例较高,暗示泥岩沉积成岩时吸附了大量的铀,砂岩型铀矿则以氧化还原成矿机制为主。

6.4 矿床成因

研究区位于卫井花岗岩东侧,具有近物源沉积的特征,卫井花岗岩以中粗粒黑云母花岗岩为主,具有较高铀含量和浸出率,可为铀成矿提供充足的物源及铀源(童波林等,2017;彭云彪和鲁超,2019;李西得和刘军港,2020)。早白垩世末期的断拗转换推进赛汉组含煤粗碎屑岩建造的形成,当时气候以温暖潮湿气候为主,物源区经受了低—中等程度的化学风化,碎屑及流体中携带了大量的铀,沉积砂体中富含炭屑、黄铁矿等还原介质,使蚀源区搬运的铀得以沉淀,形成铀的预富集,部分地段可达工业品位。在研究区内以扇三角洲沉积为主,砂体联通,为成矿流体的渗入提供通道。晚白垩世到古新世,古气候变为半干旱—干旱,氧化作用发育(彭云彪和鲁超,2019),此时在燕山运动影响下二连盆地发生整体挤压抬升,在额仁淖尔西侧盆缘产生掀斜,暴露地表并接受含铀氧化流体的渗入,含铀氧化流体在运移的过程中还可以导致使砂岩中沉积成岩阶段预富集的铀活化迁移。当含氧含铀流体遇到富含炭屑和草莓状黄铁矿等还原介质的砂岩时,水中的铀在吸附和还原作用下富集成矿。与此同时,该期构造活动也造成额仁淖尔凹陷内断层和背斜的出现,深部烃类气体离散,为成矿提供外部还原介质并造成中低温环境下的金属硫化物与铀共生的现象。

7 结 论

额仁淖尔凹陷赛汉组砂(泥)岩是半干旱—半湿润古气候下沉积的一套辫状河三角洲—湖泊沉积体系,整体上以潮湿气候为主,原生泥岩沉积时期可

经历了干旱期,铀矿化泥岩可能和原生砂岩可能形成于同一沉积环境。风化强度低—中等。

赛汉组砂(泥)岩样品主要落入大陆岛弧和大陆边缘弧区以及附近,稀土元素配分曲线与蚀源区花岗岩高度一致,暗示海西期蚀源区花岗岩提供了主要的物源。

研究区整体上处于一种氧化和弱碱性环境,砂(泥)岩还原容量(有机 C, S^{2-})较高,砂岩氧化带内水岩相互作用较强,矿化带是氧化带水岩相互作用的延续,且水岩作用尚未达到平衡,以氧化水持续推进为特点,水岩作用的时间和强度不强。

吸附作用和氧化还原作用是研究区铀富集的主要机理。研究区铀矿物以吸附态和独立铀矿物为主,铀的价态以 U^{4+} 为主,其中泥岩矿石和围岩中的 U^{6+} 所占比例较高,暗示泥岩沉积成岩时吸附了大量的铀,砂岩型铀矿则以氧化还原成矿机制为主。炭屑和黄铁矿是主要的吸附介质和还原剂,同时黏土矿物也可能吸附了一定量的铀。草莓状黄铁矿与铀共生以及泥岩中较高的 P_2O_5 含量暗示生物作用对成矿有一定的影响。矿石中高 $S_{\text{全}}$ 以及 CO_2 含量,同时发现闪锌矿与铀矿物共生的现象暗示深部流体可能参与了成矿作用。

References

- Bhatia M R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. *The Journal of Geology*, 91(6): 611–627.
- Bhatia M R. 1985. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks. Provenance and tectonic control[J]. *Sedimentary Geology*, 45(1/2): 97–113.
- Bhatia M R, Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(2): 181–193.
- Charles N, Augier R, Gumiaux C, Monié P, Chen Y, Faure M, Zhu R. 2013. Timing, duration and role of magmatism in wide rift systems: Insights from the Jiaodong Peninsula (China, East Asia)[J]. *Gondwana Research*, 24: 412–428.
- Chen Junqiang, Zeng Wei, Wang Jiaying, Ma Liang, Yang Jun. 2021. Analysis of supply and demand situation of uranium resources in the world and China[J]. *North China Geology*, 44(2): 25–34 (in Chinese with English abstract).
- Chen Lulu, Tang Chao, Li Jianguo, Zhong Yanqiu, Gu Shefeng, Wei Jialin, Xiao Peng, Xu Zenglian, Zeng Hui, Liu Huajian, Chen Yin. 2018. Petrology characteristics of the uranium-bearing layer of Sifantai Formation in Daqing placanticline of Songliao basin and their geological implications[J]. *Geological Survey and Research*,

- 161(1): 33–39 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhaobo, Chen Zuyi, Li Shengxiang. 2003. Comparison of metallogenic geological characteristics between interlayer oxidation zone sandstone type and paleovalley sandstone type uranium deposits[J]. *World Nuclear Geoscience*, 20(1): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Yinhang, Jin Ruoshi, Cuney M, Petrov V A, Miao Peisen. 2024. The strata constraint large scale sandstone-type uranium mineralization in Meso-Cenozoic basins, northern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1–25. <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023299> (in Chinese with English abstract).
- Ding Bo, Liu Hongxu, Zhang Bin, Yi Chao, Liu Hongjun, Wang Gui, Ren Zhiyong. 2020. The formation mechanism of Tabular orebody 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*, 94(10): 80–88 (in Chinese with English abstract).
- Fan Xiujun, Nie Fengjun, Chen Yiping, Wang Wei. 2008. Discussion on age and paleogeographical environment of ore bearing strata for sandstone type uranium deposits in Bayanwula area, Erlian basin[J]. *Uranium Geology*, 24(3): 150–154 (in Chinese with English abstract).
- Fedo C M, Nesbitt H W, Young G. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. *Geology*, 23(10): 921–921.
- Feng Lianjun, Chu Xuele, Zhang Tonggang, Huang Jing. 2006. Liantuo sandstone: Sedimentary record of climate cooling before the great glacial age in Nanhua[J]. *Acta Petrologica Sinica*, (9): 141–147 (in Chinese with English abstract).
- 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): 1765–1787(in Chinese with English abstract).
- Floyd P A, Leveridge B E. 1987. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from Turbiditic sandstones[J]. *Journal of the Geological Society*, 144(4): 531–542.
- Guo Hongwei. 2014. Study on Metallogenic Characteristics and Metallogenic Law of Bayan Wula Uranium Deposit, Inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese).
- Haskin M A, Haskin L A. 1966. Rare earths in European shales: A redetermination[J]. *Science*, 154: 507–509.
- Hu Junjie, Ma Yinsheng, Wu Yi, Li Zongxing, Peng Bo, Wei Xiaojie. 2019. Jurassic palaeoclimate evolution of the Qaidam Basin: Evidence from chemical weathering analyses[J]. *Geological Journal of China Universities*, 25(4): 548–557 (in Chinese with English abstract).
- Hu Junjun, Nie Fengjun, Deng Juzhi, Kang Shihu. 2011. Study on occurrence state of sandstone type uranium deposit in Saihan Gaobi area, Erlian Basin[J]. *Mining Technology*, 11(2): 35–37 (in Chinese with English abstract).
- Jaireth S, McKay A, Lambert I. 2008. Association of large sandstone uranium deposits with hydrocarbons[J]. *AusGeo News*, 89: 1–6.
- Jaireth S, Roach I C, Bastrakov E, Liu S F. 2015. Basin-related uranium mineral systems in Australia: A review of critical features[J]. *Ore Geology Reviews*, 76: 360–394.
- Jiang Zhe, Han Xiaozhong, Hu Hang, Wu Zhaojian, Li Zinan, Lai Qiang, Guo Peng. 2020. Geological characteristics and ore-forming process of the engeriyin large sandstone-type uranium deposit in the manite Sag, Erlian Basin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(4): 184–195 (in Chinese with English abstract).
- Jiao Guihao, Wang Tonghe, Xing Housong. 2003. *Tectonic Evolution and Oil & Gas in the Erlian Basin*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press.
- Jin R S, Feng X X, Teng X M, Nie F J, Cao H Y, Hou H Q, Liu H X, Miao P S, Zhao H L, Chen L L, Zhu Q, Zhou X X. 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): 52–66.
- Li Huaming, Li Ling, Yang Jianxin. 2015. Grain size characteristics of clasts in the upper Saihan Formation of Bayan Wula uranium deposit, Inner Mongolia[J]. *Geological Review*, 61(S1): 333–334 (in Chinese with English abstract).
- Li Xide, Liu Jungang. 2020. Study on weathering feature of Weijing Pluton in Erlian Basin, Inner Mongolia[J]. *Uranium Geology*, 36(5): 14–23 (in Chinese with English abstract).
- Li Yuexiang, Yu Jinshui, Qin Mingkuan, Chen Daisheng, Cao Jianying, Wei Sanyuan. 2009. Exploration orientation of leachable sandstone type uranium deposit in Erlian basin[J]. *Uranium Geology*, 25(6): 20–25 (in Chinese with English abstract).
- Li Ziyang, Chen Anping, Fang Xiheng, Ou Guangxi, Xia Yuliang, Sun Ye. 2010. Origin and superposition metallogenic model of the sandstone-type uranium deposit in the northeastern Ordos basin, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 745–749.
- Liu Dameng, Yang Qi, Zhou Chunguang, Tang Dazhen, Kang Xidong. 1999. Occurrence and geological genesis of Pyrites in Late Paleozoic coals in North China[J]. *Geochimica*, 28(4): 340–350 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hanbin, Xia Yuliang, Lin Jinrong, Fan Guang. 2004. Isotope geology of the sandstone type uranium deposit in Turpan-Hami Basin[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 25(2): 196–198 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jinhui, Sun Zhanxue. 2004. A new method to determine the position of sandstone type uranium ore-body-Water rock system Eh-pH method[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 34(1): 44–48 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wusheng, Kang Shihu, Jia Licheng, Shi Qingping, Peng Cong. 2013. Characteristics of paleo-valley sandstone type uranium mineralization in the middle of Erlian Basin[J]. *Uranium Geology*, 29(6): 328–335 (in Chinese with English abstract).

- Liu Wusheng, Kang Shihu, Zhao Xingqi, Shi Qingping, Zhang Zinan. 2015. Metallogenic mechanism and prospecting direction of paleochannel sandstone type uranium deposit in the middle of Erlian Basin[J]. *Uranium Geology*, 31(1): 40–51 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wusheng, Zhao Xingqi, Kang Shihu, Shi Qingping, Zhang Zinan. 2018. Inversion structure and its relationship with sandstone type uranium metallization in Erlian Basin[J]. *Uranium Geology*, 34(2): 81–89 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaoxue, Tang Chao, Sima Xianzhang, Zhu Qiang, Li Guangyao, Chen Yin, Chen Lulu. 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): 169–176 (in Chinese with English abstract).
- Lu Chao, Jiao Yangquan, Peng Yunbiao, Yang Jianxin, Chen Fazheng. 2016. Effect of the episodic rifting in the western Manite Sag in Erlian Basin on sandstone-type uranium mineralization[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(12): 3483–3491 (in Chinese with English abstract).
- Lu Chao, Peng Yunbiao, Liu Xinyang, Jiao Yangquan, Yang Jianxin, Chen Fazheng, Shen Kefeng, Li Ronglin. 2013. Sedimentary backgrounds of sandstone type uranium deposits in Western Manite Sag of Erlian Basin[J]. *Uranium Geology*, 29(6): 336–343 (in Chinese with English abstract).
- Lu Chao. 2019. Tectonic Ore Controlling Mechanism and Metallogenic Model of Bayanwula Uranium Ore Field in Erlian Basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Luo Yi, He Zhongbo, Ma Hanfeng, Sun Xiang. 2012. Metallogenic characteristics of Qianjiadian sandstone uranium deposit in Songliao basin[J]. *Mineral Deposits*, 31(2): 391–400 (in Chinese with English abstract).
- Mao Shidong, Yang Rongsheng, Qin Yan, Guo Junhua. 2009. Characteristics of gold-bearing mineral and occurrence of gold in the Yangshan gold field, Gansu Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2776–2790 (in Chinese with English abstract).
- McLennan S M, Hemming S R, Taylor S R, Eriksson K A. 1995. Early Proterozoic crustal evolution: Geochemical and Nd Pb isotopic evidence from metasedimentary rocks, southwestern North America[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(6): 1153–1177.
- McLennan S M, Taylor S R, McCulloch M T, Maynard J B. 1990. Geochemical and Nd–Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: Crustal evolution and plate tectonic associations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(7): 2015–2050.
- Miao Peisen, Chen Yin, Cheng Yinhang, Zhao Hualei, Chen Lulu, Li Jianguo, Jin Ruoshi, Tang Chao, Yu Reng'an, Yang Tao, Hu Yongxing. 2020. New deep exploration discoveries of sandstone-type Uranium deposits in North China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(4): 563–575 (in Chinese with English abstract).
- Min Maozhong, Peng Xinjian, Wang Guo, Yin Jianhua. 2006. Existing state of uranium in ore from interlayer oxidation zone sandstone-hosted uranium deposits, NW China[J]. *Uranium Geology*, 22(4): 193–201 (in Chinese with English abstract).
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 299(5885): 715–717.
- Nie Fengjun. 2010. Paleochannel Sandstone Type Uranium Deposit in Erlian Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Nie Fengjun, Chen Anping, Hu Qinghua, Shen Kefeng, Qin Minkuan, Li Mangen, Li Meizhu. 2007. Discussion on the Early Cretaceous sandstone type uranium deposits, Erlian Basin, Inner Mongolia[J]. *Journal of Stratigraphy*, 31(3): 272–279 (in Chinese with English abstract).
- Nie Fengjun, Lin Shuangxing, Yan Zhaobin, Rao Minghui, Zhang Chengyong, Yan Yongjie. 2010. Hydrothermal mineralization of uranium in sandstone, Teguida, Niger[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(6): 819–831 (in Chinese with English abstract).
- Nie Fengjun, Yan Zhaoshan, Li Manyin, Peng Yunbiao, Xia Fei. 2019. Multi Type Uranium Deposit in Erlian Rift Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Peng Yunbiao, Jiao Yangquan, Zhang Jindai, Kang Shihu. 2015. Synsedimentary Mudstone-Type Uranium Deposit – Analysis of the typical Nuheting super-large uranium deposit in the Erlian Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Peng Yunbiao, Li Huaming, Li Ling, Kang Shihu. 2018. Influence of paleoclimate transition on the mineralization of sandstone-type uranium deposit: A case study of 2081 uranium deposit in the Erlian Basin, Inner Mongolia China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 38(5): 490–498 (in Chinese with English abstract).
- Peng Yunbiao, Lu Chao. 2019. Metallogenic model of sandstone-type uranium deposits in the lower section of Saihantala Formation, Western Ulancharu Depression, Erlian Basin[J]. *Northwestern Geology*, 52(3): 46–57 (in Chinese with English abstract).
- Qi Tianjiao, Li Xide, Liu Xu, Lü Yonghua, Xu Bixia. 2020. Geochemical characteristics of the hosting rocks in Manglai sandstone-type uranium deposit, Erlian Basin[J]. *Uranium Geology*, 36(5): 40–50 (in Chinese with English abstract).
- Ren J, Tamaki K, Li S, Zhang J. 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas[J]. *Tectonophysics*, 344: 175–205.
- Ren Jianye, Li Sitian, Jiao Guihao. 1998. Extensional tectonic system of Erlian fault basin group and its deep background[J]. *Earth Science— Journal of China University of Geosciences*, 23(6): 567–572 (in Chinese with English abstract).
- Roser B P, Korsch R J. 1986. Determination of tectonic setting of sandstone–mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio[J]. *Journal of Geology*, 94(5): 635–650.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society of London Special Publications*, 42: 313–345.
- Tang Chao, Xiao Peng, Wei Jialin, Xu Zenglian, Liu Huajian, Zhao Lijun. 2021. Geological and geochemical characteristics of uranium

- mineralization in Anding Formation in Zhidan Area, Ordos basin[J]. *North China Geology*, 44(2): 4–13.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. The continental crust: Its composition and evolution: An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks[J]. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Tong Bolin, Tang Dawei, Liu Bo. 2017. Paleovalley tectonic formation and uranium prospecting model in Wulanchabu sag, Erlian Basin[J]. *Western Resources*, (2): 21–25 (in Chinese).
- Wang Zhengbang. 2002. Current status and prospects of uranium geology developments of foreign in-situ leachable sandstone type uranium deposits[J]. *Uanium Geology*, 18(1): 9–21 (in Chinese with English abstract).
- Wei Sanyuan, Qin Mingkuan, Li Yuexiang, He Zhongbo, Chen Anping, Shen Kefeng, Cao Jianying. 2006. Tectono-sedimentary evolution of Erlian basin since Late Mesozoic and sandstone-hosted uranium metallogenesis[J]. *Uranium Geology*, 22(2): 76–82 (in Chinese with English abstract).
- Wen Sibao, Zhu Qiang, Cheng Yinhang. 2023. The northwestern boundary location on Langshan area of North China Craton and its tectonic significance[J]. *North China Geology*, 46(3): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Sun D Y, Lin Q. 1999. Petrogenesis of the Phanerozoic granites and crustal growth in northeast China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 181–189.
- Yu R G, Wang S B, Zhu Q, Si Q H, Teng X M, Liu X X, Liu H N, Tang Y X. 2021. Zircon U–Pb ages and provenance characteristic of sandstone from Zhiluo Formation and debating of formation background of uranium deposit in Huangling area, Ordos Basin, China[J]. *China Geology*, 4(1): 1–16.
- Zhang Bo, Li Jianguo, Miao Peisen, Zhao Long, Si Qinghong, Li Hongliang, Cao Minqiang, Zhu Qiang, Wei Jialin. 2021. The occurrence state and origin of uranium in Qianjiadian uranium deposit, Kailu Basin[J]. *North China Geology*, 44(2): 40–48 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guangrong, Nie Haikuan, Tang Xuan, Du Wei, Sun Chuanxiang, Chen Song. 2020. Pyrite type and its effect on shale gas accumulation: A case study of Wufeng–Longmaxi shale in Sichuan Basin and its periphery[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 42(3): 459–466 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jindai. 2015. Major Progress and Breakthrough in Uranium Exploration in China Since The Beginning of the New Century–Major Progress and Breakthrough in Uranium Exploration in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 3–19 (in Chinese).
- Zhang Tianfu, Sun Lixin, Zhang Yun. 2016. Geochemical characteristics of the Jurassic Yan'an and Zhiluo Formations in the northern margin of Ordos Basin and their paleoenvironmental implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(12): 3454–3472 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Tianfu, Zhang Yun, Miao Peisen, Yu Reng'an, Li Jianguo, Jin Ruoshi, Sun Lixin. 2018. Study on the chemical index of alteration of the Middle and Late Jurassic Strata in the western margin of Ordos basin and its implications[J]. *Geological Survey and Research*, 41(4): 258–262, 279 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Weijie, Li Shujing. 1998. Petrological characteristics and age of the Gejigeyin volcanic edifice on the western margin of the Abag basalt in the Xinlin Gol League, Inner Mongolia[J]. *Regional Geology of China*, 17(4): 25–29 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wendong, Liu Wusheng, Zhang Zinan, Shi Qingping, Liu Chiheng. 2020. Geochemical characteristics of Hadatu paleo channel sandstone type uranium deposit in Erlian Basin[J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 152(4): 27–38 (in Chinese with English abstract).
- Zhao H L, Li J G, Xiao Z B, Miao P S, Si Q H, Chen L L, Yu R G, Chen Yin. 2021. Determination of formation age of the Pengyang sandstone-type uranium deposit in the Ordos Basin, China: Using in situ femtosecond LA–MC–ICP–MS method[J]. *China Geology*, 4(4): 2.
- Zhao Lijun, Liu Xiaoxue, Zhang Chao, Feng Ping, Si Dan. 2023. Analysis on the metallogenic conditions and prospecting direction of sandstone-type uranium deposits in Yuejin area northwestern margin of Qaidam Basin[J]. *North China Geology*, 46(3): 12–20 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈军强, 曾威, 王佳营, 马亮, 杨君. 2021. 全球和我国铀资源供需形势分析[J]. *华北地质*, 44(2): 25–34.
- 陈路路, 汤超, 李建国, 钟延秋, 谷社峰, 魏佳林, 肖鹏, 徐增连, 曾辉, 刘华建. 2018. 松辽盆地大庆长垣南端四方台组含铀砂岩岩石学特征及地质意义[J]. *地质调查与研究*, 161(1): 33–39.
- 陈肇博, 陈祖伊, 李胜祥. 2003. 层间氧化带砂岩型与古河谷砂岩型铀矿成矿地质特征对比[J]. *世界核地质科学*, 20(1): 1–10.
- 程银行, 金若时, Cuney M, Petrov V A, 苗培森. 2024. 中国北方盆地大规模铀成矿作用: 地层篇 [J]. *地质学报*, 1–25. <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023299>.
- 丁波, 刘红旭, 张宾, 易超, 刘洪军, 王贵, 任志勇. 2020. 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*, 94(10): 80–88.
- 凡秀君, 聂逢君, 陈益平, 王维. 2008. 二连盆地巴彦乌拉地区砂岩型铀矿含矿地层时代与古地理环境探讨[J]. *铀矿地质*, 24(3): 150–154.
- 冯连君, 储雪蕾, 张同钢, 黄晶. 2006. 莲沱砂岩——南华大冰期前气候转冷的沉积记录[J]. *岩石学报*, 22(9): 141–147.
- 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): 1765–1787.
- 郭宏伟. 2014. 内蒙古巴彦乌拉铀矿床成矿特征及成矿规律研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 胡俊杰, 马寅生, 吴祎, 李宗星, 彭博, 魏小洁. 2019. 柴达木盆地侏罗纪古气候演变过程: 来自化学风化特征的证据[J]. *高校地质学报*, 25(4): 548–557.
- 胡珺珺, 聂逢君, 邓居智, 康世虎. 2011. 二连盆地赛汉组高毕地区砂岩

- 型铀矿赋存状态研究[J]. *采矿技术*, 11(2): 35-37.
- 蒋喆, 韩效忠, 胡航, 吴兆剑, 李紫楠, 来强, 郭鹏. 2020. 二连盆地恩格日音砂岩型铀矿床地质特征及成矿作用初探[J]. *大地构造与成矿学*, 44(4): 184-195.
- 焦贵浩, 王同和, 邢厚松. 2003. 二连裂谷构造演化与油气[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 李华明, 李玲, 杨建新. 2015. 内蒙古巴彦乌拉铀矿床赛汉组上段碎屑物粒度特征研究[J]. *地质论评*, 61(S1): 333-334.
- 李西得, 刘军港. 2020. 二连盆地卫镜岩体风化作用地球化学特征研究[J]. *铀矿地质*, 36(5): 14-23.
- 李月湘, 于金水, 秦明宽, 陈戴生, 曹建英, 卫三元. 2009. 二连盆地可地浸砂岩型铀矿找矿方向[J]. *铀矿地质*, 25(6): 20-25.
- 李子颖, 陈安平, 方锡珩, 欧光习, 夏毓亮, 孙晔. 2010. 鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿床成因和叠合成矿模式[J]. *世界核地质科学*, 27(3): 177-177.
- 刘大猛, 杨起, 周春光, 汤达祯, 康西栋. 1999. 华北晚古生代煤中黄铁矿赋存特征与地质成因研究[J]. *地球化学*, 28(4): 340-350.
- 刘汉彬, 夏毓亮, 林锦荣, 范光. 2004. 吐哈盆地砂岩型铀矿 U-Pb 同位素地质特征[J]. *地球学报*, 25(2): 196-198.
- 刘金辉, 孙占学. 2004. 确定砂岩型铀矿体定位新方法——水岩体系 Eh-pH 法[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 34(1): 44-48.
- 刘武生, 康世虎, 贾立城, 史清平, 彭聪. 2013. 二连盆地中部古河道砂岩型铀矿成矿特征[J]. *铀矿地质*, 29(6): 328-335.
- 刘武生, 康世虎, 赵兴齐, 史清平, 张梓楠. 2015. 二连盆地中部古河道砂岩型铀矿成矿机理及找矿方向[J]. *铀矿地质*, 31(1): 164-175.
- 刘武生, 赵兴齐, 康世虎, 史清平, 张梓楠. 2018. 二连盆地反转构造与砂岩型铀矿成矿作用[J]. *铀矿地质*, 34(2): 81-89.
- 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): 169-176.
- 鲁超, 焦养泉, 彭云彪, 杨建新, 陈法正. 2016. 二连盆地马尼特拗陷西部幕式裂陷作用对铀成矿的影响[J]. *地质学报*, 90(12): 3483-3491.
- 鲁超, 彭云彪, 刘鑫扬, 焦养泉, 杨建新, 陈法正, 申科峰, 李荣林. 2013. 二连盆地马尼特拗陷西部砂岩型铀矿成矿的沉积学背景[J]. *铀矿地质*, 29(6): 336-343.
- 鲁超. 2019. 二连盆地巴彦乌拉铀矿田构造控矿机制和成矿模式[D]. 武汉: 中国地质大学.
- 罗毅, 何中波, 马汉峰, 孙祥. 2012. 松辽盆地钱家店砂岩型铀矿成矿地质特征[J]. *矿床地质*, 31(2): 391-400.
- 毛世东, 杨荣生, 秦艳, 郭俊华. 2009. 甘肃阳山金矿田载金矿物特征及金赋存状态研究[J]. *岩石学报*, 25(11): 2776-2790.
- 苗培森, 陈印, 程银行, 赵华雷, 陈路路, 李建国, 金若时, 汤超, 俞初安, 杨涛, 胡永兴. 2020. 中国北方砂岩型铀矿深部探测新发现及其意义[J]. *大地构造与成矿学*, 44(4): 563-575.
- 闵茂中, 彭新建, 王果, 殷建华. 2006. 我国西北地区层间氧化带砂岩型铀矿床中铀的赋存形式[J]. *铀矿地质*, 22(4): 193-201.
- 聂逢君. 2010. 二连盆地古河道砂岩型铀矿[M]. 北京: 地质出版社.
- 聂逢君, 陈安平, 胡青华, 申科峰, 秦明宽, 李满根, 姜美珠. 2007. 内蒙古二连盆地早白垩世砂岩型铀矿目的层时代探讨[J]. *地层学杂志*, 31(3): 272-279.
- 聂逢君, 林双幸, 严兆彬, 饶明辉, 张成勇, 严永杰. 2010. 尼日尔特吉达地区砂岩中铀的热流体成矿作用[J]. *地球学报*, 31(6): 819-831.
- 聂逢君, 严兆彬, 李满根, 彭云彪, 夏菲. 2019. 二连裂陷盆地“同盆多类型”铀矿[M]. 北京: 地质出版社.
- 彭云彪, 焦养泉, 张金带, 康世虎. 2015. 同沉积泥岩型铀矿床——二连盆地超大型努和廷铀矿床典型分析[M]. 北京: 地质出版社.
- 彭云彪, 李华明, 李玲, 康世虎. 2018. 古气候转换对砂岩型铀矿成矿的影响——以内蒙古二连盆地 2081 砂岩型铀矿床为例[J]. *矿物学报*, 38(5): 490-498.
- 彭云彪, 鲁超. 2019. 二连盆地乌兰察布拗陷西部赛汉塔拉组下段砂岩型铀矿成矿模式[J]. *西北地质*, 52(3): 46-57.
- 齐天骄, 李西得, 刘旭, 吕永华, 许碧霞. 2020. 二连盆地芒来铀矿赋矿砂岩地球化学特征[J]. *铀矿地质*, 36(5): 40-50.
- 任建业, 李思田, 焦贵浩. 1998. 二连盆地群伸展构造系统及其发育的深部背景[J]. *地球科学*, 23(6): 567-572.
- 汤超, 肖鹏, 魏佳林, 徐增连, 刘华建, 赵丽君. 2021. 鄂尔多斯盆地志丹地区安定组铀矿化地质地球化学特征[J]. *华北地质*, 44(2): 4-13.
- 童波林, 唐大伟, 刘波. 2017. 二连盆地乌兰察布凹陷古河谷构造建造及铀矿找矿模式[J]. *西部资源*, (2): 21-25.
- 王正邦. 2002. 国外地浸砂岩型铀矿地质发展现状与展望[J]. *铀矿地质*, 18(1): 9-21.
- 卫三元, 秦明宽, 李月湘, 何中波, 陈安平, 申科峰, 曹建英. 2006. 二连盆地晚中生代以来构造-沉积演化与铀成矿作用[J]. *铀矿地质*, 22(2): 76-82.
- 文思博, 朱强, 程银行. 2023. 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿成矿时代及铀富集时空规律[J]. *华北地质*, 46(3): 1-11.
- 张博, 李建国, 苗培森, 赵龙, 司庆红, 里宏亮, 曹民强, 朱强, 魏佳林. 2021. 开鲁盆地钱家店铀矿床铀的赋存状态及成因探[J]. *华北地质*, 44(2): 40-48.
- 张光荣, 聂海宽, 唐玄, 杜伟, 孙川翔, 陈松. 2020. 页岩中黄铁矿类型及其对页岩气富集的影响——以四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组页岩为例[J]. *石油实验地质*, 42(3): 459-466.
- 张金带. 2015. 进入新世纪以来我国铀矿勘查的重大进展和突破——我国铀矿勘查的重大进展和突破[M]. 北京: 地质出版社, 3-19.
- 张天福, 孙立新, 张云, 程银行, 李艳锋, 马海林, 鲁超, 杨才, 郭根万. 2016. 鄂尔多斯盆地北缘侏罗纪延安组、直罗组泥岩微量、稀土元素地球化学特征及其古沉积环境意义[J]. *地质学报*, 90(12): 3454-3472.
- 张天福, 张云, 苗培森, 俞初安, 李建国, 金若时, 孙立新. 2018. 鄂尔多斯盆地西缘中晚侏罗世地层化学蚀变指数(CIA)研究及其意义[J]. *地质调查与研究*, 41(4): 258-262, 279.
- 张维杰, 李述靖. 1998. 内蒙古格吉格音乌拉火山机构的岩石特征及时代[J]. *中国区域地质*, 17(4): 25-29.
- 张文东, 刘武生, 张梓楠, 史清平, 刘持恒. 2020. 二连盆地哈达图古河道砂岩型铀矿成矿地球化学特征研究[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 152(4): 27-38.
- 赵丽君, 刘晓雪, 张超, 冯平, 司丹. 2023. 柴达木盆地西北缘跃进地区砂岩型铀矿成矿条件和潜力分析[J]. *华北地质*, 46(3): 12-20.