

doi: 10.12029/gc20220401

李子颖, 刘武生, 李伟涛, 李西德, 秦明宽, 蔡煜琦, 张云龙, 何升, 吴曲波, 邱林飞, 刘持恒, 朱鹏飞, 纪宏伟, 郭建. 2022. 内蒙古二连盆地哈达图砂岩铀矿渗出铀成矿作用[J]. 中国地质, 49(4): 1009–1047.

Li Ziyang, Liu Wusheng, Li Weitao, Li Xide, Qin Mingkuan, Cai Yuqi, Zhang Yunlong, He Sheng, Wu Qubo, Qiu Linfei, Liu Chiheng, Zhu Pengfei, Ji Hongwei, Guo Jian. 2022. Exudative metallogeny of the Hadatu sandstone-type uranium deposit in the Erlian Basin, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 49(4): 1009–1047(in Chinese with English abstract).

内蒙古二连盆地哈达图砂岩铀矿渗出铀成矿作用

李子颖, 刘武生, 李伟涛, 李西德, 秦明宽, 蔡煜琦, 张云龙, 何升,
吴曲波, 邱林飞, 刘持恒, 朱鹏飞, 纪宏伟, 郭建

(核工业北京地质研究院, 北京 100029)

摘要: [研究目的] 哈达图铀矿床是产于二连盆地下白垩统赛汉组上段的一个特大型砂岩型铀矿床, 其与传统砂岩铀矿特点不同, 矿体呈多层板状, 控矿灰色砂体具“两黄夹一灰”特征, 传统的渗入(潜水氧化、层间氧化)砂岩型铀成矿理论难以解释, 阐明其成因和控矿要素对创新砂岩铀成矿理论与红杂色砂岩中铀矿找矿均具有重大意义。[研究方法] 采用野外和室内、宏观和微观相结合, 主要包括野外观察、区域地质、构造学、沉积学、岩石学、矿物学、地球化学(元素、有机、同位素)、地震解释和铀矿床学等方法。[研究成果] 阐明了矿床矿体、控矿灰色砂体和矿化特征, 指出研究区红杂色建造赛汉组上段、二连组和伊尔丁曼哈组为原生氧化建造成因, 主含矿层赛汉组上段控矿灰色砂体是深部还原性流体对其再还原的结果, 主要受连通深部的断裂构造及相关河道或不整合面控制, 属后生改造成因, 从成矿铀源、深部渗出流体的形成、铀的迁移和沉淀阐述了砂岩渗出铀成矿作用机制, 提出哈达图砂岩铀矿床主要是渗出铀成矿作用形成, 建立了相应的渗出铀成矿模式。[结论] 发现揭示了红杂色砂岩形成砂岩铀矿一种新的铀成矿作用——渗出铀成矿作用, 并由此提出了在红杂色沉积建造中寻找砂岩铀矿“上红下黑、上下连通、红中找灰、灰中找矿”预测评价的新思路, 指出针对红杂色沉积建造砂岩铀矿找矿新层位, 在找矿空间上可由盆缘拓展到盆中、由浅部拓展到深部。

关键词: 内蒙古; 二连盆地; 哈达图; 砂岩型铀矿; 渗出铀成矿作用; 成矿模式; 红杂色沉积建造; 矿产勘查工程
创 新 点: 阐明控矿灰色砂体是深部还原性流体再还原的结果, 属后生改造成因; 提出了红杂色砂岩形成砂岩铀矿新的渗出铀成矿作用, 建立了哈达图砂岩铀矿渗出铀成矿模式; 提出了在红杂色沉积建造中寻找砂岩铀矿预测评价的新思路。

中图分类号: P619.14 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)04-1009-39

Exudative metallogeny of the Hadatu sandstone-type uranium deposit in the Erlian Basin, Inner Mongolia

LI Ziyang, LIU Wusheng, LI Weitao, LI Xide, QIN Mingkuan, CAI Yuqi, ZHANG Yunlong,
HE Sheng, WU Qubo, QIU Linfei, LIU Chiheng, ZHU Pengfei, JI Hongwei, GUO Jian

收稿日期: 2022-06-19; 改回日期: 2022-07-25

基金项目: 国家自然科学基金重点基金“砂岩型铀矿铀及伴生元素与有机质迁移富集机理”(U2167210)、中核集团集中研发项目“第四代铀矿勘查关键技术研究”和“二连铀矿基地勘查关键技术研究”共同资助。

作者简介: 李子颖, 男, 1964年, 博士, 研究员, 长期从事铀矿地质科研与找矿工作; E-mail: zyl9818@126.com。

(Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing, 100029, China)

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

[Objective] The Hadatu uranium deposit is a giant uranium deposit that occurs in the upper part of the early Cretaceous Saihan Formation in the Erlian Basin. Unlike traditional sandstone-type uranium deposits, the Hadatu uranium orebody exhibits stratiform and tabular shape, and the ore-controlling grey sandstone body is surrounded by red mottled oxidized sandstone. It is difficult to explain the genesis of the Hadatu uranium deposit with the traditional infiltration (phreatic and interlayer oxidization-reduction) metallogenic theory of sandstone-type uranium deposits. Therefore, identification of the ore genesis and ore-controlling factors of the Hadatu uranium deposit becomes very significant to the innovations of metallogenic theory for sandstone-type uranium deposits and to uranium prospecting in red mottled sandstone. **[Methods]** Both fieldwork and lab analysis were conducted, and macro- and micro-observations were made. Adopted methods include field observations, regional geology, tectonics, sedimentology, petrology, mineralogy, geochemistry (i.e. element, organic and isotopic analysis), seismic interpretation and uranium metallogenic studies, etc. **[Results]** The signatures of the orebody, ore-controlling grey sandstone body and the metallogenic characteristics of the Hadatu uranium deposit are clarified. It is evidenced that the upper part of the red mottled Saihan Formation, Erlian Formation and the Irдин Manha Formation are of the primary oxidization origin, whereas the ore-controlling grey sandstone body in the ore-bearing Saihan Formation is of epigenetic origin, resulted from secondary reduction through deep-seated reducing fluids that are mainly controlled by the fault structures and pertinent river channels or unconformities. Based on the analysis of the ore-forming uranium source, fluids deriving from the depth and their transportation and precipitation of the uranium, this paper demonstrates a new exudative uranium metallogeny. The authors propose that Hadatu sandstone-type uranium deposit occurs predominantly by exudative uranium metallogeny and correspondingly establishes the exudative uranium metallogenic model. **[Conclusions]** The exudative uranium metallogeny, as a new kind of uranium metallogeny in red mottled sandstone-type uranium deposits, has been established. The new methods to identify uranium mineralization in red mottled sandstone have been concluded, i.e. “combining the information of the upper red and lower black sedimentary formation, connecting pathways of the upper red formation with lower black one, finding grey sandstone body in red mottled formation and uranium in the grey sandstone body”. The perspective of sandstone-type uranium deposits in red mottled sedimentary formation has been pointed out and new prospecting area from margins to the center of the basin and from near surface to deeper strata have been expanded.

Key words: Inner Mongolia Erlian Basin; Hadatu; sandstone-type uranium deposit; exudative uranium metallogeny; metallogenic model; Red mottled sedimentary formation; mineral exploration engineering

Highlights: Illustrated that the ore-controlling grey sandstone body is of epigenetic origin, resulted from secondary reduction of deep-seated reducing fluids. The authors also propose a new exudative uranium metallogeny in red mottled sandstone and establishes the exudative uranium metallogenic model for Hadatu uranium deposit. Furthermore, the new exploration and evaluation methods to identify uranium mineralization in red mottled red sandstone have been concluded.

About the first author: LI Ziyang, male, born in 1964, Ph.D., professor, engaged in the uranium geology and exploration; E-mail: zyli9818@126.com.

Fund support: Supported by NSFC-funded Key Project “Migration and enrichment mechanism of uranium and its associated elements of sandstone type uranium deposit” (U2167210), “Key technology and application of the fourth generation uranium exploration” and “Key uranium exploration technology and application in Erlian basin” funded By China National Nuclear Corporation.

1 引 言

哈达图铀矿床产于内蒙古二连盆地格日勒敖都一齐哈日格图凹陷,是近年来发现的特大型铀矿床,产出于下白垩统赛汉组上段。它具有品位高,

规模大的特点,与传统砂岩型铀矿不同的显著特征是矿体受灰色砂体控制,具“两黄夹一灰”的特点,即剖面上显示控制铀矿化灰色砂体的上下左右均是氧化色砂岩,灰色砂体呈孤岛状、串珠状或朵状,矿体主要呈板状,并具多层性。有关其成因机制受

到铀矿地质工作者广泛关注,并提出了多种成因观点,如氧化还原成矿(康世虎等,2017;吕永华等,2021)、古河道型铀矿(刘武生等,2015;康世虎等,2017)、热改造成矿(聂逢君等,2017)等,但主要还是传统上的渗入型氧化还原成矿观点。基于对该矿床产出的地质背景、构造演化、矿床特征、矿物和元素与有机地球化学特征、成矿流体及同位素年代学等的系统研究,提出了该矿床主要为深部渗出流体成矿作用形成,认为深部富铀沉积建造产生的含铀还原性流体沿断裂、不整合面或下切的河道砂体运移至氧化建造的杂色砂体中,由于温压和酸碱度变化、氧化、物理化学条件的改变等,富铀富有机质深部渗出流体中携带的成矿物质降解、分解、氧化等,使铀等元素产生沉淀富集成矿,并建立了相应的成矿模式。中国类似二连盆地哈达图地区的沉积建造分布广泛,渗出铀成矿作用可很好地解释哈达图矿床板状矿体成因、矿化灰色砂体“悬空”于黄色砂体之中、矿体呈多层位于灰色砂体或“两黄夹一灰”的特征和超常富集特点等,总结了关键控矿要素,不仅提出了一种新的砂岩型铀成矿机理,创新发展了砂岩型铀成矿理论,而且对指导红杂色沉积建造中砂岩型铀矿找矿、拓展新的找矿层位和找矿空间具有重大实际意义。

2 地质构造背景

二连盆地位于内蒙古中部,大地构造位置上处于西伯利亚板块与华北板块缝合线部位,是在天山—兴蒙造山系的基础上,经燕山期拉张翘断构造应力场作用而发育起来的大型中、新生代断陷—坳陷型叠合沉积盆地(马杏垣等,1983;漆家福等,2015;赵贤正等,2015)。盆地面积约11万 km^2 ,总体走向为北东向,向西和向南逐渐变为北东东和近东西向。盆地东界为大兴安岭隆起,北界为巴音宝力格隆起,南界为温都尔庙隆起,西界为狼山隆起(图1)。二连盆地可划分为“五坳一隆”6个构造单元,分别为北部的川井坳陷、乌兰察布坳陷、马尼特坳陷和南部的腾格尔坳陷、乌尼特坳陷及中部的苏尼特隆起,其又可分为53个次级凹陷和22个次级凸起,盆地结构多样复杂。

哈达图铀矿床产于乌兰察布坳陷,该坳陷包括11个次级凹陷,总体走向为北东向(图2)。坳陷内的基底埋深相对变化较大,一般1000~4000 m,其中3个次级凹陷埋深大于3000 m,分别为呼格吉勒图、脑木跟和额仁淖尔凹陷,基底埋深2000~3000 m的次级凹陷主要有格日勒敖都、准棚、卫井及齐哈日格图,基底埋深1000~2000 m的凹陷主要有古托勒

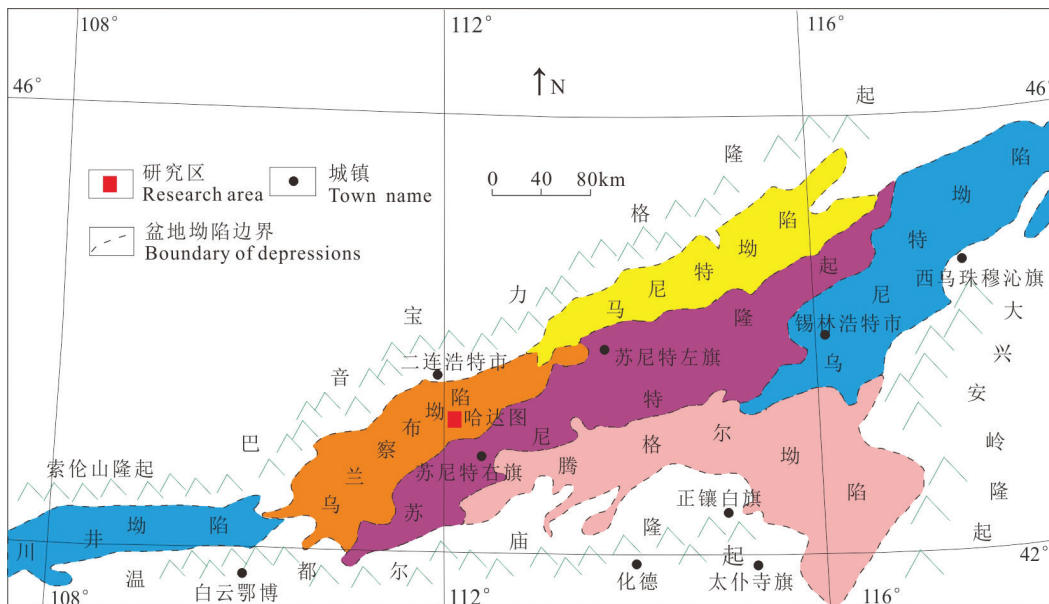


图1 二连盆地构造分区略图

Fig.1 Depression sketch map of the Erlian basin

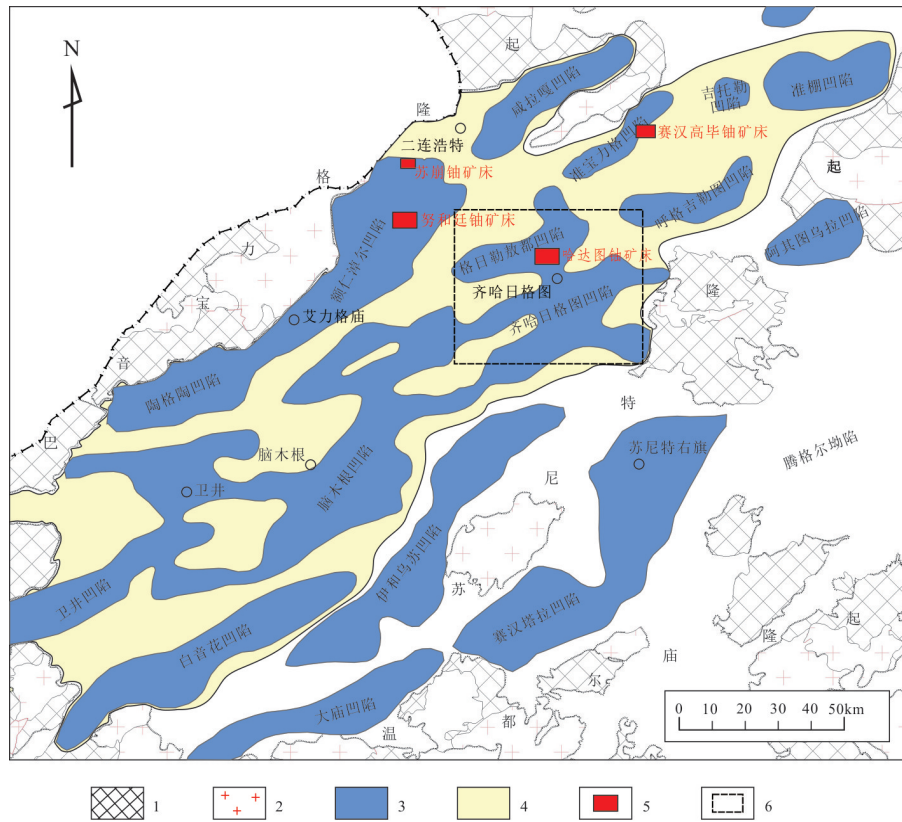


图2 二连盆地乌兰察布坳陷构造分区图

1—前白垩纪地层;2—花岗岩;3—凹陷;4—凸起;5—铀矿床;6—研究区范围

Fig.2 Sags distribution map of Wulanchabu depression, Erlian basin

1—Pre-Cretaceous; 2—Granite basement; 3—Sags; 4—Bulge; 5—Uranium deposits; 6—Study area

及准宝力格。

2.1 矿床产出凹陷构造特征

哈达图铀矿床具体位于乌兰察布坳陷的中东部格日勒敖都和齐哈日格图凹陷(图2),被北部的巴音宝力格隆起和塔木钦隐伏凸起、西部的东方红凸起和南部的苏尼特隆起所夹持,其基底具有凹凸相间的特征,受NE向断裂构造的控制,内部凹陷多具双断特征。凹陷长约70 km,宽20~30 km,面积约2000 km²,呈近南北向展布,具有发育河道的构造条件,基底埋深400~1500 m,凹陷北部最深,最大达2200 m。

哈达图地区盖层内发育北北西和北东向两组断裂构造,其中北北西向断裂沿哈达图—齐哈日格图—查干通过,在区域上地表呈明显的负地形,发育淖尔、沼泽等,形成区域富水带(图3);北东向断裂构造主要发育在各次级凹陷的边缘部位,控制了盆地盖层沉积主体的演化,伴随盆地整体隆升,在挤压应力场作用下形成断裂构造,并且使部分构造

发生反转,使沉积盖层发生较为强烈的剥蚀和沉积间断。二连组和古近系是在该区准平原化背景下接受沉积。

前赛汉期,格日勒敖都和齐哈日格图凹陷受北东向正断层控制,呈现双断性质,并在断陷内部发育烃源岩;赛汉期,格日勒敖都和齐哈日格图凹陷连接成一个大型坳陷,并在坳陷长轴方向发育大型辫状河道,形成古河道砂体,为铀成矿的有利场所。空间上,哈达图铀矿化与断陷内烃源岩发育区、断裂构造、赛汉期底板洼地密切相关(图3,图4)。

2.2 地层特征

哈达图地区沉积地层主要有中下侏罗统阿拉坦合力组、上侏罗统兴安岭群、下白垩统阿拉善组、腾格尔组、赛汉组,上白垩统二连组和始新统伊尔丁曼哈组,各组沉积主要特征及发育矿产概述如下:

阿拉坦合力群(J_{1-2a}):早—中侏罗世,以伸展作用为主,在二连盆地齐哈地段发育小型的山间盆地,沉积的阿拉坦合力组为一套河湖相含煤碎屑

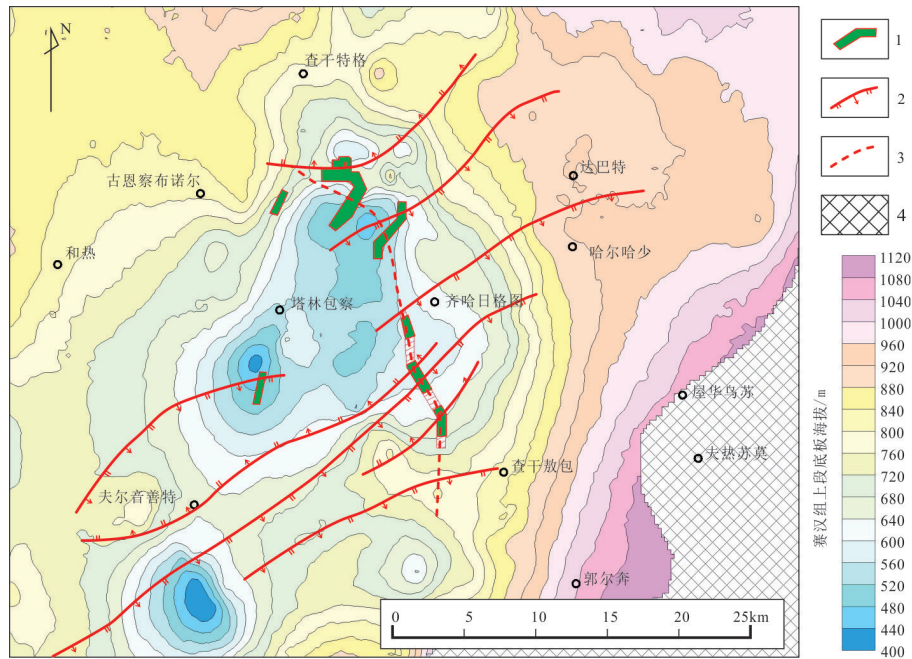


图3 哈达图矿区赛汉组上段底板等高线和构造图

1—哈达图铀矿矿体平面投影;2—正断层;3—性质不明断层;4—赛汉组上段缺失区

Fig.3 Elevation contour map of the upper member bottom of Saihan Formation in the study area

1—Planar projection of the ore bodies, 2—Normal faults, 3—Uncertain faults, 4—Absent area of the upper member of Saihan Formation

岩,形成了二连盆地第一套含油、含煤有机质丰富地层及最早的富铀层位(石兰亭等,2008;刘武生等,2015)。富有机质建造中一般铀与有机质含量呈正比关系,因此也可用放射性测井资料来计算有机质含量(陈治军等,2013)。兴安岭群(J_{ix}):晚侏罗世,太平洋板块的作用增强,并以正反转构造运动为主,造成中

一下侏罗统内大量逆冲断裂的形成,而上侏罗统大面积火山喷发形成兴安岭群。

阿尔善组(K_{1a}):为一套断陷早期强烈拉张期发育的地层,受半干热的气候影响,造就了大面积冲积扇和扇三角洲群沿湖盆两岸分布,具有河流多、水系短、湖盆小、水体浅和连通差的特点,为一套充填式杂色粗碎屑沉积,湖泊区为生油烃源岩发育区。

腾格尔组下段(K_{1t'}):为一套断陷快速沉降期发育的地层,是在继承阿尔善组沉积的基础上,发生了大规模湖侵,表现为腾格尔组下段直接覆盖于下伏阿尔善组、侏罗系乃至古生界之上,各类扇体快速向湖岸退缩,气候温暖炎热,松柏成林,植被繁茂,湖相生物快速繁殖,形成了区内第二套生油建造,含有较高的铀背景值(石兰亭等,2008),其中,在湖盆体系中发育的一套夹于深一半深湖相泥岩中热水沉积的铁白云石、钠沸石,铀含量达 $40 \times 10^{-6} \sim 60 \times 10^{-6}$,钍含量达 $60 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$,厚度40~80 cm(郭强等,2014)。

腾格尔组上段(K_{1t''}):是在断陷稳定拉张期沉积一套辫状河三角洲-湖泊沉积体系。湖盆边缘发

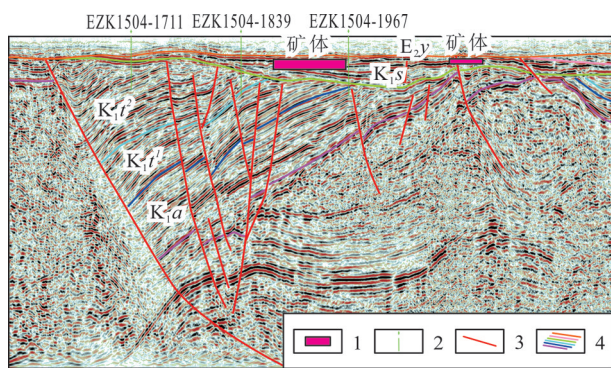


图4 哈达图矿区L2地震剖面图(剖面位置见图6)

1—矿体;2—钻孔投影位置;3—断层;4—地层底界

Fig.4 Seismic profile L2 (location see Fig.6) in the Hadatu deposit area

1—Ore body; 2—Project positions of borehole; 3—Faults; 4—Bottom of stratum

育大中型辫状河三角洲和扇三角洲砂砾岩体向湖盆中心快速推进,致使湖水变浅,湖域缩小,以滨浅湖和湖沼亚相代替了早期的较深湖亚相,下部为盆内良好油气储层,上部属一套区域性盖层。盆缘的大中型辫状河三角洲和扇三角洲砂砾岩体铀含量较高,达 $7.5 \times 10^{-6} \sim 12.6 \times 10^{-6}$ 。

赛汉组下段(K_1s^1):与下伏层位角度不整合接触。是在断拗转换时期沉积的一套冲积扇-扇三角洲-湖泊体系;断陷边部、缓坡地带发育冲积扇、辫状河及三角洲沉积体系,构成赛汉早期寻找砂岩铀矿的有利相带,铀含量达 $8.5 \times 10^{-6} \sim 15.0 \times 10^{-6}$;拗陷中心以浅湖及沼泽沉积为主,形成盆地重要的产煤层。

赛汉组上段(K_1s^2):是在半干热一半湿热一湿热古气候环境下沉积一套杂色河流相体系,与下伏地层呈平行不整合接触关系(图5),沉积厚度200~400 m;在拗陷内地形相对低凹区域形成建造间古河道,构成该区寻找砂岩铀矿的有利场所。哈达图矿区赛汉组上段发育三期古河道,第一期古河道(K_1s^{2-1})位于赛汉组上段底部,受苏尼特隆起和东方红、赛乌苏及塔木钦凸起的影响,呈南北向展布,具有多物源的特征,为一套杂色砾质辫状河沉积,该期古河道宽10~20 km,砂体厚度变化范围65~160 m,在局部地段见工业铀矿化;第二期古河道(K_1s^{2-2})位于赛汉组上段中部,河道仍然受基底隐伏凸起的影响,主河道明显向东迁移,呈近南北向展布,为一套杂色砂质辫状河沉积,河道宽10~25 km,砂体厚80~150 m,是哈达图矿床的主要含矿层位;第三期古河道(K_1s^{2-3})沉积时完全超覆了东方红凸起,主干河道在齐哈日格图凹陷内呈北西向发育,河道的规模明显小于前两期,主干河道宽5~15 km,砂体厚度8~160 m,为一套红杂色曲流河沉积,不发育铀矿化(吕永华等,2021)。

二连组(K_2e):晚白垩世,随着太平洋板块俯冲带向东迁移,二连盆地整体隆升,盆地开始萎缩,在干旱古气候环境下沉积了一套红色河流相沉积。区内有一些薄透镜状灰色砂体内见工业铀矿化。

伊尔丁曼哈组(E_2y):始新世研究区继续下拗,在炎热古气候匹配下,形成天青石、石膏等矿产,在区内局部呈透镜状灰色砂体中见铀矿化。

第四系(Q):主要为冲洪积砂砾石,风积细砂,湖积粉砂、黏土等,最大厚度一般不超过10 m。

3 矿床基本特征

3.1 含矿砂体特征

哈达图铀矿床含矿砂体主要为赛汉组上段第二期(K_1s^{2-2})河道砂体,岩性主要为红杂色、黄色、褐色夹灰色含砾粗砂岩和含砾中细砂岩。平面上,灰色砂体呈孤岛状、朵状、串珠状分布于河道拐弯、交汇、变缓等形态变化部位,且与控制凹陷的正断层有关,部分沿断裂呈串珠状分布(图6)。剖面上,灰色砂体呈透镜状、喇叭状悬浮于赛汉组上段第二期(K_1s^{2-2})杂色河道砂体中,上下呈现“两黄夹一灰”现象;铀矿化受灰色砂体控制,铀矿化分布于灰砂率(灰色砂体厚度/红杂色层中砂体厚度的百分数)20%~80%区间内,灰色砂体上下左右均是氧化性黄色砂体。

哈达图矿床含矿砂体特征与典型层间氧化带型铀矿存在较大差异性。其一是哈达图矿床不具典型的“泥-砂-泥”岩性结构;其二是哈达图矿床不具传统的氧化还原水平分带性,仅具黄-灰-深灰-黄的垂向岩性分带(图7),铀矿化赋存于灰色砂岩中,特别是富含地沥青细脉、黄铁矿的深灰色含砾中细砂岩中(表1)。

3.2 铀矿化特征

哈达图铀矿床矿体分布于灰砂率20%~80%的灰色砂体内,平面上在孤岛状、朵状灰色砂体中呈环带状或半环状,在串珠状灰色砂体中呈条带状(图6);剖面上矿体埋深200~550 m,品位0.0193%~0.1994%,平米铀量1.00~63.77 kg/m²,矿床规模达特大型以上。总体,哈达图铀矿化具“悬空”、板状、超常富集等特征,具多层性(图8),这不同于传统潜水氧化或层间氧化作用形成的砂岩铀矿特征(黄世杰,1994;李子颖等,2009,2020;陈祖伊等,2013;张金带,2016)。

3.3 矿石矿物特征

哈达图铀矿石为深灰色含炭含砾中细、中粗砂岩,砂体成岩度不高,结构疏松,富含有机质地沥青和黄铁矿(图9c、d),见部分黄铁矿交代、充填的现象;碎屑颗粒磨圆度和分选性均较差,砂粒多呈次棱角状一次圆状,粗细混杂(图9a);杂基含量一般<10%,含有较多的金属矿物以及细小的铀矿物(图9b);砂岩碎屑成分比较杂,其中,石英约占碎屑总

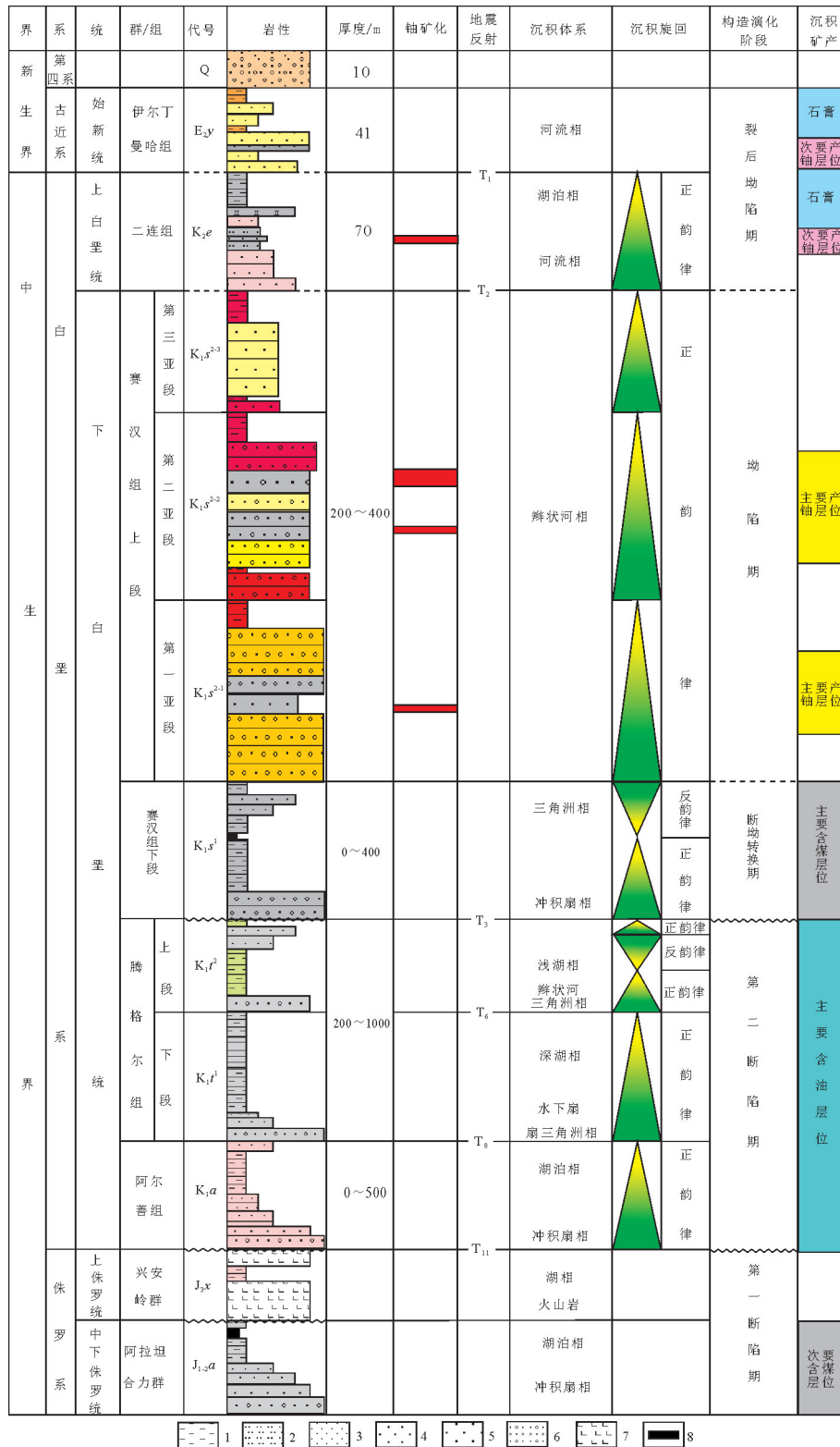


图5 哈达图矿区综合地层柱状图

1—泥岩;2—粉砂岩;3—细砂岩;4—中砂岩;5—粗砂岩;6—砂砾岩;7—火山岩;8—煤层

Fig.5 Comprehensive strata column in the Hadatu deposit area

1—Mudstone;2—Siltstone;3—Fine sandstone;4—Medium-grained sandstone;5—Coarse sandstone;6—Glutenite;7—Volcanic rock;8—Coal seam

表 1 哈达图垂向岩性分带特征

岩性分带	铀含量/ 10^{-6}	蚀变特征	还原容量(介质)
黄色(褐色)砂岩带	5.6	褐铁矿化、赤铁矿化;黏土矿物主要为伊蒙混层及伊利石, 含约10%的高岭石	未见
灰色砂岩带	266.2	黄铁矿化, 部分出现弱的或残留褐铁矿化;黏土矿物组合以伊蒙混层及伊利石为主, 并且出现少量绿泥石	细脉状分布有机质
深灰色砂岩富矿带	11086.8	黄铁矿化;黏土矿物主要为伊蒙混层	地沥青细脉、有机质
浅黄色砂岩带	39.9	碎屑颗粒及填隙物表面可见少量褐铁矿化;黏土矿物主要为伊蒙混层及伊利石, 含少量高岭石	未见

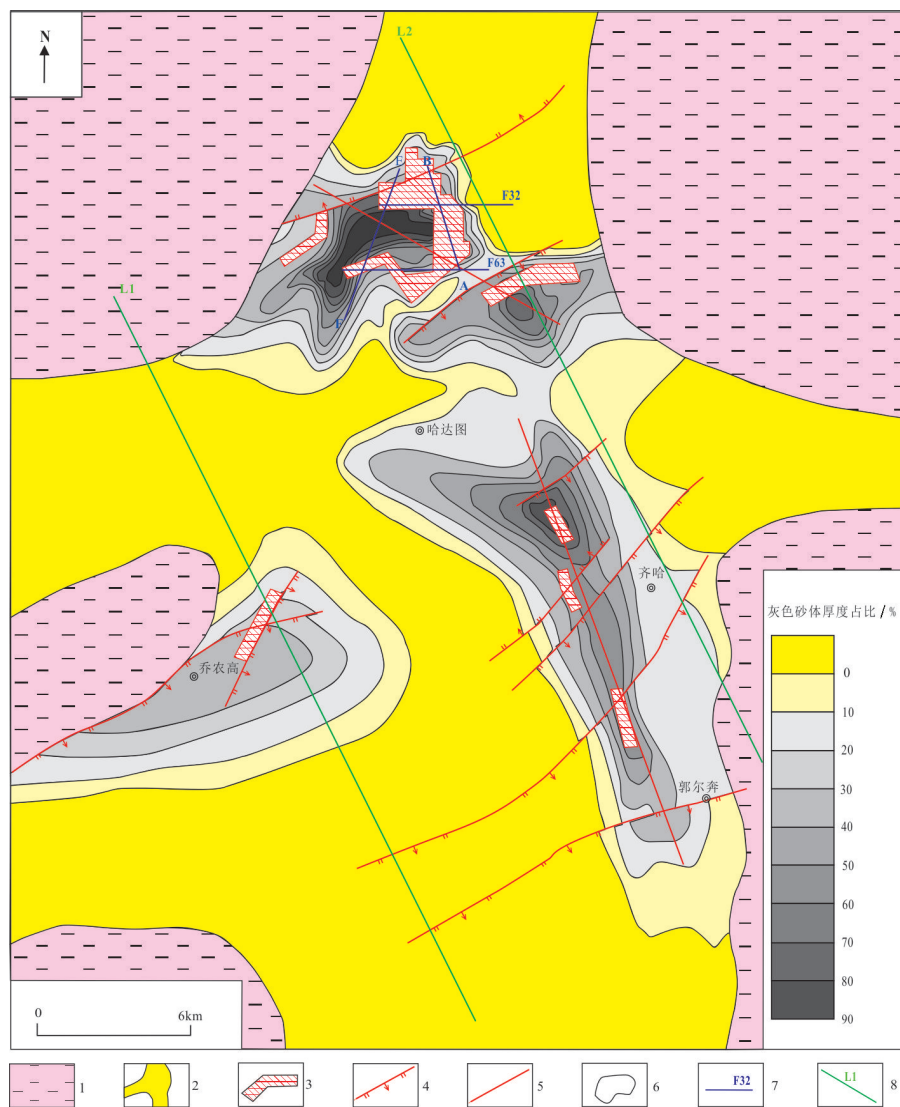


图 6 哈达图矿床赛汉组上段灰色砂体厚度占比和铀矿体匹配图

1—河漫滩; 2—赛汉晚期古河道发育区; 3—铀矿体平面投影; 4—正断层; 5—性质不明断层; 6—灰色砂体厚度占比等值线; 7—典型地质剖面; 8—矿区地震测线

Fig.6 Spatial relationship between the grey sandstone body of the upper member of Saihan Formation and the uranium ore body in the Hadatu deposit.

1— Flood plain; 2— Paleo-channel in the late Saihan period; 3— Plane projection of uranium ore body; 4— Normal faults; 5— Uncertain faults; 6— Ratio of thickness of grey sand bed to the whole bed; 7— Location of typical geological sections; 8— Seismic line in study area

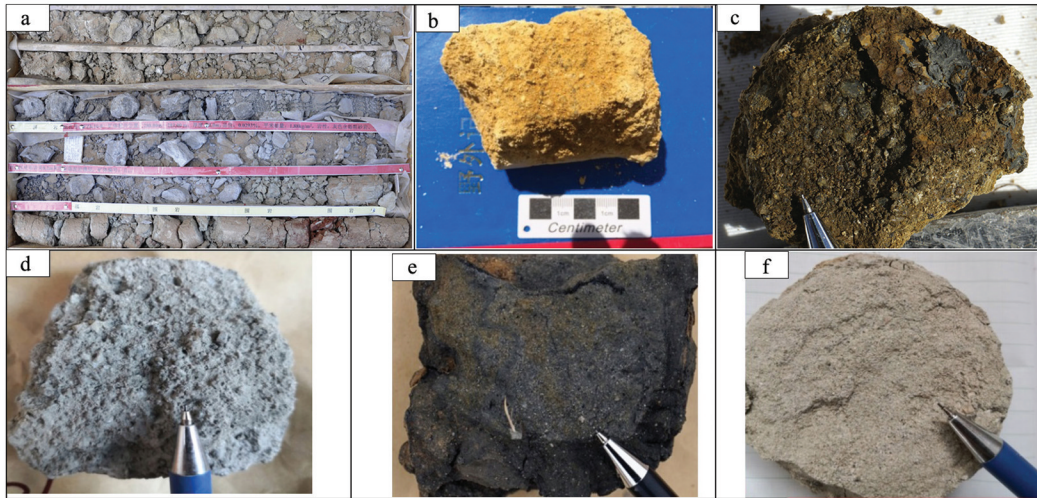


图7 哈达图矿床典型岩石和矿石照片

a—岩心垂向“两黄夹一灰”岩性结构;b—黄色含砾中砂岩;c—褐色含油砂砾岩;d—灰色含砾粗砂岩;e—深灰色含地沥青质富铀中砂岩;f—浅黄色中砂岩

Fig.7 Photographs of typical rocks and ores in the Hadatu deposit

a- "Yellow-gray-yellow" sandwich structure of vertical lithology; b- Yellow pebbly medium-grained sandstone; c- Brown oil-bearing conglomerate; d- U-bearing grey coarse sandstone; e- U-bearing dark grey medium-grained sandstone with bitumen; f- Light yellow medium-grained sandstone

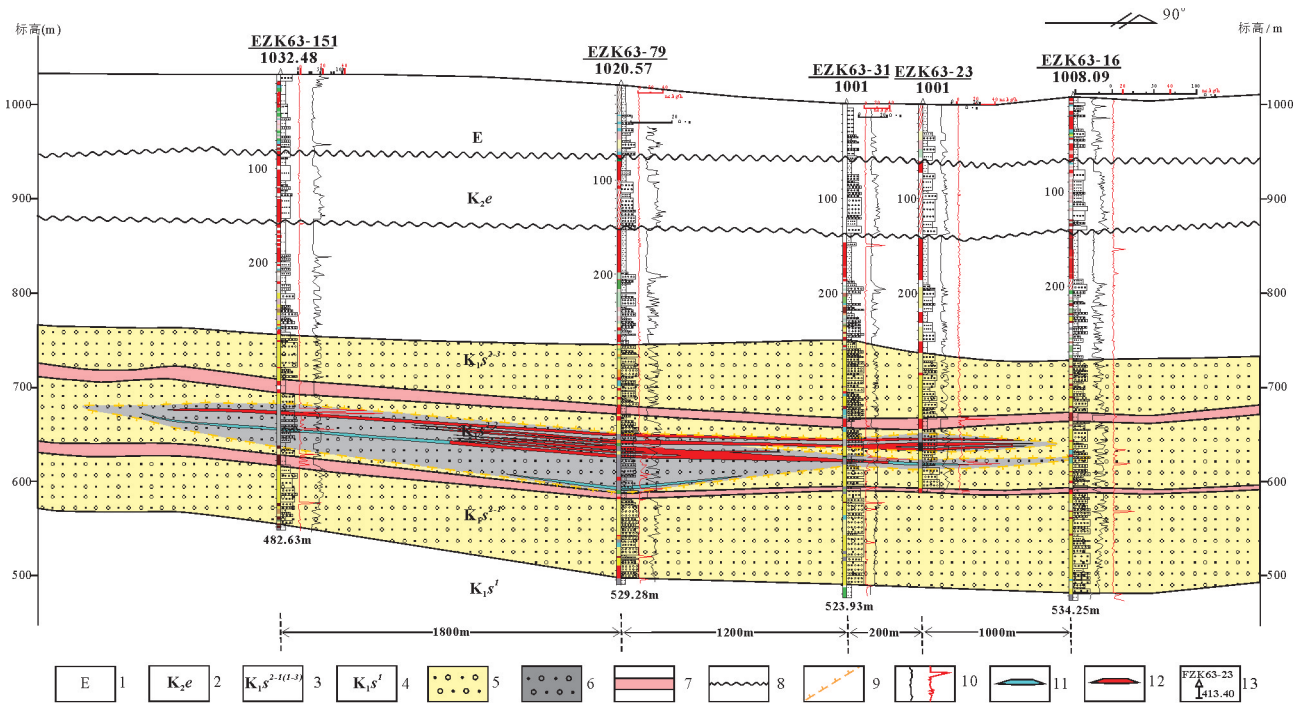


图8 哈达图铀矿床F63线地质剖面图(据吕永华等,2021)

1—古近系;2—二连组;3—赛汉组上段第一、二、三亚层;4—赛汉组下段;5—氧化砂岩;6—还原砂岩;7—赛汉组上段红色泥岩;8—地层不整合界线;9—氧化还原过度带;10—电阻率、伽玛测井曲线;11—铀矿化体;12—工业铀矿体;13—钻孔位置及编号

Fig. 8 Geological section of line F63 of the Hadatu uranium deposit (after LÜ Yonghua et al., 2021)

1- Paleogene; 2- Erlian Formation; 3- First, second, and third of the upper member of Saihan Formation; 4- Lower member of Saihan Formation; 5- Oxidized sandstone; 6- Reduced sandstone; 7- Red mudstone of the upper member of Saihan Formation; 8- Unconformity; 9- Redox zone; 10- Three lateral resistivity and Gamma logging; 11- Uranium mineralization body; 12- Industrial uranium ore body; 13- Boreholes

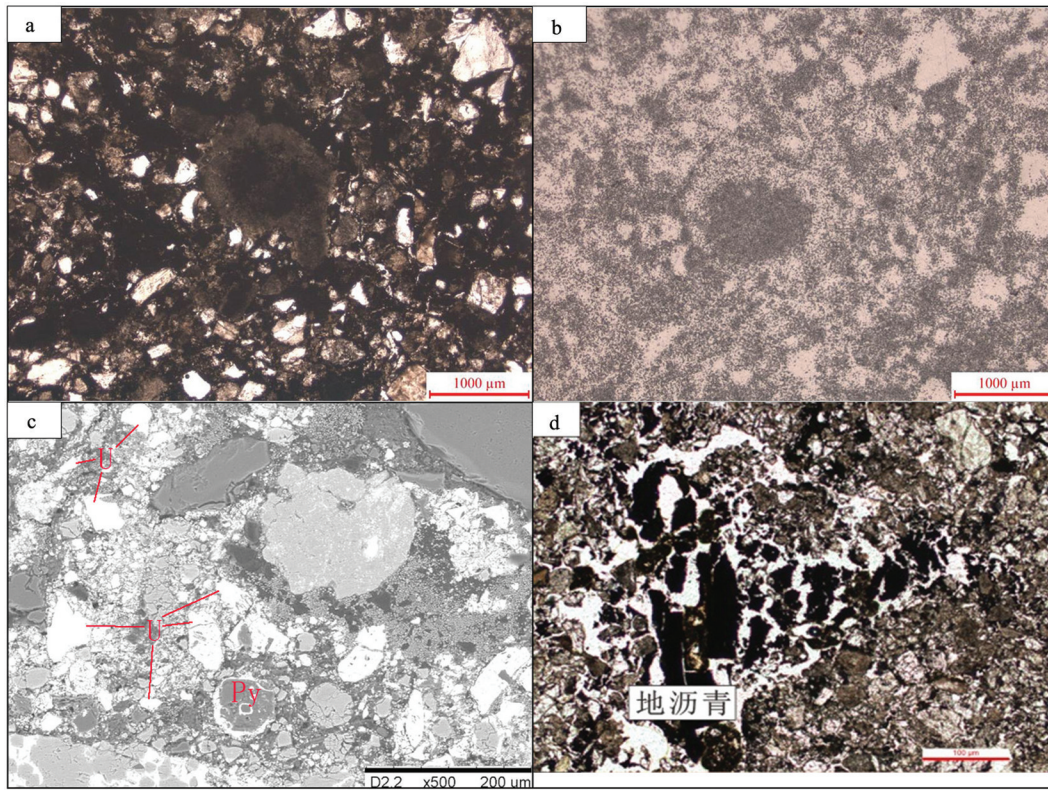


图9 哈达图铀矿床矿石特征显微照片

a—砂体中孔隙式胶结构疏松,正交偏光;b—孔隙充填物中发育铀矿化,同A视域放射性照相;c—黄铁矿Py表面附着大量铀矿物,扫描电镜;d—矿石中的地沥青(透射光)

Fig 9. Microphotograph of ore samples of the Hadatu uranium deposit

a- Loose pore-type cement(+); b- Radioactive photograph showing uranium in pore cement (same to the view scope of A); c- Abundant uranium minerals attached on pyrite surface; d- Bitumen in ore (transmission light)

量的40%,镜下观察发现其多具有齿状变晶结构、片状构造,这表明石英受变质作用影响比较大,且在石英裂隙中充填有铀矿物;长石约占碎屑总量的20%~30%,以钾长石为主,长石碎屑大部份都未遭受明显蚀变,但在镜下观察到少量水云母化、绿帘石化等现象;岩屑占碎屑总量的30%,成分主要为花岗岩;重矿物总量少,主要有电气石、绿帘石、钛铁矿等;以孔隙-基底式胶结为主,接触式胶结为辅。总之,哈达图矿床矿石定名为岩屑长石砂岩,具近源的特征,从岩屑的成分来看,蚀源区主要出露岩石为花岗岩和变质岩,并有少量的火山岩,原岩铀含量较高。

3.4 铀成矿年龄

通过哈达图矿床低品位(小于0.05%)矿石分析全岩U-Pb年龄,得出(48.3±5.1)Ma、(58.5±8.7)Ma年龄。通过哈达图高品位(大于0.1%)矿石挑沥青铀矿单矿物U-Pb年龄,得出16.0~3.2 Ma成矿年龄

(刘武生等,2020)。说明哈达图矿床年龄具多期次特点,晚白垩世-始新世成矿年龄与巴彦乌拉铀矿成矿时代一致;渐新世至中新世,应为叠加富集年龄。

4 成因机理研究

4.1 含矿层赛汉组上段原生氧化沉积建造成因

赛汉组(K_{1s})上下两段沉积环境和古气候条件不同。赛汉组下段主要为一套灰色岩系,是重要产煤层位,其底部为灰绿、绿灰色块状砂砾岩层,顶部为灰绿色泥岩夹炭质泥岩,属典型的潮湿气候条件下形成。

进入赛汉组上段沉积时期,古气候由潮湿转变为炎热干旱,主要发育河流及三角洲沉积体系,沉积了一套稳定的氧化砂体,砂岩主要是呈浅黄色、黄色、褐色等,总体有机质缺乏,上段三个亚段均以棕红色泥岩为特征标志(图10),反映干旱氧化环境,属原生氧化沉积建造成因。

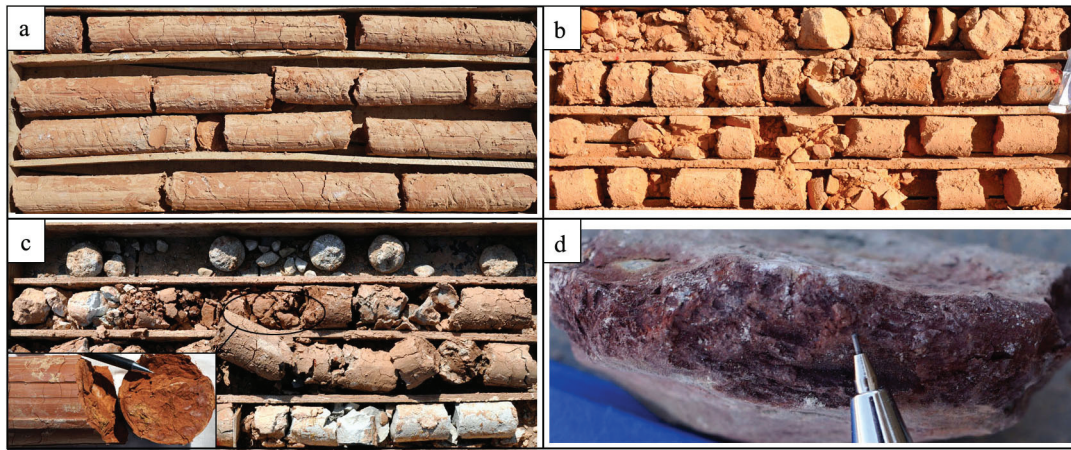


图10 哈达图矿区赛汉组上段红杂色层岩心照片

a—赛汉组顶部红色泥岩;b—赛汉组上段第三亚段浅红色中砂岩;c—赛汉组第二亚段与第一亚段间的红色泥岩;d—紫红色含泥钙质细砂岩(铀矿石)

Fig 10. Photographs of mottled-red layer of the upper member of Saihan Formation in Hadatu deposit

a—Red mudstone at the top of Saihan Formation; b—Light red medium-grained sandstone in the third part of upper member of Saihan Formation; c—Red mudstone in the first and second part of upper member of Saihan Formation; d—Purplish-red mud-bearing calcareous fine sandstone (uranium ore)

首先在空间分布上,在二连盆地,尤其在乌兰察布坳陷赛汉组上段红杂色沉积广泛发育;岩性上表现比较均一的氧化色沉积建造。地层沉积建造的颜色是反映古气候的一个良好标志(Debret et al., 2014; 王熠哲等, 2019; Kolesnik et al., 2019; Singh et al., 2021; 李星波等, 2021)。红色建造多与铁的氧化物有关,主要是赤铁矿所致,反映沉积环境以水上氧化为主(李星波等, 2021),并且通常代表了干热的气候环境(Singh et al., 2021; 李星波等, 2021)。泥岩压实后较致密,渗透率急剧降低,一般为隔水层,不易受到后生改造影响,可以保存原始沉积建造的环境信息。

研究区泥岩多以红色出现,并在全区普遍发育(图10a,c)。统计结果显示,在区110余钻孔中,赛汉组上段各亚段红色泥岩累积厚度平均值在6.81~30.73 m,最大累积厚度逾80 m(表2)。普遍发育的红色泥岩说明研究区赛汉组上段为原生氧化建造成因。 K_{1s}^{2-2} 层为主要含矿亚段,红色泥岩层平均厚度逾13 m,并向研究区西部厚度增大,达20多米(图11),表明在主要含矿亚段沉积时期,研究区形成广泛的原生氧化泥岩建造,由此可以判断,相同环境和气候背景下发育的,与红色泥岩互层的砂岩亦应为原生氧化建造。

研究区赛汉组上段以辫状河沉积为主,形成垂

表2 哈达图矿床区域红色赛汉组上段各亚层中红色泥岩累积厚度统计

Table 2 Cumulative thickness of the red mudstones of the upper member of Saihan Formation in the Hadatu deposit

红色泥岩累积厚度/m	K_{1s}^{2-1}	K_{1s}^{2-2}	K_{1s}^{2-3}
平均值	6.81	13.86	23.69
工业孔	最大值	22.30	75.30
	最小值	0.40	0.50
其他孔	平均值	10.14	13.77
	最大值	30.15	27.70
	最小值	0.20	1.30
		4.10	

向上频繁互层、平面上频繁迁移、以砂为主的沉积地层。在干、热的环境下,辫状河道摆动更频繁,导致先前沉积物更易暴露氧化,形成以红色和黄色为主的原生氧化建造。研究区矿床外围剖面显示,辫状河沉积形成的薄层砂、泥以黄色和红色为主,在垂向频繁叠置发育,均反映这些氧化建造主要为原生成因。

古气候的演化也反映了含矿层赛汉组上段氧化沉积建造的原生成因。早白垩世赛汉组下段沉积期气候温暖潮湿,湖泊广布,植被茂盛,形成了一套含煤及大量植物碎屑的地层。早白垩世赛汉晚期,相对于赛汉组下段的温暖潮湿气候,赛汉组上段沉积时温度明显上升,湿度也大幅下降,转为干旱一半干旱气候。在赛汉组上段沉积期末,古气候

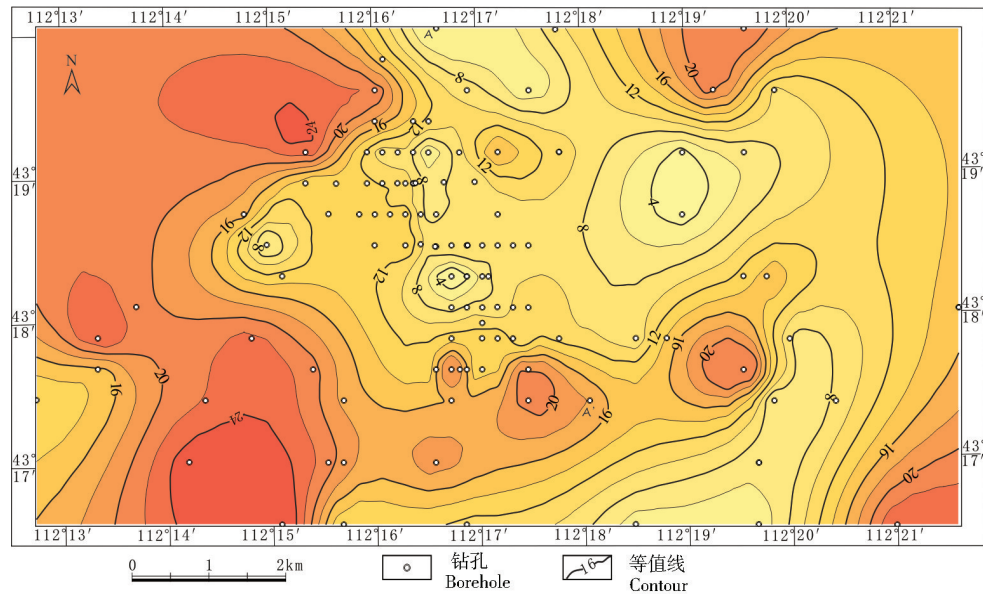


图 11 研究区主要含矿层赛汉组上段(K_{1s}^{2-2})红色泥岩厚度等值线图

Fig. 11 Thickness contour map of red mudstone of ore-bearing layer in the upper member of Saihan Formation in study area

已经转为干旱炎热。晚白垩世二连期,沉积岩颜色主要为红色夹灰色,发育石膏层。齐哈日格图钻孔样品孢粉分析表明,蕨类孢子占 76.2%居首位,均为希指蕨孢属;被子类花粉为 17.8%列其次,主要是出现一些特殊分子刺参粉属和江汉粉属;裸子类花粉占 6.9%,为单束松粉属、苏铁粉属、双束松粉属及罗汉松粉属。代表干热气候的特征植物占 80.2%、代表温热气候的特征植物占 14.2%、代表温湿气候的特征植物占 5.6%,反映了干旱炎热的古气候环境(刘武生等,2015)。

古近系沉积期气候继续干旱炎热,沉积了一套红色的洪泛泥岩,形成含矿层区域上的隔水顶板。古近纪—新近纪,石膏广泛分布,以单独成层产出或以含石膏粉砂岩、含石膏泥岩形式产出。

赛汉组上段原生红色砂岩和泥岩主要是其中的赤铁矿化引起,反射光下赤铁矿呈暗红色(图 12a),分布在填隙物及碎屑颗粒表面,其是在氧化条件下沉积成岩过程中主要以胶体状形式形成的。褐铁矿化也常见于氧化砂岩中,主要发育在填隙物及胶结物中(图 12b),它是铁的氢氧化物针铁矿、水针铁矿、纤铁矿和黄钾铁钒的混合物,主要成分为针铁矿,是砂岩呈黄色的主要原因。

4.2 控矿灰色砂体为深部渗出流体还原成因

4.2.1 岩石矿物证据

在含矿层灰色砂体中可见残留的褐铁矿化斑,

褐铁矿化呈斑点状残留于灰色砂体中(图 13a、d)或灰色砂体包裹中的泥砾中(图 13b),亦见灰色砂体沿裂隙嵌入黄色砂体内(图 13c)。在离氧化还原界面较远的灰色砂体及矿体内部有时也可见褐铁矿化斑,褐铁矿化发育在填隙物及胶结物中以及灰色砂体中残留条带状黄色砂体,以及在裂隙中还可见赤铁矿化(图 14)。这种现象表明赤铁矿、褐铁矿化现象是先期氧化砂岩的残留,灰色砂岩应是早期的黄色氧化砂体遭受后期还原形成。上述现象均是为不完全还原的氧化残留,表明岩石在变成灰色之前应是氧化沉积建造,灰色砂岩是早期的红杂色氧化砂体遭受深部还原流体还原形成的。

4.2.2 微量元素地球化学证据

微量元素等地球化学参数可以作为地质、地球化学过程中的“指示剂、示踪剂”(赵振华,1997),同时也能推断沉积环境,反映沉积条件、地质作用等。

相对于褐黄色带、浅黄色带以及灰白—浅灰色带,灰色、深灰色带砂岩富集 U、Re、Co、Mo、Ni、Cr、Zr、Zn 等元素,其中 U、Co、Ni、Zr、Zn 和 S 元素富集程度相对较高(表 3,图 15)。在深灰色富矿石带矿石中,这些元素的富集程度更高,这与一般的潜水或层间氧化成因砂岩铀矿中富集 Mo、Se、Re 等元素明显不同,从而也证明这些元素是由在来自深部富含有机质地层的还原性流体带来。事实上,一些烃源岩成因或卤水流体中通常富含多种金属元素,尤

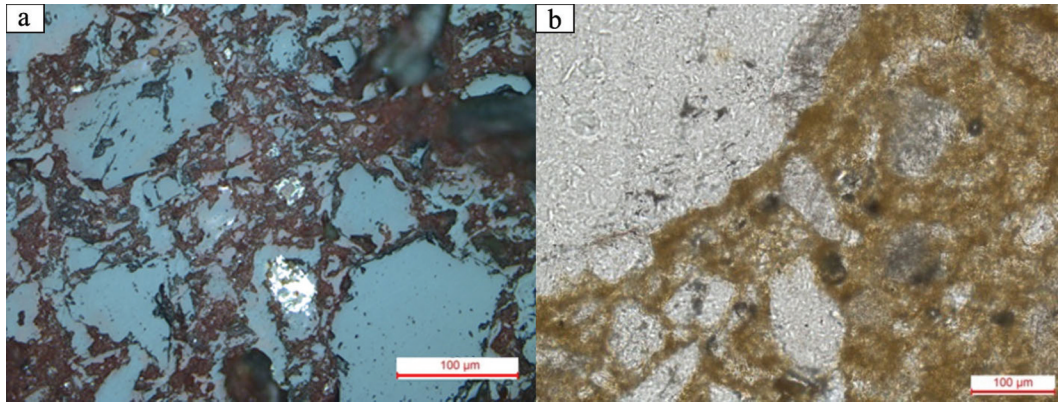


图12 研究区赛汉组上段红色细砂岩显微照片

a—赤铁矿化;b—褐铁矿化

Fig.12 Photomicrograph of red sandstone in the upper member of Saihan Formation in study area

a—Hematitization;b—Limonitization

其是U、Ni、Mo、Au、Pb、Zn、S等元素,这已是不争的事实(施继锡等,1995;顾雪祥等,2007)。

褐黄色岩石带铀含量均值 5.78×10^{-6} , Fe^{3+}/Fe^{2+} 均值为5.44,有机碳、硫的平均值分别为0.03%和0.01%($n=22$);总的来看,褐黄色岩石带铀含量及有

机碳、FeO、S含量均较低。浅灰色、灰色带岩石铀含量普遍高于 57.78×10^{-6} ,明显高于传统意义上砂岩型铀矿中的原生灰色砂岩,认为该矿床灰色砂岩普遍铀含量增高,是深部含铀还原流体渗出带人所致。深灰色富矿石带有机碳、硫含量均值分别为

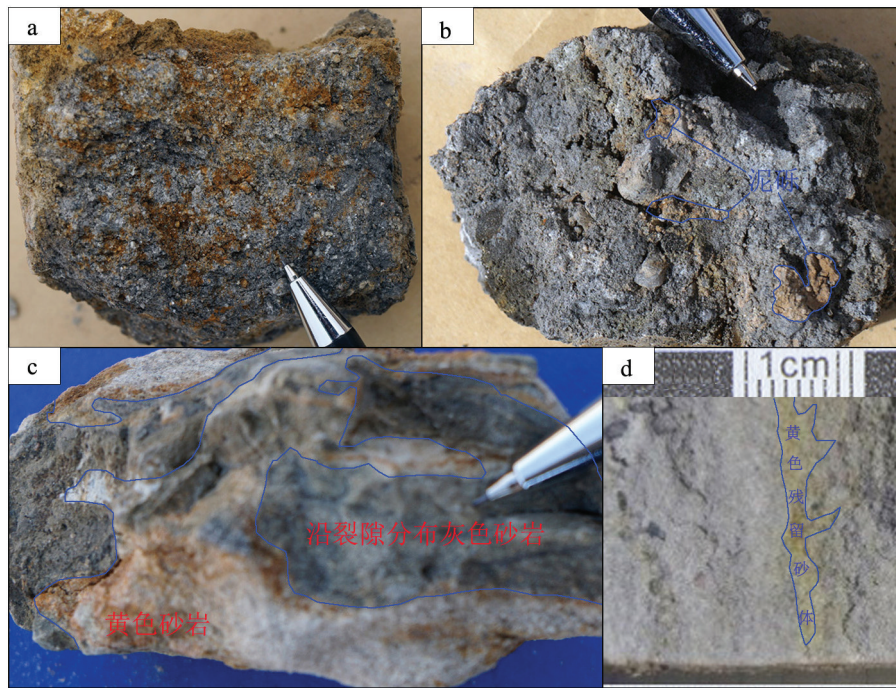


图13 哈达图矿石灰色砂体与黄色砂体的关系照片

a—灰色矿石中残留有斑点状黄色砂体;b—灰色矿石中见残留黄色泥砾;c—灰色砂体沿裂隙不规则分布;

d—灰色砂体中残留条带状黄色砂体

Fig. 13 Photographs of grey and yellow sandstone ores of Hadatu deposit

a—Mottled yellow sandstone resided in gray ore; b—Yellow mudstone resided in gray ore;c—Gray sandstone distributed along the fracture irregularly;

d—Banded yellow standstone resided in gray sandstone ore

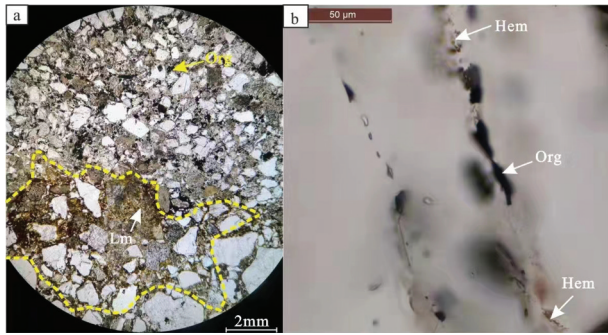


图 14 哈达图矿床含矿段砂岩褐铁矿化及赤铁矿化特征
a—矿石中的褐铁矿化斑(单偏光);b—灰色砂岩(矿石)中石英碎屑
裂缝中的赤铁矿及有机质(单偏光)

Org—有机质; Lm—褐铁矿; Hem—赤铁矿
Fig. 14 Characteristics of limonitization and hematitization of sandstone ores in Hadatu deposit
a—Limonitization spot in ore (polarized light); b—Hematitization and organic matter in fracture of gray ore (polarized light)

0.78%、1.82%，均显著高于灰色岩系。

从褐黄色岩石带→浅黄色岩石带→灰白色—浅灰色带→深灰色富矿石带，岩石中的U含量、有机碳含量、S含量、ΔEh升高，在深色铀矿化带达到最高。此外，通过皮尔逊相关性分析可知，U含量与铁、硫、有机碳含量相关性明显(表4)，表明有机碳与铀矿化有着重要的成因联系，同时，富矿石中带入了铁、硫、磷等。

上述分析表明，哈达图矿床红杂色岩石带具有氧化属性，是原生的氧化性质的岩石。而灰色还原岩石带和深色铀矿化岩石带均为含铀富有机质还原性流体对原生氧化红杂色岩石进行还原的结果。岩石中有机质的富集程度也与铀含量正相关。表明铀应是由还原性流体携带而来。深色铀矿化岩石中高场强元素Zr以及Co、Ni等深源基性元素的富集表明这些携带有机质及铀的还原性流体应来自深部富铀富有机质沉积建造，如烃源岩等。

4.2.3 黄铁矿硫同位素、微量元素变化特征

(1) 黄铁矿产出特征

样品采自哈达图矿床FZK95-87钻孔476~482 m处，该位置为下白垩统赛汉组上段第二亚层(K₁s²⁻²)的主要含矿层位，顶部见1.5 m泥岩，底部为黄色含砾砂岩，中部以灰色、灰黑色含砾中砂岩为主，有机质丰富，黄铁矿发育，碎屑物含量约90%，其中石英约占70%，长石约占25%，岩屑及其他5%，分

表 3 哈达图铀矿床蚀变带内矿物—地球化学特性
Table 3 mineral and geochemistry characteristics of alteration zone in the Hadatu uranium deposit

地球化学分带	深源基性元素/10 ⁻⁶										氧化能力		还原容量		酸碱度				
	U	V	Mo	Re	Th	Co	Ni	Zr	Pb	Zn	FeO/%	全S/%	有机C/%	烧失量/%	甲烷 (μL/kg)	乙烷 (μL/kg)	CO ₂ /%	ΔEh/mV	pH
褐黄色—黄色带/22	5.78	24.39	3.87	0.02	6.53	6.65	6.90	80.74	17.87	20.37	0.73	0.01	0.03	1.26	210.10	9.66	0.07	5.77	9.11
浅黄—浅黄带/23	28.12	23.37	2.37	0.04	6.97	5.47	7.16	—	18.11	23.89	0.62	0.06	0.03	1.49	466.99	29.35	0.06	11.39	8.79
灰白—浅灰带/24	57.78	48.02	2.51	0.13	6.53	—	—	86.23	—	40.86	0.77	0.27	0.28	2.43	253.63	18.38	0.08	48.58	7.61
灰色贫矿/石带/36	194.69	28.92	2.90	0.39	7.47	9.67	9.26	90.65	20.14	40.86	0.73	0.63	0.21	2.30	105.36	6.11	0.12	54.71	6.75
深灰色富矿/石带/37	9954.43	47.29	22.50	7.82	12.05	55.79	56.00	150.25	153.25	188.34	1.16	1.82	0.78	7.37	43.24	2.07	0.16	108.78	5.46

注：不同蚀变带后的数字表示样品数；矿物地球化学由核工业北京地质研究院分析。

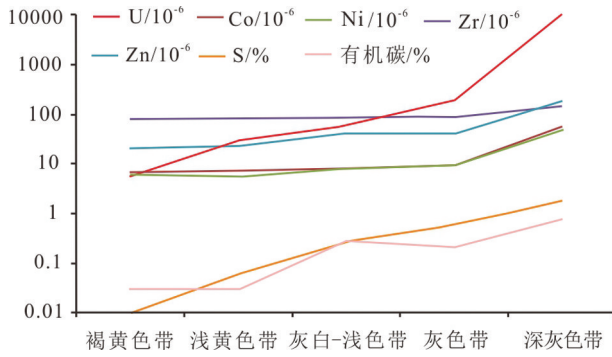


图15 哈达图矿床各岩石地球化学分带部分元素含量变化图
Fig. 15 Content variation diagram of uranium and associated elements of different ore zones in Hadatu deposit

选性好,砾石含量约15%,砾径以2~4 mm为主,成分以石英砾、岩屑为主,次棱角状一次圆状,富水性好,砂体疏松,为河道边缘相组合。

矿石中极少见到粒径较大的独立铀矿物,铀主要以超显微,偶尔以显微矿物相产出,主要为沥青铀矿、少量铀石和铀酰磷酸盐(图16)及四六价共存的形式分散吸附在矿石中碎屑颗粒(黏土矿物、有机质、黄铁矿等)的表面、裂隙或孔洞中,少量以锆石、磷钇矿等含铀矿物形式存在。

矿石中黄铁矿呈团块状、脉状、分散颗粒状分布于灰色砂岩中,粒径变化范围较大,从几微米到几百微米均有分布,特别是在岩石粒径大小明显变化的位置处充填黄铁矿团块及细脉,表明黄铁矿形成于砂岩之后(图17a、b)。黄铁矿内部常含草莓状黄铁矿,一般呈球粒,粒径较小,一般小于10 μm,外部发育环带状黄铁矿,宽度不一,一般小于100 μm(图17c、d),团块状黄铁矿宽度可达200 μm以上,岩石中分布有黄铁矿自形晶,形成于环带状黄铁矿之

后(图17d),说明黄铁矿是多期次形成的。

(2) 黄铁矿主微量元素特征

电子探针(EPMA)面扫描结果表明,黄铁矿As含量从核部至边部显著增加,表现出明显的核边结构(图18a、b)。黄铁矿Mo、Co、Ni元素未表现出变化,可能同电子探针对微量元素识别能力较低有关。

激光剥蚀等离子体质谱(LA-ICP-MS)微量元素测试结果也同样表明,黄铁矿具有明显的核边结构,核部As含量较低,小于 100×10^{-6} ,边部As含量增加至2%~2.5%,增加至少200倍;核部Mo含量也较低,小于 50×10^{-6} ,边部Mo含量增加至 $300 \times 10^{-6} \sim 350 \times 10^{-6}$;Sb含量从核部的小于 10×10^{-6} 增加至边部的大于 100×10^{-6} ;Se含量从核部的小于 20×10^{-6} 增加至边部的 $60 \times 10^{-6} \sim 80 \times 10^{-6}$;As、Mo、Sb、Se含量均表现出单向连续增加的特征(图19,表5),黄铁矿这些元素的明显富集,高于一般氧化还原作用形成的黄铁矿,指示其形成的流体作用不同于一般的大气降水流体,因为这些元素亲硫性强,在大气降水流体中难以富集,它们具深部富有机质还原流体来源特征,且流体的演化显示温度越来越高,特别是As的含量随温度增高而增高,说明流体产生的深度也较大。黄铁矿核部与边部的Co/Ni比值差异明显,核部Co/Ni比值 <0.25 ,多具沉积特征;边部Co/Ni比值增加至0.5~1,说明有温度的升高和改造(黄广文等,2021),并与As含量具有正向协同变化关系(图19,表5)。

(3) 黄铁矿同位素特征

首先是具环带结构黄铁矿采用激光剥蚀等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)方法,原位微区分析S同位素组成,结果表明,哈达图铀矿床黄铁矿

表4 哈达图矿床含矿段岩石环境参数与铀相关系数矩阵

Table 4 Correlation matrix between geochemical parameters and uranium content of ores in Hadatu uranium deposit

	TFe	FeO	Fe ₂ O ₃	Fe ³⁺ /Fe ²⁺	有机碳	S	pH	ΔEh	U
TFe	1								
FeO	0.91	1							
Fe ₂ O ₃	0.98	0.82	1						
Fe ³⁺ /Fe ²⁺	0.13	-0.17	0.25	1					
有机碳	0.72	0.8	0.66	-0.23	1				
S	0.76	0.67	0.77	-0.02	0.75	1			
pH	-0.52	-0.44	-0.54	-0.05	-0.6	-0.88	1		
ΔEh	0.7	0.77	0.64	-0.27	0.88	0.82	-0.75	1	
U	0.49	0.67	0.38	-0.07	0.66	0.52	-0.43	0.62	1

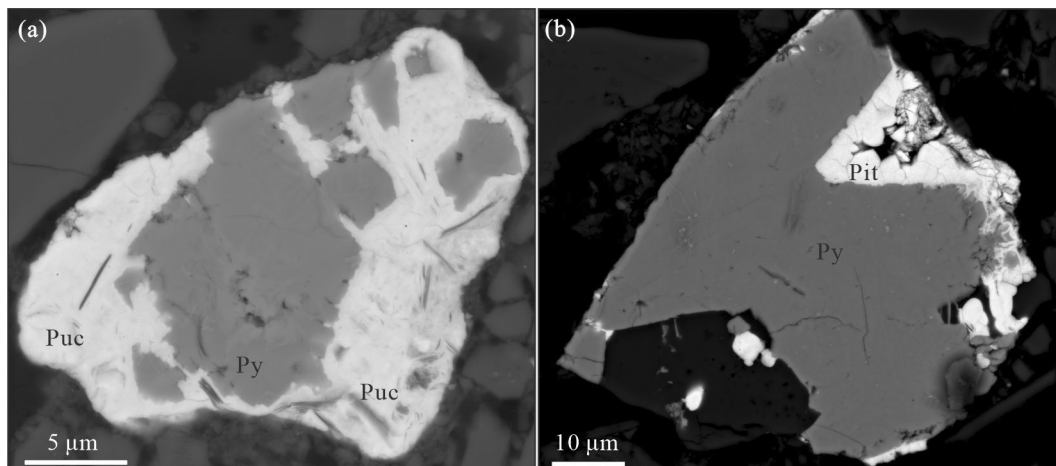


图16 哈达图铀矿床矿石中含铀矿物、黄铁矿特征(a, b—黄铁矿(Py)周围产出磷钙铀矿(Puc)、沥青铀矿(Pit))
Fig.16 Characteristics of uranium-bearing minerals and pyrite in ores from Hadatu deposit(a, b—Phosphurancalcilite and pitchblende around pyrite; Puc—Phosphurancalcilite, Pit—pitchblende)

$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 从核部至边部连续下降,核部 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 介于+20‰~+30‰,边部介于-40‰~-50‰,草莓状黄铁矿介于-20‰~-40‰,核部和边部 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 差别巨大,如L4剖面测点数值从核部到边部,最大极差值

超过70‰(图20,表6)。在同一个样品不同环带中 $\delta^{34}\text{S}$ 这么大的变化范围,说明黄铁矿在形成生长过程中核部和边部经历了不同的环境介质或流体的作用,因而可以很好地用来指示环境条件或形成时

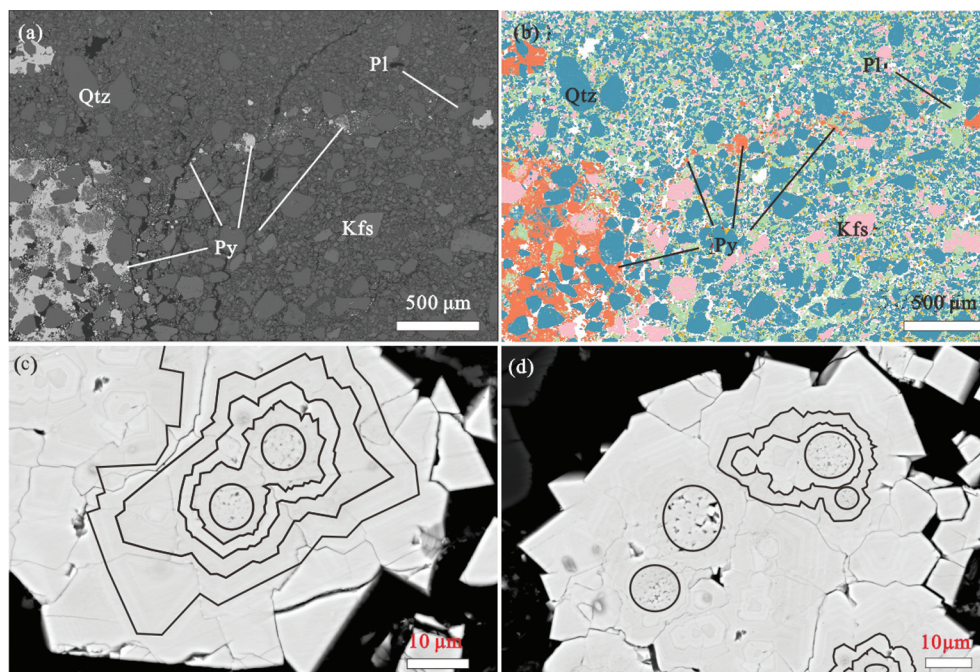


图17 哈达图铀矿床矿石中黄铁矿产出特征

a—矿石BSE照片,黄铁矿团块及细脉产于岩石粒径变化位置处;b—矿石自动矿物扫描仪AMICS-SEM照片,黄铁矿以团块状、细脉状产出;c, d—矿石中黄铁矿BSE照片,环带状黄铁矿包裹草莓状黄铁矿,亦可见黄铁矿自形晶;黑色圈表示草莓状黄铁矿;黑线表示环带状黄铁矿;Qtz—石英;Pl—斜长石;Py—黄铁矿;Kfs—钾长石

Fig.17 The characteristics of pyrite in ore from the Hadatu deposit

a—BSE image showing pyrite agglomerates, and fine veins between grains; b—AMICS-SEM image showing pyrite as agglomerates and fine veins; c, d—BSE images of pyrite showing framboids pyrite surrounded by zoned ones, euhedral pyrite also shown. Black circles—framboids pyrite; Black Lines—zoned pyrite; Qtz—Quartz; Pl—Plagioclase; Py—Pyrite; Kfs—K—feldspar

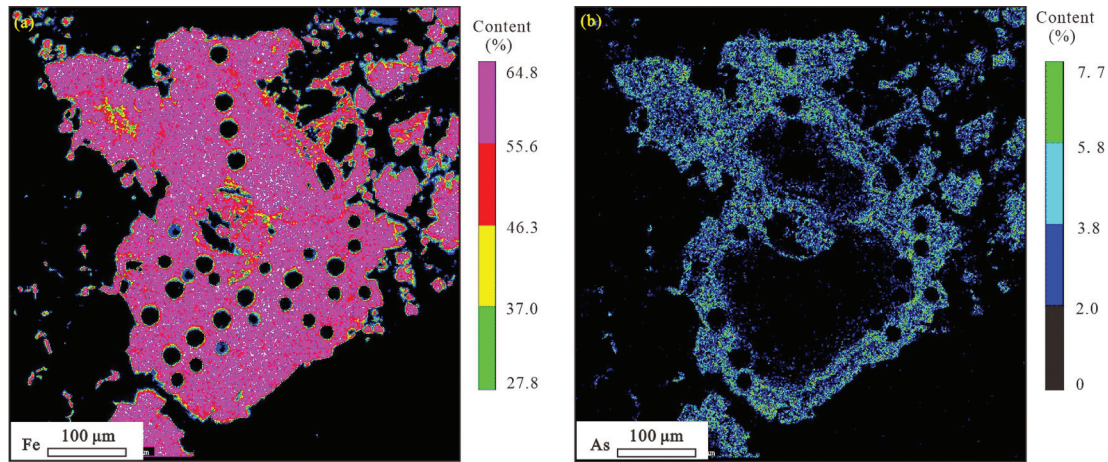


图 18 哈达图铀矿床矿石中黄铁矿电子探针面扫描图像

a, b—黄铁矿 Fe、As 单元元素扫描图像, 黄铁矿核边 As 含量变化明显; 黑色圈为 LA-ICP-MS 微量元素及 S 同位素测试剥蚀坑

Fig. 18 EPMA elements scanning images of pyrite in ores from the Hadatu deposit

a, b—Fe, As elements scanning images of zoned pyrite with significant variation in As content from core to margin; Black holes represent LA-ICP-MS trace elements and S isotope composition measurement pits

流体的性质。

(4) 黄铁矿成因意义

哈达图岩相学研究结果表明, 含铀矿物与环带状黄铁矿成因关系明显, 主要体现在: (1) 脉状、团块状黄铁矿中环带状黄铁矿同含铀矿物在空间位置上高度一致, 含铀矿物产出于黄铁矿边缘或裂隙中, 两者关系密切; (2) 矿化砂岩中相比于围岩普遍含有较高的 U、Co、Ni、Zr、Zn、S 和有机质等元素含量, 且具有较高的 Co/Ni 比值。这说明哈达图铀矿床中含矿砂岩经历了富这些元素和有机质流体的改造, 该流体比典型的氧化还原大气降水流体温度要高, 这与黄铁矿元素和硫同位素特征指示的流体性质是一致的, 成矿流体是深部富含铀多金属和有机质的还原流体。

哈达图铀矿床黄铁矿核部 As、Mo、Se、Sb 元素含量较低, 与中国伊犁蒙其古尔典型层间氧化型砂岩铀矿黄铁矿相应微量元素含量相当或略高(黄广文等, 2021), 而其边部这些元素的含量则要高的多(见前文), 说明核部的形成应主要是从含这些元素较低和较高的 SO_4^{2-} 离子氧化大气降水流体被还原形成, 而后受富含 As、Mo、Se、Sb 等元素和有机质流体作用, 致使黄铁矿边部富集这些元素。

黄铁矿的 Co/Ni 比值是确定黄铁矿成因的有效方法(Bralia et al., 1979)。研究表明, 沉积成因的黄铁矿 Co/Ni 比值一般小于 1, 与火山或岩浆热液相关

的矿床产出的黄铁矿 Co/Ni 比值大于 1 (Loftus Hills and Solomon, 1967; Bralial et al., 1979)。S、Se 元素具有相似的地球化学特征, 黄铁矿中的 S 可被 Se 部分替代, 而这种类质同象在内生热液条件下更容易进行。相关研究表明, 一般岩浆热液成因黄铁矿 Se 含量大于 20×10^{-6} , 沉积成因则为 $0.5 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$ 。火山热液成因的黄铁矿富含 Mo 等中温元素, 变质热液成因富含 Ti、Cr、Mo 等高中温元素(严育通等, 2021)。哈达图环带状黄铁矿从核部至边部 Se、Sb、Mo、As 微量元素含量增高, 黄铁矿 Se 含量也从核部的小于 20×10^{-6} 增加至边部的 $60 \times 10^{-6} \sim 80 \times 10^{-6}$, 黄铁矿核部 Co/Ni 比值小于 0.25, 边部增加至 0.5 ~ 1, 与 As 含量具有正向协同变化关系, 也表明流体应具有一定的温度, 来自较大埋深部位。

黄铁矿硫同位素的变化主要有细菌硫酸盐还原(BSR)、甲烷厌氧氧化作用(AOM)、有机物热解(TDS)、热化学硫酸盐还原作用(TSR)、无机还原作用等, 前两者主要导致黄铁矿富轻硫 ^{32}S ; 后三者则相反, 相对富重硫 ^{34}S 。哈达图铀矿床中黄铁矿核部 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 为正值, 最高为 29.24‰, 向边部逐渐过渡到很大负值, 最小为 -43.24‰(表 6), 反映黄铁矿形成经历了很大的环境变化或流体性质的变化和演化。黄铁矿核部硫同位素正值表明其开始形成时, 含矿层赛汉组上段由于其氧化建造性质, 其中流体硫主要是富重硫的 SO_4^{2-} , 受深部流体的无机还原作

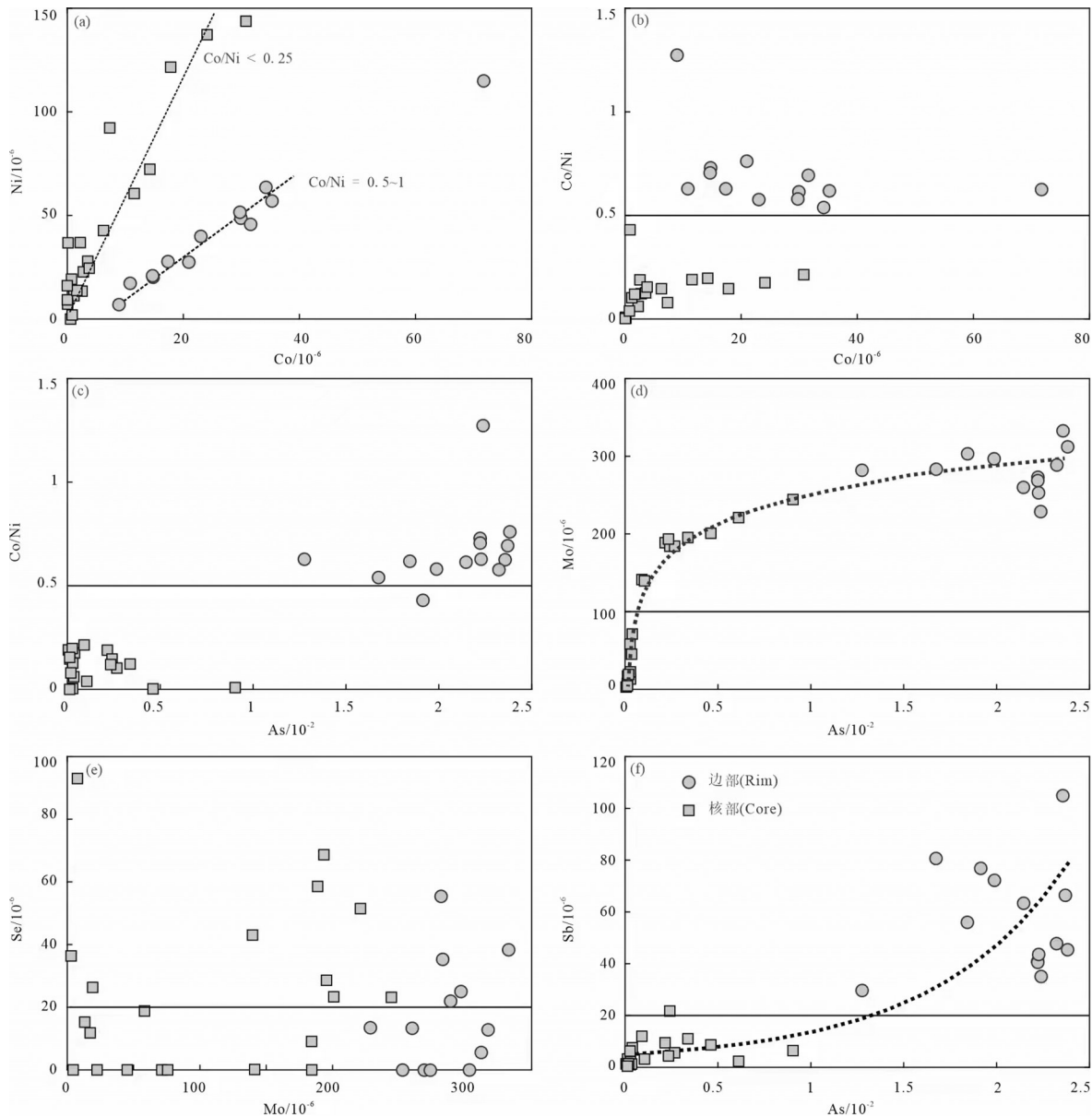


图 19 哈达图铀矿床矿石中黄铁矿微量元素组成图解

a~f 黄铁矿核边 Co、Ni、As、Mo、Se、Sb 微量元素组成变化明显

Fig.19 Diagram of trace elements of zoned pyrite in ores from the Hadatu deposit

a~f: Significant variation of Co, Ni, As, Mo, Se, Sb contents from core to margin

用,或同时受到源自下伏地层产生的富 H₂S 还原作用,该 H₂S 扩散到氧化沉积建造后,由于被重新氧化,造成残留的 H₂S 富含重硫 ³⁴S (Fry et al., 1988),由此形成的黄铁矿核部富重硫,显示正的 δ³⁴S_{V-CDT};随着富铀和有机质深部还原性流体的不断渗出至含矿层,氧化砂体被还原成灰色砂体,整体环境由氧化变成还原,此时,黄铁矿的形成主要是游离的 Fe²⁺ (含矿层中被还原形成或由深部流体带入,矿化砂岩铁含量是增加的)和深部流体带入的 H₂S (灰色

体中硫也是增加的)结合形成。由于来自深部烃源岩流体的 H₂S 主要是生物硫成因,其富轻硫 ³²S,故硫同位素 ³⁴S_{V-CDT} 值变小,甚至出现负值,随着深部流体作用的持续加强,形成的边部黄铁矿 ³⁴S_{V-CDT} 负值越来越大,从而表现出黄铁矿核部和边部出现很大的极差值。事实上,典型的潜水或层间氧化作用形成的还原带黄铁矿很难有如此明显的硫同位素差值,如伊犁盆地蒙其古尔铀矿床中黄铁矿的 ³⁴S_{V-CDT} 值变化范围为 -17.30‰ ~ 3.90‰,平均值为 -5.73‰

表5 哈达图铀矿床矿石中黄铁矿微量元素组成(10^{-6})
Table 5 Trace elements compositions of zoned pyrite in ores from the Hadatu deposit (10^{-6})

测点	位置	Co	Ni	As	Se	Mo	Sb	Co/Ni
1		34.23	63.44	16739.68	35.35	283.02	80.62	0.54
2		29.77	51.32	19876.39	25.00	296.58	72.23	0.58
3		17.36	27.60	12764.65	55.45	281.78	29.69	0.63
4		35.25	56.93	18434.77	0.00	303.34	55.92	0.62
5		71.75	114.93	23569.42	38.42	332.68	104.91	0.62
6		10.84	17.24	22263.99	0.00	252.76	43.41	0.63
7	边部	29.91	48.70	21453.20	13.34	260.12	63.3	0.61
8		14.67	20.74	22213.23	0.00	269.12	40.62	0.71
9		14.77	20.27	22220.88	0.00	273.09	40.97	0.73
10		0.84	1.96	19149.17	0.00	75.68	76.85	0.43
11		20.94	27.54	23819.82	5.57	311.96	45.54	0.76
12		8.95	7.03	22380.30	13.46	228.48	35.11	1.27
13		23.03	39.89	23237.46	21.90	289.05	47.83	0.58
14		31.59	45.60	23714.41	12.83	317.13	66.53	0.69
15		24.09	137.24	385.33	0.00	71.24	7.56	0.18
16		11.53	60.59	55.58	36.36	2.94	1.31	0.19
17		17.81	121.60	131.26	11.81	17.28	3.25	0.15
18		2.55	13.46	2153.40	58.54	188.73	9.49	0.19
19		6.25	42.71	2406.04	9.08	184.15	21.73	0.15
20		14.23	72.29	264.94	18.80	58.21	6.28	0.20
21		30.78	143.76	902.89	0.13	141.25	11.99	0.21
22		2.78	22.76	3379.34	28.60	195.40	11.02	0.12
23		3.53	27.91	289.50	15.24	13.17	2.17	0.13
24	核部	3.79	24.53	122.25	92.98	7.69	1.45	0.15
25		0.14	36.79	284.87	0.00	22.49	1.01	0.00
26		2.24	36.89	347.44	0.00	45.25	1.28	0.06
27		7.31	92.27	187.17	26.34	19.14	1.37	0.08
28		1.16	11.24	2664.03	0.00	184.29	5.62	0.10
29		0.06	7.20	9036.36	23.16	244.33	6.46	0.01
30		0.58	0.00	6110.11	51.48	220.97	2.34	—
31		0.02	9.26	4612.74	23.33	200.90	8.66	0.00
32		1.65	13.81	2334.30	68.67	193.44	4.37	0.12
33		0.74	19.26	1043.70	43.04	139.62	3.18	0.04
34		0.00	16.09	122.54	0.00	4.45	0.43	—

注:核工业北京地质研究院激光剥蚀等离子体质谱(LA-ICP-MS)分析。

(黄广文等,2021)。而受油气还原改造形成的后生灰色砂体中黄铁矿 $^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 呈较大负值,如松辽盆地钱家店铀矿床油气还原形成的黄铁矿 $^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 为 $-47.1\text{‰} \sim -21.3\text{‰}$ (林锦荣等,2009)、鄂尔多斯盆地北部受油气二次还原形成的黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 也表现

为较大的负值(易超等,2017);现代黑海深部还原环境下沉积物中草莓状黄铁矿 $^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值可达 $-40\text{‰} \sim -55\text{‰}$ (王东升等,2022)。由此可见哈达图砂岩铀矿床中黄铁矿边部很大的负值反映其与深部富有机质流体有密切的成因联系,即前者是在后者影响下形成。

4.2.4 有机物质证据

(1)有机质的类型

含矿层赛汉组上段氧化红杂色岩系有机质含量很低,而还原灰色砂体有机质含量较高,且铀矿化与有机质关系密切。为研究确定控矿灰色砂体中有机质是原生产于含矿层中的有机质还是深部还原流体带入,即外来成因。为此开展了显微镜下鉴定、扫描电镜、激光拉曼、氯仿沥青“A”、饱和烃气相色谱、流体包裹体等研究,发现相当比例有机质具有外源的特征,并与深部腾格尔组、阿尔善组有机质具成因联系,表明来自这些深部层位。

野外岩心观察可见含矿段岩石中灰色岩石中偶见炭质碎屑,常见细分散状有机质,镜下观察则可见含矿岩石中常见有机质细脉。通过野外观察和室内显微鉴定,含矿目的层中有机质主要是3种类型:固体有机质(地沥青为主)、液态有机质(孔隙油及液烃包裹体)和气体有机质(气态烃包裹体)。

固体有机质可分为两个亚类,一类具有植物胞腔结构特征(图21a),应该为沉积作用所形成的古植物碎屑;另一类沿含矿砂岩的微裂缝呈不规则脉状分布(图21b),具有竹节状收缩裂隙,为地沥青,或充填于矿物溶蚀孔洞中,与铀矿物密切共生(图21c),这类有机质在偏光镜下呈黑色,反光镜下呈银色。对这些有机质细脉进行激光拉曼分析,结果表明在 $1000 \sim 2000 \text{ cm}^{-1}$ 范围内存在 1336 cm^{-1} 及 1590 cm^{-1} 附近两个明显的特征峰,符合沥青的特征峰(图21j-①、图21j-③)。在UV激发荧光显微镜下,赋矿砂岩粒间孔隙中显示强浅蓝色荧光,指示赋矿砂岩中存在被黏土矿物所吸附的液态有机质(轻烃组分)(图21d、e),此外,在赋矿砂岩石英碎屑微裂隙中还观察到了显示强浅蓝色荧光的轻质油包裹体(图21g、h),这些证据都表明哈达图矿床赛汉组赋矿砂岩中经历了烃类流体的充注事件。激光拉曼分析显示,赋矿砂岩中的气体包裹体存一定数量的 CH_4 (图21f、图21i、图21j-②)。酸解烃分析结果显

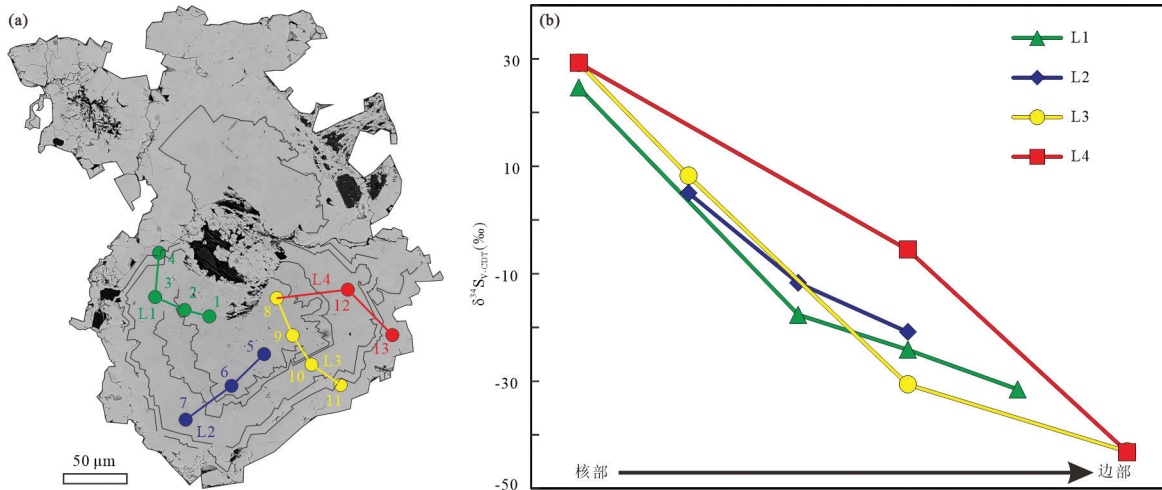


图20 哈达图铀矿床矿石中黄铁矿S同位素变化特征

a—环带状黄铁矿产出特征;b—黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 从核部至边部连续降低;图a中L1、L2、L3、L4为LA-MC-ICP-MS黄铁矿S同位素测试剖面,与图b和表6对应;圆圈为LA-MC-ICP-MS黄铁矿S同位素测试点位,测试点位编号同表6对应

Fig. 20 Sulfur isotope compositions of zoned pyrite in ore from the Hadatu deposit

a—Zoned pyrite; b—Pyrite $\delta^{34}\text{S}$ values decrease continuously from core to margin. L1, L2, L3, and L4 measurement profiles in Fig. 20a corresponding to those in Fig. 20b, and Table 6. The circles represent measurement points

示,部分赋矿砂岩样品经酸解后释放的 CH_4 含量高达497 $\mu\text{L}/\text{kg}$,是无矿砂岩中甲烷含量的5倍以上(表7)。

(2) 有机质的来源

为了判断有机质来源,对哈达图矿床含矿砂岩开展了酸解烃分析、有机质抽提实验及其组分分析。

酸解烃分析结果指示,砂体中的烃类气体为有机成因的油型气,是以低等水生生物为主的腐泥型(I型)和偏腐泥型(II型)有机质在成熟—高成熟演化阶段的产物。目前盆地中地层主要以下白垩统沉积为主,同时也是油气、砂岩型铀矿和煤炭等多能源富集的主要层位。盆地中共发育了4套暗色泥岩系,阿尔善组、腾一段、腾二段和赛汉组下段,其中阿尔善组和腾一段暗色泥岩厚度大,有机质丰度高($\text{TOC}=1.40\% \sim 3.48\%$,平均2.69%)、母质类型好(主要以II型为主,部分I和II型)、生烃潜量大($S1+S2=2.49 \sim 15.56 \text{ mg}/\text{g}$,平均12.42 mg/g)、有机质主要产于低熟—高成熟阶段(阿尔善组 $R_o=0.8\% \sim 2.0\%$,腾一段 $R_o=0.5\% \sim 1.3\%$),是盆地中油气的主要烃源层段。腾二段地层岩性主要以暗色泥岩为主,有机质丰度高(TOC 平均2.07%)、类型较差(主要为II型)、有机质成熟度底($R_o < 0.5\%$,主要处于未成熟阶段),不能作为盆地的有效烃源岩层段(赵文智和方杰,2007)。结合区域上烃源岩地球化学特征、油气

地球化学特征及来源综合分析,认为研究区赛汉组上段古河道砂体中烃类气主要来源于下白垩统阿尔善组成熟—高成熟和腾一段的低熟—成熟阶段湖相泥岩和偏腐泥型烃源岩(主要为II型,部分为I型和II型)。

氯仿沥青“A”是指可溶于氯仿的有机质,由饱和烃、芳烃、沥青质和非烃组成,其中总烃(饱和烃+芳烃)的占比可以反映岩石中可溶有机质的丰度、烃类的丰度,并且氯仿沥青“A”的族组成与有机质母质有关,在一定程度上能够反映有机质类型的差异。本研究开展了氯仿沥青“A”抽提物的饱和和烃色谱分析。哈达图矿床赋矿砂岩样品中部分含矿岩石氯仿沥青“A”及其族组分分析有关结果如表8所示。

哈达图矿床赋矿砂岩样品的氯仿沥青“A”含量0.0033%~0.5702%。总烃占比较低,为0.96%~47.83%,其中饱和烃含量介于0.74%~37.84%,芳烃含量介于0.08%~28.99%;非烃+沥青质占比为33.78%~92.84%,其中沥青质含量为12.16%~86.44%,非烃含量为1.63%~34.04%。戴金星(1993)的研究表明,饱和烃与芳烃一般集中出现在I型有机质的氯仿沥青中,非烃相对富集在III型有机质中,原油、煤成油有近90%及以上总烃(饱和烃+芳烃)含量,而煤主要以非烃及沥青质为主。一般来说,类型越好的干酪根所生成的氯仿抽提物中饱和

表6 哈达图铀矿床矿石中黄铁矿S同位素组成
Table 6 Sulfur isotope compositions of zoned pyrite in ores from Hadatu deposit

位置	测点编号	³² S(v)	³⁴ S/ ³² S	³³ S/ ³² S	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$
L1	1	10.93174	0.0487	0.0083	24.67
L1	2	12.08678	0.04666	0.00812	-17.66
L1	3	12.74273	0.04634	0.00809	-24.15
L1	4	12.57124	0.04599	0.00806	-31.54
L2	5	11.51789	0.04776	0.00822	5.03
L2	6	12.24248	0.04694	0.00814	-11.73
L2	7	12.17998	0.0465	0.0081	-20.86
L3/L4	8	10.97545	0.04892	0.00832	29.24
L3	9	11.14651	0.0479	0.00823	8.21
L3	10	11.71352	0.04603	0.00806	-30.62
L3	11	12.24687	0.04543	0.00801	-43.11
L4	12	11.80148	0.04725	0.00817	-5.53
L4	13	7.9177	0.04542	0.00801	-43.24

注:核工业北京地质研究院激光剥蚀等离子体质谱(LA-ICP-MS)分析。

烃含量越高,即原油富含饱和烃,煤富含非烃和沥青质,并按照 I—II—III 型生油岩顺序,饱和烃依次减少,III 型分布于饱/芳=1 的线之下(尚慧芸,1981)。

将本研究获得的数据投图至尚慧芸(1981)编制的中国中、新生代油岩氯仿沥青“A”族组分三角图中(图22)。投影结果表明:HD27 样品中的氯仿沥青有机质类型为 I2 型,即含腐殖的腐泥型;HD46 中氯仿沥青为 II 1 型,为腐泥-腐殖混合型;HD25 中氯仿沥青也为腐泥-腐殖混合型;HD151 和 HD152 中氯仿沥青均为 II 2 型,即腐泥-腐殖混合型。虽然 HD45、HD5、HD1 落在煤系圈之外,但仍反映了煤的显著特点,即以高含非烃和沥青质为特点,表明该样品可能含有一定量的煤屑。综上,哈达图矿床大部分赋矿砂岩(铀矿石)中均含有一定的饱和烃和芳烃,可溶有机质类型为腐泥-腐殖混合型或者腐泥型。表明这些可溶有机组分来自原油或者煤成油,即该地区存在油气侵入,赋矿砂岩中的沥青应是富有机质活动演化的产物。

岩石抽提物中饱和和馏分常包含多种多样化化合物成分,这些成分的碳数范围、分子结构、立体化学构型以及数量等分布特征,因有机组分的生源物质、成熟度与演化程度不同而异(张宇龙,2018),正构烷烃参数能够很好地反映源岩成熟度特征。正

表7 哈达图矿床烃类特征统计(据刘武生等,2015)
Table 7 Statistical contents of uranium and hydrocarbon of the Hadatu deposit (Liu et al., 2015)

砂岩分带	样品个数	U/10 ⁶	烃类/($\mu\text{L}/\text{kg}$)		CO ₂ /%
			甲烷	重烃	
黄色砂岩带	20	4.35	92	29.3	0.25
铀矿化带	4	315	497	98.9	2.11
灰色砂岩带	1	15.3	60	20.0	0.18

构烷的碳数分布能够反映母质性质,低碳数的正构烷烃主要来源于浮游生物和藻类脂肪酸(Cranwell et al., 1987),而高碳数的正构烷烃则主要来源于陆生植物的表皮蜡层(Peters et al., 2005)。分析表明,本次分析的哈达图矿床样品的主碳峰数位于 C₁₆~C₃₁,具有前单峰形态和双峰形态的特征,其中3件含矿砂岩(HD5、HD21、HD25)和1件含砾泥岩(HD27)样品的饱和烃气相色谱主碳峰数均为 C₁₆(表8,表9),表明其生油母质主要来自低等水生生物。2件含矿段泥岩样品(HD151及HD152)的主碳峰数均为 C₂₅,指示其生油母质主要源自高等植物。因此,哈达图矿床赋矿砂岩中的残留烃类的生油母质以低等水生生物输入为优势,同时也存在一定量的高等植物输入。低等水生生物输入反映油气流体的充注事件,而高等植物输入可能与有样品中含有植物炭屑有关。

综上所述,哈达图矿床存在来自深部地层的还原性流体。含矿段砂岩中的可溶性有机质类型主要为 II 1 型,含矿砂岩中残留烃类饱和烃色谱表现出了低等水生生物输入占优势的低碳数前单峰形态,与二连盆地典型油气藏的有机质类型(II 1 型为主)和饱和烃主碳数(C₁₆~C₂₁)具有很大的相似性(吴飘,2020;冯伟平等,2020),指示赋矿砂岩中的地沥青、轻质油、气烃等与深部阿尔善组及腾格尔组烃源岩产生的还原性流体的演化有关。在还原性流体充注至赋矿砂岩后,由于保存条件差,在具有地表补给水的条件下,轻烃逸散、水洗、氧化、生物降解等作用导致硫、氮、氧(NSO-化合物)的增加,从而使沥青质含量增高(Peters et al., 1994),进而表现了赋矿砂岩中地沥青的现今赋存特征。

4.2.5 控矿灰色砂体形态特征及与深部构造通道关系

哈达图矿区含矿层灰砂率等值线图(图6,图23,图24,图25)表明,灰色砂体呈现大致上以

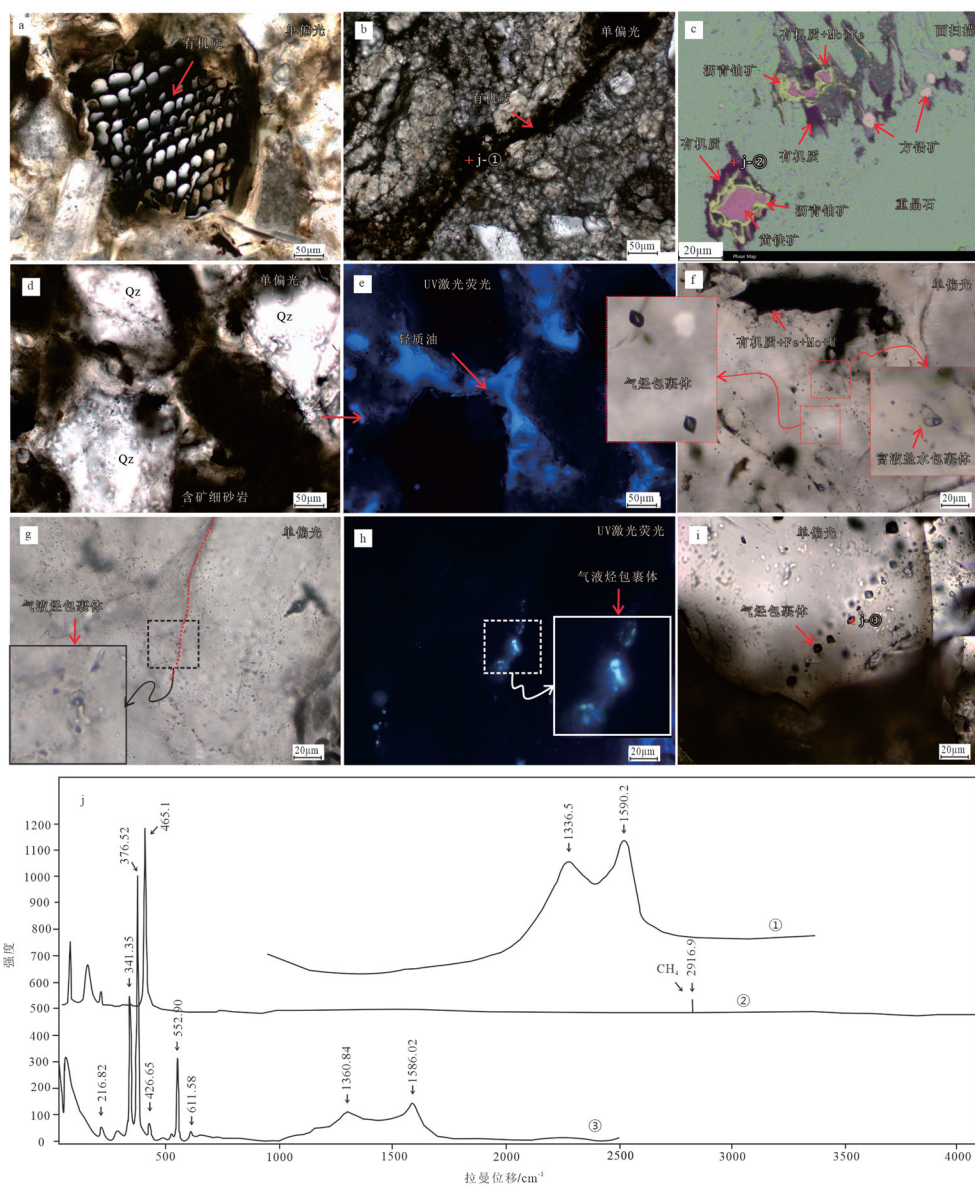


图21 哈达图矿床赋矿砂岩中有机质显微特征和拉曼分析

a—赋矿砂岩粒间缝隙中分散状分布、具植物胞腔结构的有机质；b—赋矿砂岩粒间裂缝中成带状分布、呈黑色的有机质脉(地沥青)；c—赋矿砂岩重晶石矿物中沿溶蚀孔洞中分布的沥青铀矿、黄铁矿、方铅矿及共生的有机质；d、e—赋矿砂岩粒间孔隙中受轻质油浸染，显示浅蓝色的荧光；f—赋矿砂岩重晶石矿物中沿溶蚀孔洞中分布的沥青铀矿、辉钼矿及共生的有机质，并见成群分布的气烃包裹体及富液盐包裹体；g、h—赋矿砂岩石英碎屑中沿微裂隙成带状分布的气液烃包裹体，显示强浅蓝色的荧光；i—赋矿砂岩石英碎屑中沿微裂隙成带状分布的气烃包裹体；j—赋矿砂岩粒间裂缝中成带状分布的有机质脉的拉曼光谱图(①)、赋矿砂岩石英碎屑中沿微裂隙成带状分布的气烃包裹体的拉曼光谱图(②)、赋矿砂岩重晶石矿物沿溶蚀孔洞中与沥青铀矿、黄铁矿共生的有机质的拉曼光谱图(③)

Fig. 21 Microscopic characteristics and Raman spectrum of organic matter in mineralized sandstone of Hadatu deposit
a—Scattered organic matter with paleo-plant cell structure in intergranular pores of mineralized sandstone; b—Banded, black organic matter veins (bitumen) in intergranular fractures of mineralized sandstone; c—Pitchblende, pyrite, galena and symbiotic organic matter distributed along dissolution holes in barite minerals of mineralized sandstone; d, e—The intergranular pores of the mineralized sandstone infiltrated by light oil, showing light blue fluorescence; f—Pitchblende, molybdenite and symbiotic organic matter distributed in dissolution pores of barite of the mineralized sandstone, and gas-hydrocarbon fluid inclusions and liquid-rich brine fluid inclusions distributed in groups in barite; g, h—Hydrocarbon fluid inclusions distributed in bands along micro-fractures in quartz debris of mineralized sandstone, showing strong light blue fluorescence; i—Gas-hydrocarbon inclusions distribution along micro-fractures in quartz debris of mineralized sandstone; j—Raman spectrum of organic matter veins distribution in micro-fractures of mineralized sandstone (①), Raman spectra of gas-hydrocarbon fluid inclusions distributed in bands along micro-fractures quartz debris in mineralized sandstone (②), Raman spectrum of organic matter coexisting with pitchblende and pyrite in barite of mineralized sandstone (③)

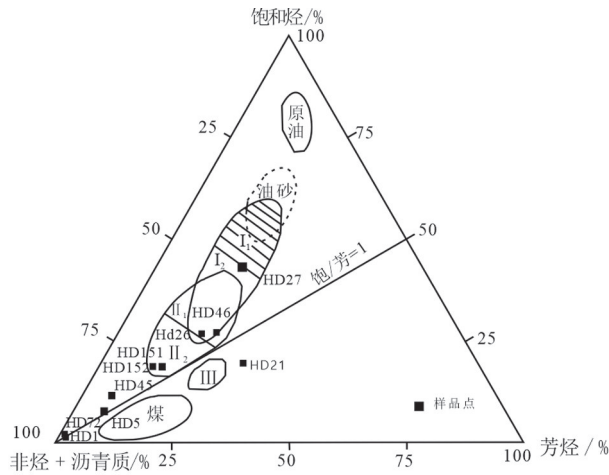


图22 哈达图矿床含矿岩石氯仿沥青A族组分三角投图(底图据尚慧芸和李晋超, 1981)

II—腐泥型; I2—含腐殖腐泥型; II 1—腐泥—腐殖混合A型; II 2—腐泥—腐殖混合B型; III—腐殖型

Fig.22 Triangular diagram of the chloroform bitumen A group fraction of the ore-bearing rocks of the Hadatu deposit (base map from Shang Huiyun and Li Jinchao, 1981)

I—Sapropel type; I2—Sapropel with humus type; III—Sapropel-humus mixed A type; II2—Sapropel-humus mixed B type; III—Humus type

Fzk32-71 钻孔周围为中心, 整个灰色砂体呈孤立蘑菇状或橄榄状, 被氧化砂体包围, 且发现圈定出的矿体形态呈半环状、环状、带状沿灰色砂体边缘区域分布(图6, 图26)。工业品位铀矿化主要分布在灰砂率 20%~80% 的区域; 在厚大灰色砂体的中间部位往往发育矿化异常。这些特征表明灰色砂体应是深部富铀富有机质还原性渗出流体沿断裂构造、不整合面或下切沉积界面河道等有利通道上升(图

27), 在构造挤压抬升动力机制下, 对原生氧化砂岩进行再还原所致, 灰色体的形态、空间展布特征受这些深部构造通道所控制。

值得注意的是除了在赛汉组上段氧化沉积砂体灰色砂体中发现铀矿化外, 在上白垩统二连组氧化沉积建造局部灰色砂体中也发现了铀矿化(图25, Fzk64-67), 该局部灰色砂体发育在不整合面附近, 受不整合面和深部构造通道交汇部位控制, 其形成和其中铀矿化的成因应与赛汉组上段灰色砂体与铀矿化一致, 是深部富铀富有机质还原性渗出流体作用所致。

4.2.6 铀存在形式依据

采用显微观察、扫描电镜、电子探针(数据见表8)等分析技术方法, 对哈达图铀矿床含矿段工业品位矿石、铀矿化岩石、无铀异常灰色岩石以及氧化色岩石等样品中铀的赋存状态等进行研究。结果表明, 除品位较高的铀矿石以外, 氧化带岩石、无铀异常灰色岩石以及低品位铀矿石中, 几乎观察不到铀矿物。在铀含量 100×10^{-6} 以下的岩石中, 未见铀矿物; 铀含量 $100 \times 10^{-6} \sim 1000 \times 10^{-6}$ 的铀矿石中, 可见少量超显微(粒径 $< 1 \mu\text{m}$) 铀矿物; 在铀含量 $1000 \times 10^{-6} \sim 10000 \times 10^{-6}$ 的铀矿石中, 扫描电镜下常见超显微状铀矿物及其集合体; 而在铀含量大于 10000×10^{-6} 的矿石中, 可见显微状(粒径 $1 \sim 1.5 \mu\text{m}$)、超显微状铀矿物及其集合体, 其共性特征是铀矿物极其细小。铀矿物多吸附在黏土矿物、黄铁矿、有机质表面, 以及分布在岩石或矿物的微裂隙内。经电子探针分析, 其铀矿物类型主要为沥青铀

表8 岩石中氯仿沥青及组分含量(%)

Table 8 Chloroform asphalt and component content in the rocks of Hadatu deposit(%)

样品编号	岩性	氯仿沥青	沥青质	饱和烃	芳烃	非烃	回收率
HD1	深灰色中砂岩	0.1657	86.44	0.88	0.08	6.40	93.79
HD5	灰色砂砾岩	0.0313	66.37	7.67	6.49	16.52	97.05
HD21	灰色粗砂岩	0.0076	30.43	18.84	28.99	17.39	95.65
HD25	灰色含砾细砂岩	0.0103	25.00	23.13	15.63	22.50	86.25
HD27	灰色泥质含砾粗砂岩	0.0098	12.16	37.84	16.22	21.62	87.84
HD45	灰色含碳屑粉砂岩	0.0199	51.25	10.42	5.83	22.08	89.58
HD46	灰色泥岩	0.0033	26.32	26.32	21.05	23.68	97.37
HD72	灰色含碳屑砂岩	0.5702	82.24	0.74	0.54	1.63	85.15
HD151	灰色泥岩	0.0040	27.66	17.02	12.77	34.04	91.49
HD152	灰色泥岩	0.0035	33.33	17.78	11.11	33.33	95.56

注: 分析实验室为中国石油大学(北京), 气相色谱使用仪器为 Thermo-Finigan Trace-DSQ 气相色谱质谱联用仪; 色谱测试载气为 99.999% 氮气; 色谱柱采用 HP-5MS 弹性石英毛细柱; 进样口温度为 300°C。

表9 哈达图矿床含矿段岩石饱和烃色谱特征参数
 Table 9 Characteristic parameters of saturated hydrocarbon chromatography of ores of the Hadatu deposit

样品号	钻孔号	岩性	碳数范围	主碳峰
HD1	Fzk32-15	深灰色中砂岩(上部矿石)	C ₁₅ ~C ₃₅	C ₂₄
HD5	Fzk16-23	灰色砂砾岩(上部矿石)	C ₁₄ ~C ₃₅	C ₁₆
HD21	Fzk16-0	灰色粗砂岩(上部矿石)	C ₁₄ ~C ₃₅	C ₁₆
HD25	Fzk16-0	灰色含砾细砂岩(下部矿石)	C ₁₄ ~C ₃₄	C ₁₆

矿,另有少量超显微状集合体为铀石及铀的磷酸盐。下面具体对各类型铀矿物进行描述:

(1)沥青铀矿:沥青铀矿主要发现于HD1号样品的特富矿石中,以显微粒状(粒径1~1.5 μm)、超显微粒状(粒径<1 μm)及集合体形式赋存于砂岩粒间孔隙中,部分分布于矿物的溶蚀孔或微裂隙中(图28a),沥青铀矿与黏土矿物、黄铁矿紧密伴生(图28b、c),部分产在植物胞腔结构黄铁矿中,也发现了一些沥青铀矿和黄铁矿共生(图28d)。长石的溶蚀孔和裂隙中也发育立方体黄铁矿与微粒状沥青铀

矿(图28e)。经电子探针分析(表10),沥青铀矿含有一定量的Si、P、Ca、S、Fe、Al、K等元素,其中SiO₂含量变化为1.01%~12.41%,P₂O₅含量变化为1.77%~8.68%,CaO含量变化为1.65%~4.39%,说明其成分复杂。

(2)铀石:主要发现于HD27、HD1、HD55号样品中。铀石以超显微纺锤状微晶或集合体形式赋存于碎屑颗粒表面、黏土矿物表面与粒间孔隙中,在微晶石英颗粒表面发现铀石,呈超显微纺锤状微晶(<1 μm)集合体赋存(图28f)。铀石赋存在碎屑颗粒表面往往发生黏土化。此外,在HD1号样品中的长石裂隙中,发现了充填于胶状黄铁矿周围的疑似铀石矿物(图28g),经电子探针分析,其化学成分为UO₂含量为58.77%,SiO₂含量为19.31%。杂质为Ca、P、Al、Fe等,P₂O₅含量为6.98%,CaO含量为3.66%,Al₂O₃的含量为2.03%,FeO含量为0.24%。

(3)铀的磷酸盐:在HD43样品中偶见铀的磷酸盐以显微粒状(直径约2 μm)赋存在填隙物中。王文

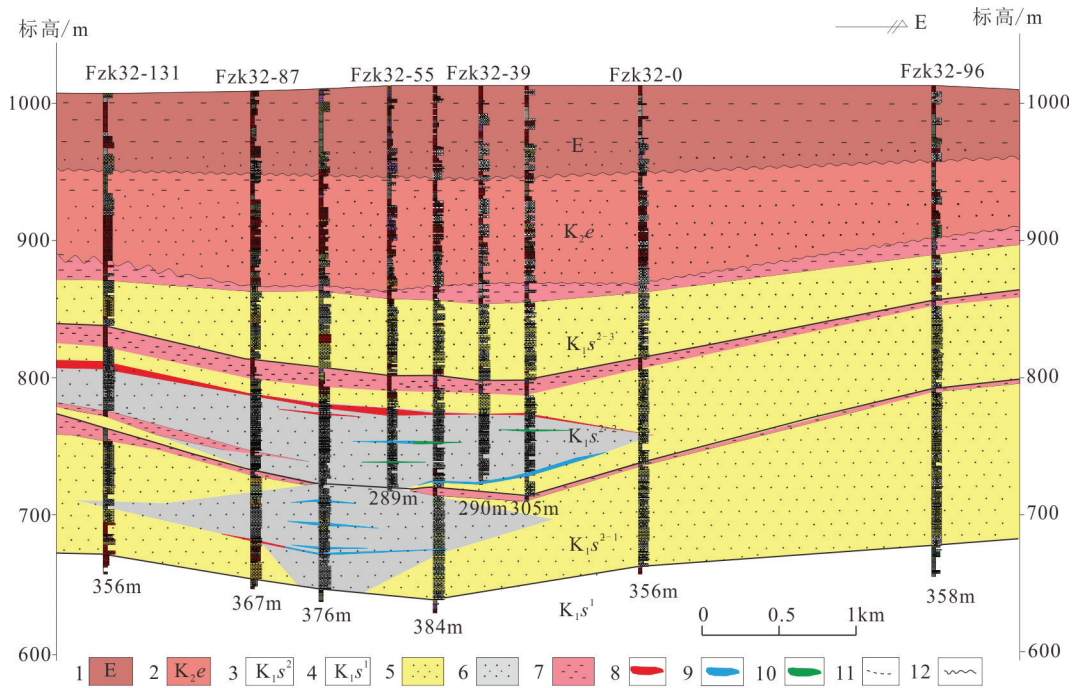


图23 F32线钻孔剖面(位置见图6,据核工业208大队施工钻孔编制)

1—伊尔丁曼哈组;2—二连组;3—赛汉组上段;4—赛汉组下段;5—氧化红杂色砂体;6—灰色砂体;7—红色泥岩;8—矿体;9—铀矿化体;10—铀异常体;11—地层界线;12—不整合面

Fig. 23 Borehole profile of F32 line(position see Fig. 6, after boreholes by Nuclear Industry Exploration Team 208)

1—Yierdingmanha Formation; 2—Erlian Formation; 3—Upper member of Saihan Formation; 4—Lower member of Saihan Formation; 5—Oxided sandstone; 6—Gray sandstone; 7—Red mudstone; 8—Ore body; 9—Uranium mineralization body; 10—Uranium anomaly body; 11—Stratigraphic boundary; 12—Unconformity

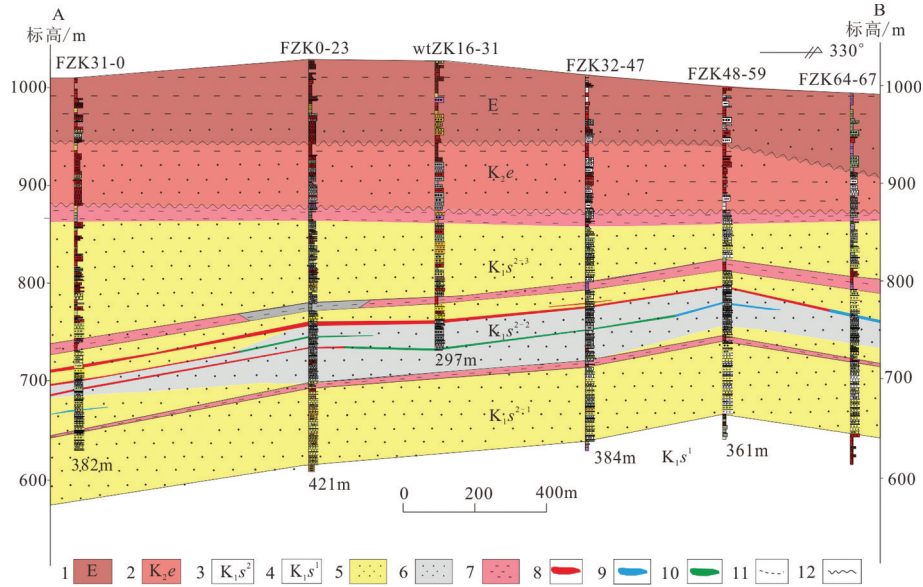


图24 哈达图矿床A-B地质剖面(位置见图6,据核工业208大队施工钻孔编制)

1—伊尔丁曼哈组;2—二连组;3—赛汉组上段;4—赛汉组下段;5—氧化砂体;6—灰色砂体;7—红色泥岩;8—矿体;9—铀矿化体;10—铀异常体;11—地层界线;12—不整合面

Fig. 24 A-B borehole profile of Hadatu deposit (position see Fig. 6, after boreholes by Nuclear Industry Exploration Team 208) 1—Yierdingmanha Formation; 2—Erlian Formation; 3—Upper member of Saihan Formation; 4—Lower member of Saihan Formation; 5—Oxidized sandstone; 6—Gray sandstone; 7—Red mudstone; 8—Ore body; 9—Uranium mineralization body; 10—Uranium anomaly body; 11—Stratigraphic boundary; 12—Unconformity

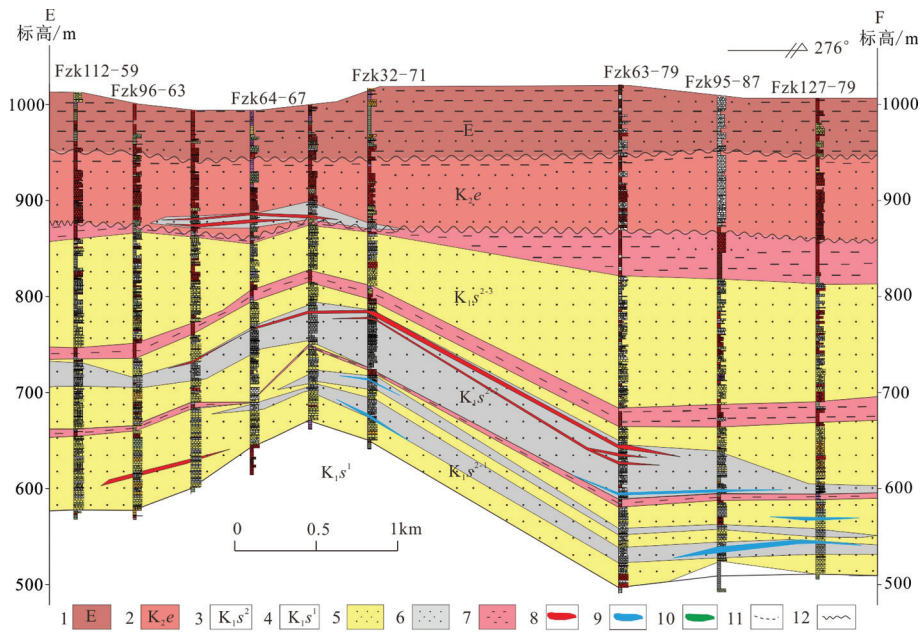


图25 哈达图矿床EF剖面图(位置见图6,据核工业208大队施工钻孔编制)

1—伊尔丁曼哈组;2—二连组;3—赛汉组上段;4—赛汉组下段;5—氧化砂体;6—灰色砂体;7—红色泥岩;8—矿体;9—铀矿化体;10—铀异常体;11—地层界线;12—不整合面

Fig. 24 E-F borehole profile of Hadatu deposit (position see Fig. 6, after boreholes by Nuclear Industry Exploration Team 208) 1—Yierdingmanha Formation; 2—Erlian Formation; 3—Upper member of Saihan Formation; 4—Lower member of Saihan Formation; 5—Oxidized sandstone; 6—Gray sandstone; 7—Red mudstone; 8—Ore body; 9—Uranium mineralization body; 10—Uranium anomaly body; 11—Stratigraphic boundary; 12—Unconformity

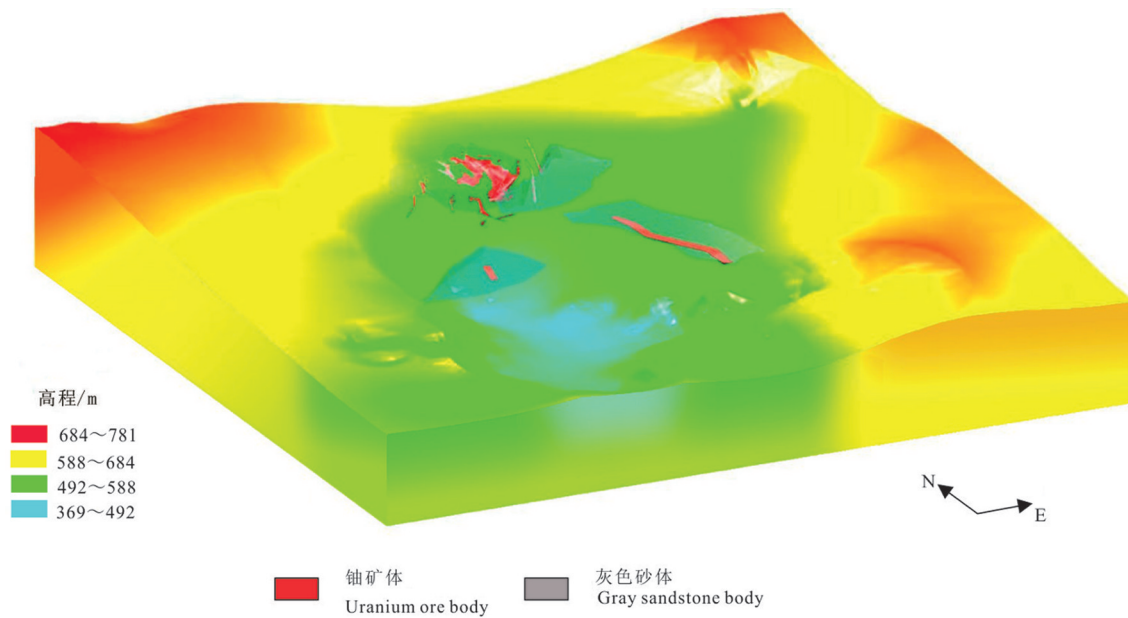


图26 哈达图矿床赛汉组底界面三维和灰色砂体与铀矿体投影分布图

Fig. 26 3D bottom surface of the Saihan Formation and the planar projection of the grey sandstone and uranium ore bodies

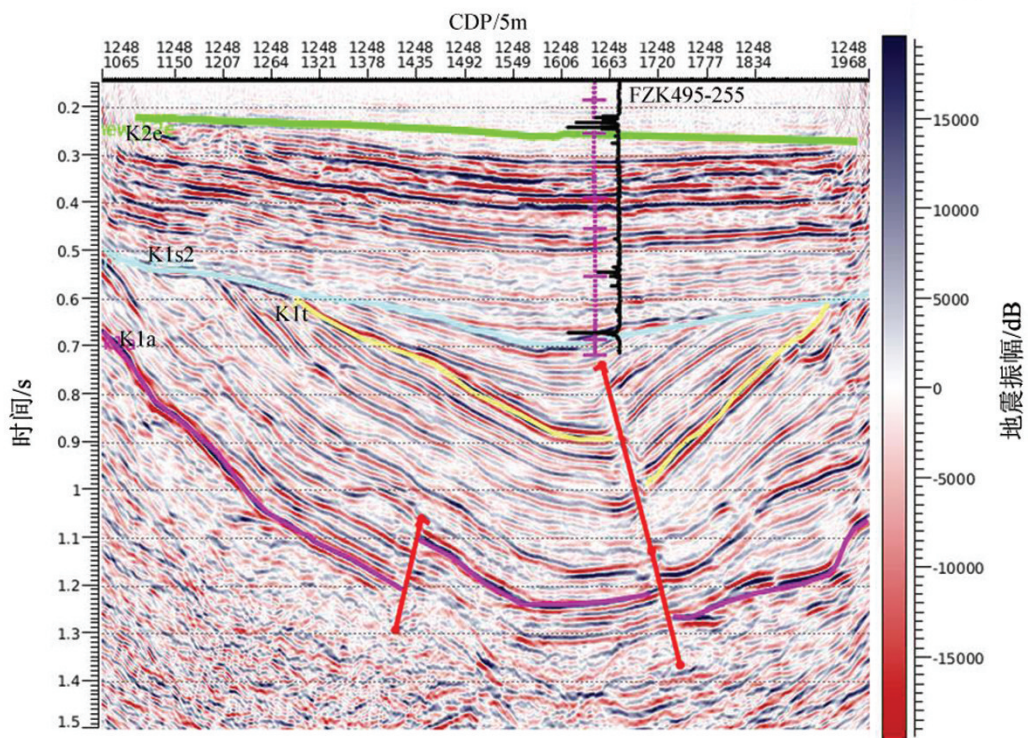


图 27 哈达图铀矿区 L1(位置见图 6)地震剖面中工业铀矿孔与深部构造关系

Fig. 27 Seismic line L1 (location see Fig.6) showing relationship between deep-seated fault and uranium mineralization in the Hadatu deposit

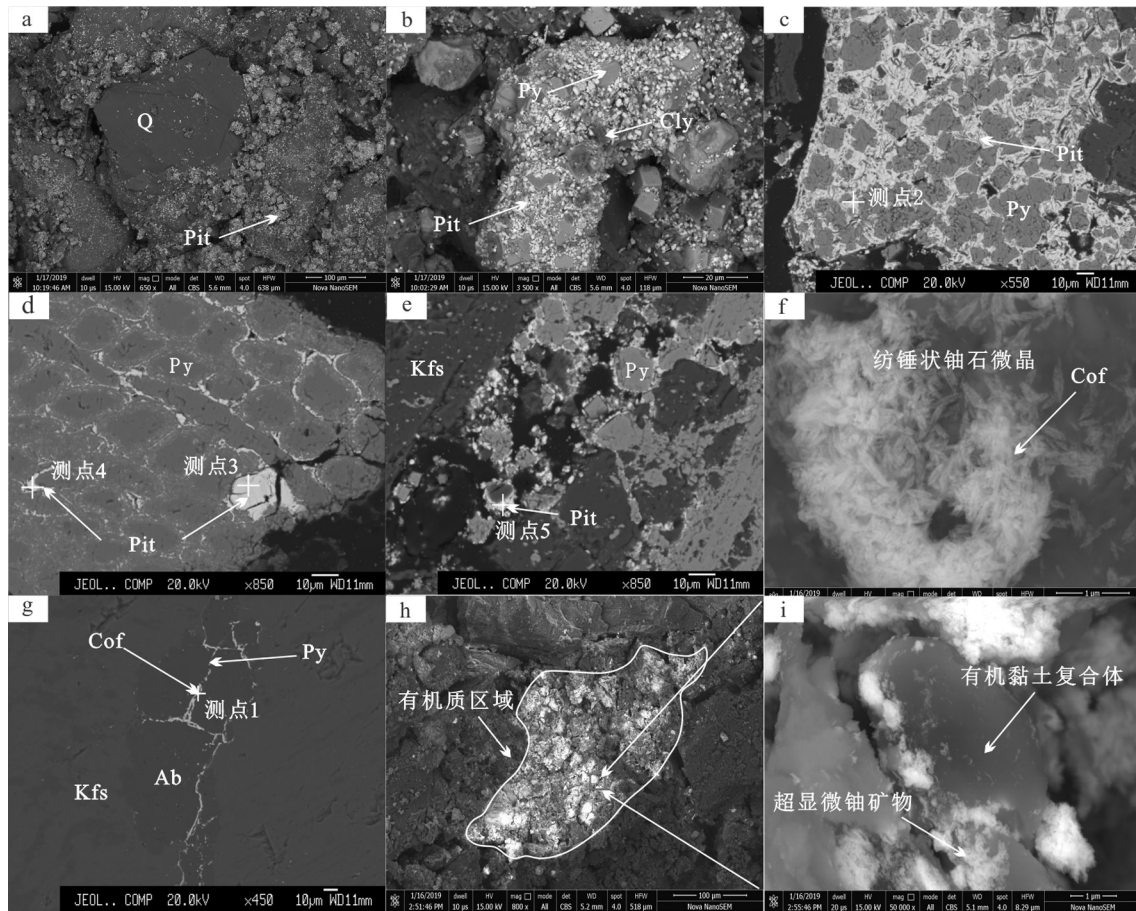


图28 哈达图矿床铀的赋存形式图

a—显微粒状沥青铀矿颗粒赋存在碎屑表面;b—由沥青铀矿、黄铁矿及黏土矿物组成的集合体;c—沥青铀矿、黄铁矿、黏土矿物伴生;d—具有植物胞腔形态黄铁矿中充填的沥青铀矿;e—沥青铀矿赋存在长石裂隙中充填胶状黄铁矿周围;f—超显微纺锤状铀石晶体集合体赋存于微晶石英表面;g—长石裂隙中的铀石;h—有机质表面赋存铀矿物;i—图h中红框部位放大后可见含有机质黏土复合体表面吸附超显微状铀矿物
Q—石英;Pit—沥青铀矿;Py—黄铁矿;Cly—黏土矿物;Cof—铀石;Kfs—钾长石;Ab—钠长石

Fig. 28 Uranium occurrence forms of ores in Hadatu deposit

a—Microgranular on detritus surface; b—Aggregates of pitchblende, pyrite and clay minerals; c—Pitchblende, pyrite and clay minerals assemblage; d—Pitchblende in pyrite with plant cells shape; e—Pitchblende around pyrite filling in feldspar fissures; f—Ultramicro fusiform coffinite on microcrystal surface; g—Coffinite in feldspar fissures; h—Uranium minerals on surface of organic matter; i—Ultramicro uranium on organic clay complex
Q—Quartz; Pit—Pitchblende; Py—Pyrite; Cly—Clay mineral; Cof—Coffinite; Kfs—Potash feldspar; Ab—Albite

广(2016)对哈达图矿床进行研究时认为存在磷钙铀矿(Ningyoite) $(Ca,U^{4+})(H_2O)[PO_4]$,发现部分沥青铀矿被磷钙铀矿交代。由于本次研究只对该类型铀矿物进行了扫描电镜及能谱分析,因此,本文定名为铀的磷酸盐。

此外,也可见富含的有机质区域中赋存大量的铀矿物(图28h),对该类区域放大观察,可见超显微铀矿物吸附在疑似富碳质的黏土矿物中(经扫描电镜能谱分析),推测应为铀有机黏土复合体(图28i)。

哈达图铀矿床铀矿物、含铀矿物常与黄铁矿、黏土矿物、有机质等呈集合体形式共生并且分布在矿物

的微裂隙和溶蚀孔洞中,说明深部渗出流体组分富铀富有机质和铁、硅、磷、钙、铁等,具成分复杂性。

4.2.7 铀矿物与有机质(地沥青)关系

扫描电镜研究发现,哈达图矿床中的铀矿物(主要为沥青铀矿)普遍与有机质和黄铁矿密切相关。铀矿物呈不规则细脉状、星点状和不可见的形式分布于赋矿砂岩的微裂缝有机质中(图29a、c、d)、黄铁矿的生长(外)环带中(图29b)以及碎屑矿物(方解石、重晶石)的溶蚀孔中(图29e、f),铀矿物呈微米-亚微米结构分散于有机质(脉)中,这种有机质(脉)表现为不规则状,表现出明显的可流动性

表 10 哈达图铀矿床铀矿物电子探针成分分析结果(%)

Table 10 Electron probe microanalysis data of uranium minerals in Hadatu deposit(%)

测点	UO ₂	SO ₃	MgO	SiO ₂	K ₂ O	Al ₂ O ₃	CaO	FeO	类型
1	58.77	1.76	0.1	19.31	0.33	2.03	3.66	0.24	铀石
2	67.07	1.46	0.07	12.4	0.27	0.4	4.39	1.21	沥青铀矿
3	83.25	1.73	0.19	1.01	0.27	0.05	3.56	0.65	沥青铀矿
4	84.75	2.37	/	1.21	0.33	/	1.65	2.19	沥青铀矿
5	58.56	8.12	0.24	12.41	0.51	0.55	2.63	6.21	沥青铀矿
测点	P ₂ O ₅	TiO ₂	Y ₂ O ₃	La ₂ O ₃	ThO ₂	ZrO ₂	PbO	总量	
1	6.98	0.11	0.23	/	/	1.05	/	95.39	铀石
2	8.68	/	0.26	0.37	/	1.25	/	98.09	沥青铀矿
3	1.77	/	0.14	/	/	0.22	/	94.54	沥青铀矿
4	1.78	/	0.09	0.39	/	0.31	/	98.15	沥青铀矿
5	7.53	0.24	0.36	0.32	/	1.15	/	99.41	沥青铀矿

注：“/”表示低于仪器检测限，测点位置见图28。

特征,其组分主要是地沥青。铀矿物呈细脉状与有机质(脉)共生且无明显反应边现象说明铀是与有机质一起迁移和沉淀的。此外,方解石(重晶石)的溶蚀孔洞中充填的有机质、黄铁矿和沥青铀矿组合(图29e、f)指示了有机质、铀、铁和硫等元素是共同迁移的成矿流体,这种成矿流体应该是富含有机质、成矿物质、呈酸性的还原性具溶蚀性流体,这种有机质不是植物炭屑,因为它不可能以碎屑非固定形态充填于溶蚀孔洞中。

使用电子探针定量分析了有机质中铀的含量和方解石溶蚀孔洞中的铀含量,结果如表11所示。电子探针分析结果表明,细脉状有机质中的铀含量0.02%~0.12%,总量为0.28%~17.63%,其余未测出的含量应该主要为C质,指示细脉状有机质中含有细分散状不可见铀;方解石溶蚀孔洞中的铀含量为76.1%~78.24%,Fe含量为2.86%~3.11%,总量为92.14%~93.79%,其余未测出的含量应该主要为

C质,指示铀矿物(沥青铀矿)中也富含一定的C质和黄铁矿。此外,王文广等(2016)的研究发现,在哈达图矿床邻区赛汉高毕铀矿床中的矿石充填物中存在黏土矿物与地沥青结合的现象,以及充填物中的地沥青细脉包裹铀矿物的现象。

上述铀矿物和有机质关系研究进一步证实,哈达图铀矿床中超显微结构的铀矿物、含铀矿物与地沥青、黄铁矿、黏土共同产出,深部流体是富铀、富有机质及硅、铁、磷、钾、钠等组分,具还原性和复杂的组成特点。

5 砂岩渗出铀成矿作用和模式

基于二连盆地乌兰察布坳陷格日勒敖都一齐哈日格图凹陷地质构造特征和演化、沉积建造特征和演化及哈达图铀矿床上述岩石学、矿物学、地球化学、年代学研究与矿床的特征,提出了砂岩渗出铀成矿作用和哈达图砂岩铀矿床渗出成因,并建立

表 11 哈达图矿床矿石中地沥青细脉电子探针数据(%)

Table 11 Electron probe microanalysis of bitumen in ore of Hadatu deposit(%)

测点	SiO ₂	FeO	UO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	TiO	ThO ₂	Y ₂ O ₃	MgO	La ₂ O ₃	CaO
1	0.04	0.04	0.04	0.11	0.03	/	/	/	/	/	0.02
2	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02			0.02	/	/	/
3	0.04	0.13	0.03	0.02	/	/	0.08	/	/	/	/
4	0.18	3.06	0.12	0.16	0.31	0.73	/	/	0.17	/	0.68
测点	CeO ₃	P ₂ O ₅	Nd ₂ O ₃	PbO	MnO	K ₂ O	Pr ₂ O ₃	Ta ₂ O ₃	ZrO ₃	Nb ₂ O ₃	总量
1	/	0.04	/	/	/	0.02	/	/	/	/	0.34
2	/	/	/	/	0.01	0.01	/	/	/	/	0.14
3	0.06	0.03	/	0.09	0.01	/	/	/	/	/	0.49
4	0.03	/	/	/	0.03	0.17	/	/	0.55	/	6.19

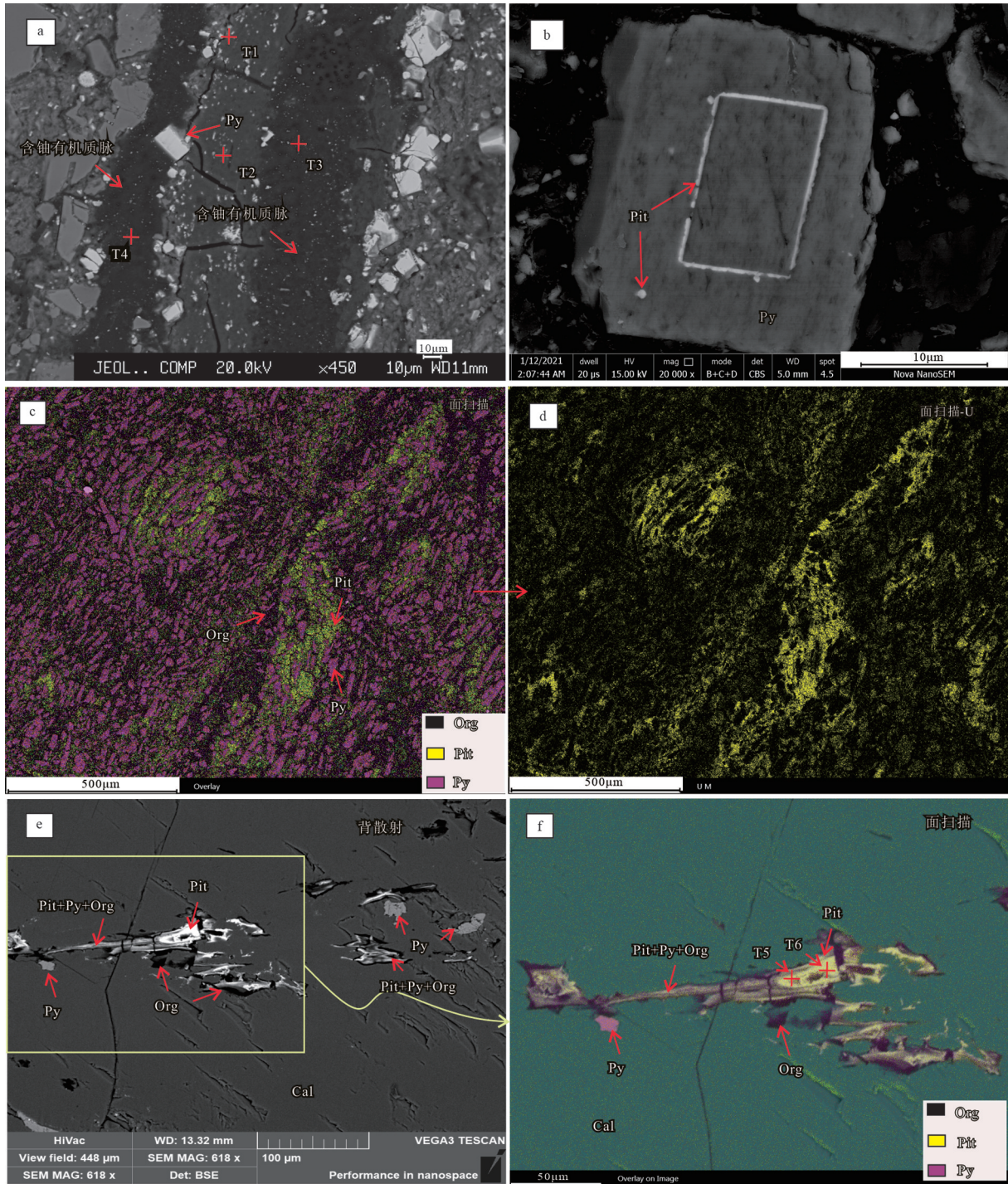


图29 二连盆地哈达图铀矿床中有机质与铀赋存关系图

a—矿石有机质细脉中含少量的铀,BSE图像;b—沥青铀矿沿黄铁矿生长环带内部分布,BSE图像;c、d—铀矿石中呈不规则细脉状的有机质、黄铁矿及沥青铀矿;c—能谱面扫描合成图;d—U元素能谱面扫描图;e、f—铀矿石的碎屑方解石矿物溶蚀孔洞中充填的有机质、沥青铀矿及黄铁矿混合物,e—BSE图像,f—局部放大的能谱面扫描合成图;Org—有机质;Pit—沥青铀矿;Py—黄铁矿;Qz—石英;Ab—长石

Fig. 29 Relationship between organic matter and uranium in Hadatu deposit, Erlian Basin

a—Uranium in organic matter veinlets, BSE image; b—Pitchblende distributed along the overgrowth of pyrite, BSE image; c, d—Irregular veinlet-like organic matter, pyrite and pitchblende in uranium ore; c—EDS scanning composite image; d—EDS scanning image of U element; e, f—Mixture substance composed of organic matter, pitchblende and pyrite distributed in dissolution holes of calcite; e—BSE image; f— Enlarged EDS scanning composite image from “e”; Org—Organic; Pit—Pitchblende; Py—Pyrite; Qz—Quartz; Ab—Albite

了渗出铀成矿模式(图30),其主要内容阐述如下。

5.1 成矿铀源和流体形成

富有机质(也常富磷)沉积建造(烃源岩)一般较细,多为泥岩、粉砂质泥岩或泥质粉砂岩,在沉积时达到水饱和,由于其孔隙非常发育和泥质黏土矿物的吸水性,这些沉积物蕴藏丰富的水流体,初步估算30 m厚1 km²的此种沉积物可蕴藏上千万吨的水流体。这种富水沉积建造中的水流体在成岩过程中由于压实作用(刘池洋等,2007)、温度压力的升高或受构造应力挤压作用及或深部岩浆热动力作用影响会产生释放。流体的释放渗出贯穿整个沉积成岩演化历史,从成岩、油气的形成运移到变质作用等,流体释放向减压的浅表或构造薄弱方向进行,且释放的幕次和强度与地质构造运动幕次和强度相对应耦合。

沉积建造中的有机质在沉积成岩演化过程中,由于物理化学条件,即温度、压力、组分、酸碱度等的变化,其也会产生不断的变化。开始时,沉积的有机质主要是生物残体或大复合分子干酪根,随

着温度和压力等的增大,大分子有机物产生分解或裂解,形成石油、天然气,同时在这一过程中会产生各种有机酸,一般是富里酸和腐殖酸,它们包含脂肪族、芳香族、羧基、羟基、羰基、石碳酸等有机酸类和官能团(Susan et al., 2016)。这些有机产物,按其水溶解性,又可分为水溶性和非水溶性两大类。富里酸在不同的pH值溶体中均可溶,腐殖酸仅在低pH酸性环境中可溶,腐黑物则不溶于水(Aiken et al., 1985)。在油田水中可见脂肪羧酸为主(Fisher, 1987),它们的含量可达5000 mg/L(Carothers and Kharaka, 1978),其主要是短链(C1-C5)羧酸,即甲酸(C1)、乙酸(C2)、丙酸(C3)、丁酸(C4)、戊酸(C5)(Lewan, 1994),其中又以乙酸为主要组分。

富有机质沉积建造中富集的铀由于其产生热和具有放射性辐射作用,对高分子有机质会产生催化和裂解作用,从而有利形成氢气(王文青等, 2019)和油气等。

富有机质沉积建造在成岩演化过程中产生的

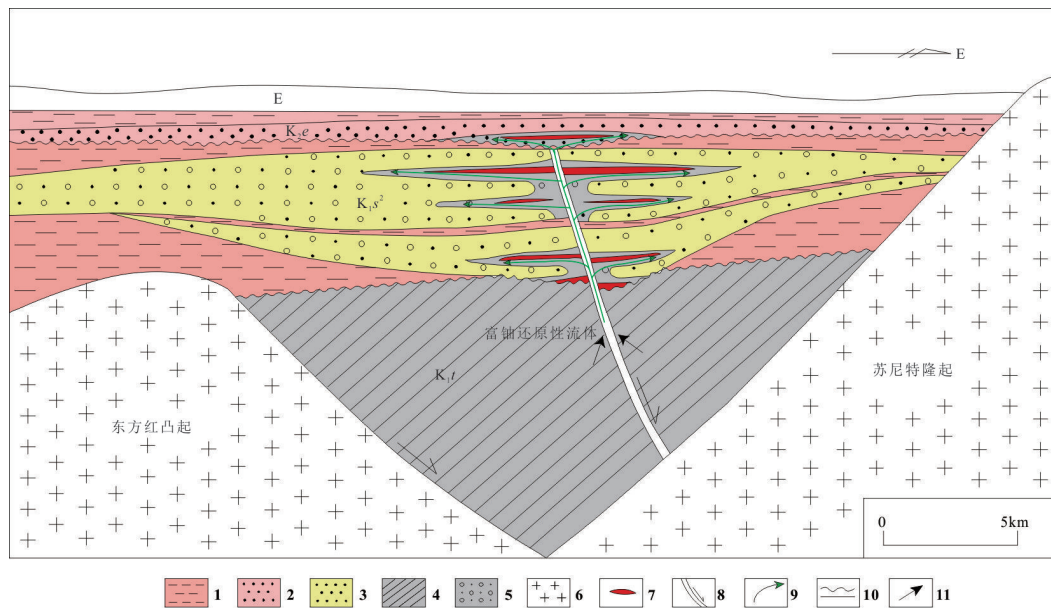


图30 哈达图铀矿床渗出铀成矿模式图

1—红色泥岩;2—红色砂岩;3—红杂色砂砾岩;4—灰色富铀含烃源岩建造;5—灰色砂砾岩;6—花岗岩;7—铀矿体;8—断裂构造;9—深部流体渗出方向;10—角度/平行不整合;11—富铀还原性液体迁移方向;E—古近系;K_{2e}—二连组;K_{1s²}—赛汉组上段;K_{1t}—腾格尔组

Fig.30 Exudative metallogenic model of Hadatu uranium deposit.

1—Red mudstone;2— Red mottled sandy mudstone;3— Red mottled sandy conglomerate;4— Grey uranium-rich sedimentary formation with source rock;5— Grey conglomerate;6—Granite;7—Uranium ore body;8—Faults;9— Exudative direction of deep fluid;10— Angular/parallel unconformity;11— Migration direction of uranium-rich reducing fluid; E— Paleogene; K_{2e}— Erlian Formation; K_{1s²}— Upper member of Saihan Formation; K_{1t}—Tenggeer Formation

富有机酸、氢气等组分的流体对铀多金属等具有溶解迁移能力,从而成为重要的成矿流体。

哈达图矿床产于于乌兰察布坳陷的中东部格日勒敖都和齐哈日格图凹陷,该凹陷在138~115 Ma裂谷作用下形成NE向断陷(图31a),长度远大于宽度,深度可达2200 m,并在温湿气候条件下,形成了一套灰色、黑色岩系建造,主要是下白垩统阿拉善组、腾格尔组,属于湖盆断陷期沉积,分布于凹陷中心,最大埋深可达2200 m。阿拉善组、腾格尔组含有丰富的有机质,是煤系地层和油、气烃源岩。这种含有机质丰富的暗灰色岩系,尤其是细碎屑泥质、粉砂质不仅含很高的铀、钍、镍、铅、锌等,而且储藏丰富的流体,它们为后来成矿提供了丰富的成矿物质铀源和流体来源基础。

在赛汉组沉积之前,由于动力机制的转变,先前形成的地层发生掀斜,致使赛汉组地层角度不整合于下伏地层。赛汉组下段沉积时期,古气候仍然为温湿气候,沉积了一套灰色为主的含煤岩系,也可为上覆地层成矿进一步提供铀源和成矿流体来源,其铀含量可达 15×10^{-6} 。

事实上,无论是海相还是陆相富有机质沉积建造,由于沉积时有机质对铀的吸附和还原作用,它们也是富铀建造,如分布于中国江西、湖南、广西、贵州等地的新元古代或早古生代海相碳硅泥岩铀含量一般 $30\times 10^{-6}\sim 60\times 10^{-6}$,高者可达 100×10^{-6} 以上;陆相盆地如鄂尔多斯盆地南部上三叠统延长组长7段烃源岩铀含量一般 $10\times 10^{-6}\sim 50\times 10^{-6}$,部分可达 100×10^{-6} 以上(秦燕等,2009; Yang et al., 2010)等,有机质丰度平均分布在2%~6%,部分泥页岩TOC含量可达10%甚至更高(黄振凯等,2020),有机质含量与铀的含量密切相关;北部烃源岩二叠系山西组和石炭系本溪组也具有比较高的铀含量;在中国北方沉积盆地中油气、煤勘查中也发现了许多放射性异常(Jin et al., 2018; 孙大鹏等,2021):Cuney (2010)统计的国际上富有机质沉积物平均铀含量变化在 $12\times 10^{-6}\sim 84\times 10^{-6}$ 。这些深部富有机质含铀建造为渗出成矿准备了丰富的铀源。此外,这些富有机质沉积建造一般还富含钒、镍、钴、铬、钼、锌、铅、砷等元素,也为含矿层这些元素的富集提供了来源。

5.2 含矿建造的形成和构造条件

哈达图矿床附近的白垩系沉积可以划分为两

个构造层,下部的断陷构造层和上部的坳陷构造层。下部断陷构造层包括阿拉善组和腾格尔组,盆地的沉降完全受正断层控制,沉积范围也被正断层所限制。自赛汉组沉积以来(约115 Ma),二连盆地的拉张应力开始减小,大部分的正断层停止活动(图31a)。由于伸展作用的显著减弱,引起盆地早期热的岩石圈开始冷却收缩,热沉降作用下沉降范围进一步扩大,上部坳陷构造层沉积范围显著扩大(图31b),覆盖了下部断陷构造层的凹陷及其间的相对凸起坳陷地区,其沉积范围不再受下部正断层控制,沉积了赛汉组和二连组。并且两构造层之间存在一个区域性的角度不整合界面。下部构造层的正断层活动多终止于两套构造层的不整合面,较少的正断层可在上部的坳陷构造层中活动。

沉积建造据其颜色可分为两大体系:灰黑色沉积建造和红杂色沉积建造,前者主要是位于断陷构造层中的下白垩统阿拉善组、腾格尔组和坳陷构造层中的赛汉组下段,后者主要是坳陷构造层中的下白垩统赛汉组上段、上白垩统二连组和始新统伊尔丁曼哈组。

上部的红杂色建造上白垩统赛汉组上段、二连组和始新统伊尔丁曼哈组在有与深部还原流体导通的情况下,由于渗出成矿作用形成铀矿化,因此成为含矿建造目标层。沟通下部成矿流体的主要通道为多期次活动的断层,可以将下部灰黑色建造中的还原性流体带到上部的红色杂岩建造中发生还原作用(图3,图4,图6,图27)。此外,坳陷和断陷构造层之间的不整合面也可以作为重要的流体运移通道(图25),下部灰黑色沉积建造的还原流体顺着不整合面斜坡运移,当遇到上部坳陷构造层中孔渗结构比较好的岩石时,就可以沿着空隙向上逸散(图30),总的来说,沟通深部的断裂及其关连的砂体和不整合面等是渗出流体活动的重要通道,深部还原建造上部的红杂色建造均可成为含矿目标层(图5),成矿的深度和范围可大大扩展。

5.3 铀和流体的迁移

富有机质沉积建造在演化过程中派生的流体对矿化元素铀及其共伴生元素钍、镍、铅、锌和硫、砷以及磷、钙、铁、硅等元素具有较强的溶解迁移能力,虽然这方面的研究还需深入进行,但总的来说,流体溶解迁移矿化组分能力是由流体的性质和所

处环境条件决定的,主要有:(1)有机酸对元素的溶解作用,尤其是其中较高含量的乙酸溶解能力更强。Migdisov et al.(2017)采用富原油流体进行锌、金、铀元素的溶解性实验,发现其可以活化溶解烃源岩中的这些元素,特别是Zn随着温度的升高溶解度明显增高,反之则产生沉淀;江国平和赵利信(2021)利用体积比为5:1的乙酸和柠檬酸混合酸作为浸出剂,可实现对砂岩型铀矿体中铀等元素的溶解浸出,并能改善矿石的渗透性能,说明乙酸发挥了主导作用。(2)配位络合作用。流体中的有机官能团羧基、羰基、羟基等不仅与铀(刘倩等,2022),也可与钴、镍、铅、锌等元素形成可溶的配位络合物,对这些元素有较强的迁移能力。(3)氢化物迁移。富有机质建造在演化的过程中也会产生较多的氢气,氢具有很强的结合能,它既可与金属元素也可与非金属元素结合产生迁移。郑大中和郑若锋(2004)提出在深部还原富氢的环境下,如果富有机质沉积建造中含有磷、铀、钙、铁、硫等,氢易于与之化合形成多种氢化物,如 PH_3 、 H_2S 、 CaH_2 、 FeH_2 、 UH_3 以及多种阳离子的合金氢化物,如 $\text{CaUP}_2\text{H}_{12}$ 、 UTi_2H_7 、 $(\text{U,Th})\text{SiH}_8$ 、 CuFeH_4 等,这些氢化物混合渗出流体中向上运移。(4)高温高压条件。温度和压力的增高会大大提高物质的溶解度。张如良(2004)介绍,根据拉法里斯基(1963)试验,铀在 150°C 条件下的溶解度为在 20°C 时的3~5倍。如果有 H_2S 参与其溶解度可提升百余倍。哈达图铀矿床包裹体测温介于 100°C 至 125°C 最高可达到 175°C ;渗出流体的酸碱度对物质的溶解迁移也会起重要作用。此外胶体形式(纳米形式)和微生物作用(有的微生物细菌具铀和重金属亲合性)等在流体溶解迁移矿化组分等方面也发挥着重要作用。深部产生的流体由于是在缺氧环境下形成,所以具有很强的还原性。

研究区深部富有机质沉积建造产生的流体不仅对铀及其共伴生元素钴、镍、铅、锌和硫、砷以及磷、钙、铁、硅等元素具有较强的溶解迁移能力,而且具还原性;王苗、吴柏林等(2022)对鄂尔多斯盆地深部富铀烃源岩的实验表明排烃过程中也可排出铀。

在赛汉组沉积末期(Albian期),二连盆地发生构造反转,在哈达图地区表现为南部发生掀斜,即

北部抬起相对减压;根据未变形的二连组年龄资料(Guo et al., 2018),推测盆地的构造反转可能持续到96 Ma。结合哈达图地区钻孔中的碎屑磷灰石裂变径迹结果显示(刘武生等, 2020),Albian期~96 Ma沉积地层没有记录到抬升剥露引起的冷却事件,说明这次构造反转未引起显著的剥蚀作用,但可能由于构造反转,压力释放,诱发深部流体开始渗出向上迁移(图31b)。

短暂的构造反转后,哈达图地区开始沉积上白垩统二连组。碎屑磷灰石裂变径迹显示二连组沉积引起的埋藏加热作用可持续到72 Ma(Liu et al., 2022)。热史显示二连组埋藏加热了 20°C ,约570 m(按 $35^\circ\text{C}/1\text{ km}$)。此时,二连盆地达到了沉积物埋藏最深的时刻。根据邻区赛汉塔拉凹陷中的排烃史研究可以得知,腾二段烃源岩处于未成熟—低成熟阶段, R_o 为0.40%~0.85%,腾一段烃源岩进入成熟阶段, R_o 为0.7%~1.2%,阿尔善组烃源岩成熟度略高于腾一段, R_o 为0.8%~1.4%(赵志刚等, 2017)。少量深部流体可沿主干断层从烃源岩直接进入赛汉组上段,而大部分流体则沿着断陷期的断裂进入断—坳不整合面,再沿着渗透性较好的砂体向上溢散,形成岛状、透镜状或似层状灰色体(图31b)。

在此之后一直到始新统伊尔丁曼哈组沉积之前(72~45 Ma)(图31c),二连盆地长期处于无沉积和剥蚀状态(Liu et al., 2022),此时也是重要的渗成矿期。哈达图矿床较低品位(小于0.05%)矿石具有62.4 Ma和48.3 Ma两期全岩石U-Pb年龄,与构造演化密切相关。由于在哈达图高品位铀矿石中获得了 $100\sim 125^\circ\text{C}$ 的包裹体均一温度(刘武生等, 2020),局部样品中可达到 175°C ,说明流体可能来自更深部。与此同时,隆升剥蚀为深部还原流体渗出作用发生创造了条件。正是这次构造抬升作用,富含铀及其他元素钴、镍、铅、锌等还原性渗出流体在构造或下切河道的沟通下,进入赛汉组上段红杂色层,对其再还原,形成局部灰色砂体,这与鄂尔多斯盆地北部油气二次还原形成的灰绿色砂岩机理有些相似(李子颖等, 2007, 2009),但又不同,在还原流体性质上存在差别。哈达图地区深部还原流体形成的灰色体往往受构造交汇处或断裂构造控制,在平面上呈“蘑菇状”、“橄榄状”或“线型串珠状”等(图6);在剖面上“悬空”于红杂色氧化建造砂

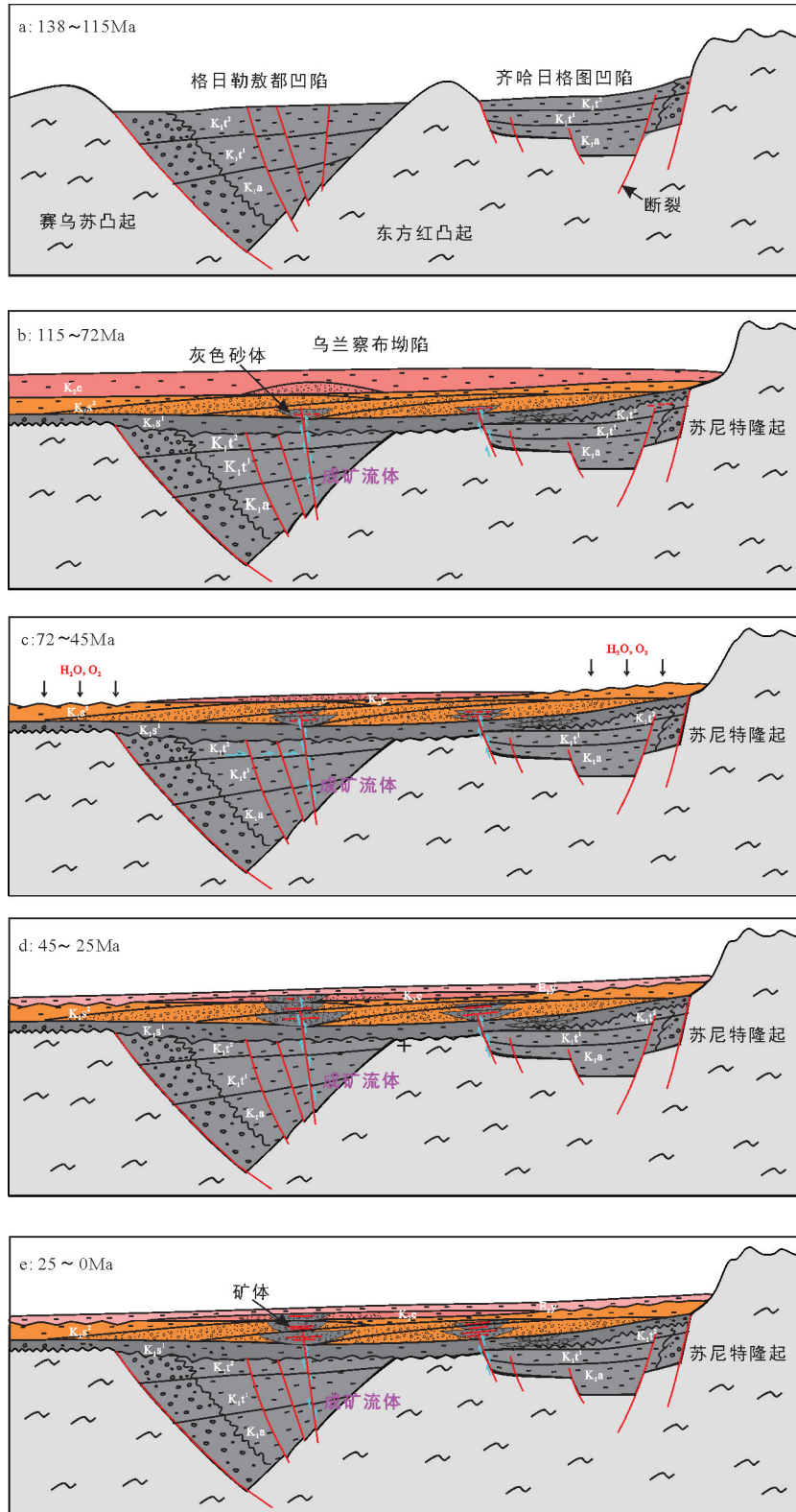


图 31 哈达图铀矿床渗出铀成矿演化模式图

a—断陷阶段;b—拗陷阶段;c—隆升剥蚀阶段;d—古近系沉积阶段;e—新近纪构造活动和热改造阶段

Fig. 31 Tectono-stratigraphy evolution model of the Hadatu uranium deposit area

a—Rift stage; b—Post-rift stage; c—Uplift and exhumated stage; d—Paleogene sedimentary stage; e—Neogene tectonic and thermal reform stage

体中,形成透镜状或似层状灰色体(图23,图24,图25,图26),为铀成矿创造了条件(图31c)。

新近纪以来,挤压抬升,格日勒敖都—齐哈日格图凹陷北部隆升,有利于流体渗出(图31d,e)。哈达图高品位(大于0.1%)铀矿石形成于16.0~3.2 Ma,此时始新统伊尔丁曼哈组及其上覆地层不整合于赛汉组和二连组之上。这与新近纪发生了比较强烈的构造活动有关,包括二连盆地中部大量的玄武岩喷发热事件相吻合。新构造运动和构造热事件使渗出作用进一步加强,在原来的灰色体基础上叠加有机质和铀矿化,形成高富有机质的呈灰黑色或黑色(可溶有机质沉淀所致)的高品位铀矿石。这也很好地解释为什么赛汉组上段在晚白垩世和新生代地层超覆后,阻断水动力条件仍然能够成矿并且形成富矿的原因;该时期深部流体仍然持续向上迁移,并且由于伊尔丁曼哈组的阻隔,浅部含氧流体难以再进入赛汉组对形成的铀矿床进行破坏和改造。由此可很好地解释矿化受灰色体控制和“两黄夹一灰”的现象,铀矿化常常与构造和古河道及不整合面有关,因为它们对灰色体的形成起着与深部含铀还原流体沟通的通道作用(图30、31)。

5.4 铀的沉淀与富集

铀从流体中产生沉淀是因为其在溶液中的溶解度减低或溶度积饱和,也可以说沉淀是溶解的逆过程。同样,流体中溶解的物质沉淀也是由流体的性质和所处环境条件决定的。当这些携带成矿物质具有相当高的压力和温度的深部富有机质还原性流体沿有利构造通道向上迁移至氧化沉积建造中,温度和压力会明显降低,酸碱度、氧化还原性质等也会产生明显的变化,首先是有机酸由于流体所处环境氧化性提高,Eh和pH值产生变化和温压的降低,有机酸及其中配位络合物发生氧化、分解、去碳酸基、脱水、脱硫等作用,络合物产生分解,元素的溶解度降低,致使其中的元素发生沉淀,导致释放成矿元素富集沉淀,地沥青的形成则是有机富烃类流体在近地表时氧化、分解、蒸发等形成;其次,迁移的氢化物,由于环境中氧逐渐增多和酸碱度的变化等,氢化物被氧化、分解、水解等,致使阳离子沉淀或结晶成矿物,但氧的浓度也只限于使氢化物分解而达不到使 U^{4+} 氧化成 U^{6+} , Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} 浓度(郑大中和郑若锋,2004);深部渗出流体在运移至地表时,温度和

压力的骤然降低,铀和其他元素的溶解度也会骤然降低,它们开始析出沉淀,并在岩石中产生一些绿泥石化、碳酸盐化等低温蚀变;胶体形式(纳米形式)和微生物作用迁移的铀等元素也由于环境条件的变化,使其携带的物质产生沉淀。总的来说,深部高压较高温度还原性富有机酸配位络合物流体,在迁移至地表时,环境条件变成低温低压氧化性高的明显反差导致其中物质产生沉淀。

在研究区上白垩统二连组沉积后,赛汉组埋深最大的时期,或上白垩统二连组与始新统之间快速抬升的构造阶段,该时期赛汉组下段的有机质释放的有机酸和碳酸达到最高峰,可充分萃取或溶解其源岩层铀多金属元素,为其上覆地层赛汉组上段提供了富铀成矿物质的还原性流体。

齐哈日格图的磷灰石裂变径迹(AFT)热史模拟表明,在72 Ma时,沉积埋藏达到最深,其地层温度应在120℃(Liu et al., 2022),对哈达图高品位铀矿石中获得了100~125℃的包裹体均一温度(刘武生, 2020),局部样品中可达到175℃。这说明当时的流体不仅有与地层温度一致的近水平顺层流动,还有在更深的区域经历了较高温过程,在热对流作用下沿着断层向上运动的过程。

齐哈日格图凹陷灰黑色岩系本身富含有机质和铀元素等,富含有机酸具有一定温度的还原性流体迁移至红杂色氧化建造砂体中,对其进行再还原,形成岛状、蘑菇状等再还原的灰色体,也由于氧化性、温压和物理化学条件(Eh、pH值)等的改变,导致渗出流体中铀及其共伴生元素铬、钴、锌、锆等的富集沉淀,主量元素硅、铝、铁、磷和非金属元素硫、有机碳等也会增加,且它们之间均为正相关关系,特别是有机质腐黑物含量越高,铀及其共伴生元素含量越高,说明它们是一起由深部流体带入;在矿物组合上,形成超细微粒的铀矿物(沥青铀矿、铀石)、含铀矿物,同时还有黄铁矿和黏土矿物及有机质集合体,常见绿泥石化,由于不完全还原,有时还能见到铁的氧化,这些也反映了深部流体的组分特征;在结构上,可见细微甚至纳米级铀矿物和硫化物浸染状分散状产在地沥青中,进一步说明是富含铀多金属有机流体带来,这些铀矿物、硫化物或黏土矿物常出现在微孔隙/裂隙和长石、石英溶蚀坑中,说明流体初始具有较强的溶蚀能力,这一般与

其中的乙酸有关,这与一般渗入流体形成的氧化还原砂岩型铀矿不同,反映出渗出流体成矿特征。当然,在深部流体渗出成矿作用间隙期,在灰色砂体形成后,也不排除潜水或局部层间氧化还原对铀成矿的叠加改造富集作用。

6 结 论

基于哈达图砂岩铀矿床成矿地质构造背景、矿化特征、含矿层赛汉组上段沉积建造成因、赋矿灰色砂体的空间展布和成因、有机质特征、矿化物质组分、同位素组成等的系统研究,发现揭示了一种新的砂岩铀成矿作用——渗出型铀成矿作用。可以说,渗入型砂岩铀成矿作用为灰色砂岩氧化还原成矿提供了理论基础,而渗出型砂岩铀成矿作用的提出为红杂色砂岩中铀成矿和找矿提供了理论依据,其预测要素和找矿标志与传统渗入氧化还原成矿完全不同,创新发展了砂岩铀成矿理论,为原生红杂色沉积建造中寻找砂岩铀矿提供了理论依据,对拓展新区、新层位,由盆缘到盆中、由浅部到深部找矿,拓展新的找矿空间具有重大意义。

(1)哈达图铀矿床产出的格日勒敖都—齐哈日格图在拗陷断陷阶段,由于潮湿的古气候,在断陷深部发育一套富有机质粒度较细的沉积建造,即阿尔善组、腾格尔组和赛汉组下段,它们富铀和铬、钴、锆、锌等元素,为铀成矿提供了铀源和流体。

(2)早白垩世晚期至始新世,构造演化由断陷转为拗陷,在干旱—半干旱气候条件下,沉积了红杂色建造,赛汉组上段、二连组和伊尔丁曼哈组,沉积学、岩石学和古气候研究表明它们主要是原生氧化沉积建造成因;赛汉组上段以河流相为主,形成了连通性较好的砂体,是研究区渗出铀成矿主要目标层,二连组和伊尔丁曼哈组是次要目标层。

(3)主含矿层赛汉组上段控矿灰色砂体是深部还原性流体对其再还原的结果;因此,受连通深部富有机质建造和上部红杂色建造的断裂构造、河道或不整合面控制,平面上,灰色砂体呈孤岛状、朵状、串珠状;剖面上呈透镜状、喇叭状悬浮于原生氧化砂体中,从而呈现“两黄夹一灰”特征。

(4)从成矿铀源、深部渗出流体的形成、铀的迁移和沉淀等方面阐述了渗出砂岩铀矿作用机制;哈达图铀矿床主要是渗出铀成矿作用形成,体现出与

传统渗入氧化还原砂岩铀矿明显不同的特征,如矿体的形态呈板状、半环状、环状,呈多层产出,铀矿石元素组合富集钴、镍、锆、锌等元素,黄铁矿核边部有着显著不同的微量元素、同位素特征等。

(5)建立了哈达图砂岩铀矿床渗出型铀成矿模式,认为在红杂色沉积建造中寻找砂岩铀矿可采用“上红下黑、上下连通、红中找灰、灰中找矿”的预测评价新思路:“上红下黑”是指盆地或凹陷上部为红杂色沉积砂体、下部为深色富有机质富铀建造;“上下连通”是指发育沟通前述上下沉积的构造系统及其延伸连通的河道、不整合面等;“红中找灰”是指找在红色建造中发育再还原的灰色砂体;“灰中找矿”是指在受再还原控制的灰色砂体中找铀矿。

致谢: 本文得到国家原子能机构、中核集团、中国铀业和核工业北京地质研究院领导和专家的大力支持,在野外和室内研究工作过程中得到核工业208大队、核工业243大队领导和同仁的大力帮助,在成稿过程中张金带、陈跃辉、赵凤民、刘德长等专家提出宝贵意见,在此一并致以衷心感谢。

Reference

- Aiken G R, McKnight, D M, Wershaw R L, MacCarthy P, 1985. An Introduction to Humic Substances in Soil, Sediment and Water [M]. New York: John Wiley & Sons: 1-692.
- Bralia A, Sabatini G, Troja F. 1979. A reevaluation of the Co/Ni ratio in pyrite as geochemical tool in ore genesis problems[J]. Mineralium Deposita, 14(2): 353-374.
- Carothers W W, Kharaka Y K. 1978. Aliphatic acid anions in oil-field waters— implications for the origin of natural gas [J]. AAPG Bulletin, 62(12): 2441-2453.
- Chen Zhijun, Gao Yiwen, Liu Huchuang, Chen Yiguo. 2013. A method and its application of the evaluation on logging of source rock in Chagannuoer Sag of Gaolihan Depression, Erlian Basin [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, (11): 30-32 (In Chinese with English abstract).
- Chen Zhuyi, Chen Daisheng, Gu Kangheng. 2013. Research and Evaluation of Uranium Deposits in China, III: Sandstone Type Uranium Deposits [R]. Beijing: China Nuclear Geology (in Chinese).
- Cranwell P A, Eglinton G, Robinson N. 1987. Lipids of aquatic organisms as potential contributors to lacustrine sediments— II [J]. Org. Geochem., 11(6): 513-527.
- Cumberland S A., Douglas G, Grice K, Moreau J W. 2016. Uranium mobility in organic matter-rich sediments: A review of geological and geochemical processes [J]. Earth-Science Reviews, 159: 160-

- 185.
- Cuney M. 2010. Evolution of uranium fractionation processes through time: Driving the secular variation of uranium deposit types[J]. *Econ. Geol.*, 105 (3): 553–569.
- Dai Jinxing. 1993. Characteristics of natural gas carbon and hydrogen isotopes and identification of various types of natural gas [J]. *Natural Gas Geoscience*, (2/3): 1–40 (In Chinese with English abstract).
- Debret M, Bentaleb I, Sebag D, Favier C, Nguetsop V, Fontugne M, Oslisly R, Ngomanda A. 2014. Influence of inherited paleotopography and water level rise on the sedimentary infill of Lake Ossa (S Cameroon) inferred by continuous color and bulk organic matter analyses [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 411: 110–121.
- Feng Weiping, Wang Feiyu, Wang Zongxiu, Shi Yulei, Jiang Tao, Wang Yufan, Zhou Hongfeng. 2020. Characteristics and origin of crude oils in the Wulanhua sag [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (6): 932–940 (In Chinese with English abstract).
- Fisher J B. 1987. Distribution and occurrence of aliphatic acid anions in deep subsurface waters[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 51: 2459–2468.
- Fry B, Ruf W, Gest H, Hayes J M. 1988. Sulfur isotope effects associated with oxidation of sulfide by O₂ in aqueous solution [J]. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 73(3): 205–210.
- Gu Xuexiang, Zhang Yongmei, Li Baohua, Xue Chunji, Dong Shuyi, Fu Shaohong, Cheng Wenbin, Liu Li, Wu Chengyun. 2010. The coupling relationship between metallization and hydrocarbon accumulation in sedimentary basins [J]. *Earth Science Frontiers*, 17 (2): 83–105 (in Chinese with English abstract).
- Guo Qiang, Li Ziyang, Qin Mingkuan, Zhong Dakang, Zhang Fangdong, Jia Cui, Wu Jun. 2014. Discussion of hydrothermal sedimentary sequence in Baiyinchagan Sag of Erlian Basin, Inner Mongolia [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(5): 810–815 (in Chinese with English abstract).
- Guo Zhixing, Shi Yuanpeng, Jiang Shuangqi, Li Linbo, Zhao Zhigang. 2018. Inversion of the Erlian Basin (NE China) in the Early Late Cretaceous: Implications for the collision of the Okhotomorsk Block with East Asia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 154: 49–66.
- Huang Guangwen, Yu Fucheng, Pan Jiayong, Cheng Zhengle, Wu Dehai, Xue Wanwen, Song Taizhong, Li Shanping. 2021. Genesis of pyrite from the Mengqiguer uranium deposit in Ili Basin of Xinjiang and its implication for mineralization[J]. *Geology in China*, 48(2): 507–519 (in Chinese with English abstract).
- Huang Shijie. 1994. Formation conditions and prospecting criteria for sandstone uranium deposit of interlayered oxidation type [J]. *Uranium Geology*, 10(1): 6–13 (in Chinese with English abstract).
- Huang Zhenkai, Hao Yunqing, Li Shuangjian, Wo Yujin, Sun Dongsheng, Li Maowen, Chen Jianping. 2020. Oil – bearing potential, mobility evaluation and significance of shale oil in Chang 7 shale system in the Ordos Basin A case study of well H317[J]. *Geology in China*, 47(1): 210–219 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Guoping, Zhao Lixin. 2021. Study on application of mixed organic Aid in In-situ Leaching of high Carbonate sandstone uranium deposit [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 55 (Supp.): 380–388 (in Chinese with English abstract).
- Jin Ruoshi, Miao Peisen, Sima Xianzhang, Yu Reng'an, Cheng Yinhang, Tang Chao, Zhang Tianfu, Ao Cong, Teng Xueming. 2018. New prospecting progress using information and big data of coal and oil exploration[J]. *China Geology*, 2(1): 167–168.
- Kang Shihu, Yang Jianxin, Liu Wusheng, Zhao Xingqi, Qiao Peng, Du Pengfei, Lü Yonghua. 2017. Mineralization characteristics and potential of paleo-valley type uranium deposit in central Erlian Basin, Inner Mongolia [J]. *Uranium Geology*, 33(4): 206–217 (in Chinese with English abstract).
- Kolesnik A N, Kolesnik O N, Sattarova V V, Karabtsov A A, Yaroshchuk E I. 2019. Color and chemical composition of bottom sediments from the Kuril Basin (Sea of Okhotsk) and the Kuril-Kamchatka Trench area (Northwest Pacific) [J]. *Progress in Oceanography*, 178: 102197.
- Lewan M D, Fisher J B. 1994. Organic Acids from Petroleum Source Rocks (Chapter 4) [C]// Pittman E D (eds.). *Organic Acids in Geological Processes*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg:70–114.
- Li Xingbo, Ji Junliang, Cao Zhanming, Wang Pu, Wu Wujun, Sun Ling. 2021. The climatic significance of the color of the Paleogene Fluvial and Lacustrine Sediments in the Northern Qaidam Basin [J]. *Earth Science*, 46(9): 3278–3289 (in Chinese with English abstract).
- Li Ziyang, Fang Xiheng, Chen Anping, Ou Guangxi, Sun Ye, Zhang Ke, Xia Yuliang, Zhou Wenbin, Chen Fazheng, Li Mangen, Liu Zhonghou, Jiao Yangquan. 2009. Superposition metallogenic model of sandstone-type uranium deposit in the Northeastern Ordos basin[J]. *Uranium Geology*, 25(2): 65–84 (in Chinese with English abstract).
- Li Ziyang, Fang Xiheng, Chen Anping, Ou Guangxi, Xiao Xinjian, Sun Ye, Liu Chiyang, Wang Yi. 2007. Origin of the uranium-bearing gray-green sandstone of sandstone-type uranium deposit in northern Ordos Basin [J]. *Science China Earth Sciences*, 37(s1): 139–146 (in Chinese).
- Li Ziyang, Qin Mingkuan, Cai Yuqi, Fang Xiheng, Guo Qingyin, Yi Chao, Xia Yuliang, Sun Ye, Zhang Zilong, Jia Licheng. 2020. Metallogenic models and prospective analysis of Sandstone-type Uranium Deposits in Ordos Basin [J]. *Uranium Geology*, 36(1): 1–13 (in Chinese with English abstract).
- Li Ziyang. 2019. Sandstone-hosted Uranium Metallogeny in North Ordos Basin, China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 471 (in Chinese).

- Lin Jinrong, Tian hua, Dong Wenming, Xia Yuliang, Zheng Jiwei, Ou Guangxi, Pang Yaqing. 2009. Characteristics of sulfur isotope during the epigenetic alteration of oil-gas and coalbed methane in the southeastern Songliao Basin[J]. *World Nuclear Geoscience*, 26(2): 63–67 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chiheng, Li Ziyang, Liu Wusheng, Li Xide, Wu Qubo, He Miao, Huang Weichuan, Zhang Chuang. 2022. Unrecognized post-rifting deposition and uplift history of the Erlian Basin, Northern China: Evidence from seismic reflection data and apatite fission-track thermochronology[J]. *Tectonophysics*, 833:229374.
- Liu Chiyang, Zhang Fuxin, Gao Fei. 2006. Sedimentary basin reservoir-forming/mineralization system[J]. *Geology in China*, 34(3): 365–374 (in Chinese with English abstract).
- Liu Qian. 2022. Organic-inorganic interactions in the process of the accumulation [J]. *Petrochemical Industry Application*, 41(2): 8–12 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wusheng, Kang Shihu, Zhao Xingqi, Shi Qingping, Zhang Zilan. 2015. Mineralization mechanism and exploration of paleo-channel type uranium deposit in central Erlian Basin [J]. *Uranium Geology*, 31(s1): 164–176 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wusheng, Li Xide, Xue Zongan, Lv Yonghua, Liu Chiheng. 2020. Geochemical characteristics and geological significance of Hadatu uranium deposit in Erlian Basin, Inner Mongolian[J]. *Uranium Geology*, 36(5): 325–335 (in Chinese with English abstract).
- Lü Yonghua, Kang Shihu, Liu Wusheng, Miao Aisheng, Du Pengfei. 2021. Study on key ore-controlling factors and metallogenic model of Hadatu uranium deposit in Erlian Basin [J]. *Uranium Geology*, 37(4): 584–593 (in Chinese with English abstract).
- Ma Xinyuan, Liu Hefu, Wang Weixiang, Wang Yipeng. 1983. Meso-Cenozoic taphrogeny and extensional tectonics in Eastern China [J]. *Acta Geologica Sinica*, (1): 22–32 (in Chinese with English abstract).
- Migdisov A A, Guo X, Xu H, Williams-Jones A E, Sun C J, Vasyukova O, Sugiyama I, Fuchs S, Pearce K, Roback R. 2017. Hydrocarbons as ore fluids [J]. *Geochemical Perspective Letters*, 5: 47–52.
- Nie Fengju, Yan Zhaobin, Xia Fei, Li Mangen, Lu Yayun, Cai Jianfang, Guo Funeng, Ning Jun. 2017. Hot fluid flows in the sandstone-type uranium deposit in the Kailu basin, Northeast China[J]. *Geological Bulletin of China*, 36(10): 1850–1866 (in Chinese with English abstract).
- Nie Fengjun, Li Mangen, Deng Juzhi, Yan Zhaobin, Zhang Chengyong, Jiang Meizhu, Yang Jianxin, Kuang Wenzhan, Kang Shihu, Shen Kefeng. 2015. Multiple type uranium deposit assemblage and uranium exploration in Erlian rift Basin, Inner Mongolia [J]. *Mineral Deposits*, 34(4): 711–726 (in Chinese with English abstract).
- Peters K E, Cassa M R. 1994. Applied Source Rock Geochemistry [C]// Magoon L B, Dow W G. *The petroleum system—from source to trap*: AAPG Memoir 60. Tulsa: AAPG, 1994: 94–120.
- Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. 2005. *The Biomarker Guide 2. Biomarkers and Isotopes in Petroleum Exploration and Earth History* [M]. New York: Cambridge University Press.
- Qi Jiafu, Zhao Xianzheng, Li Xianping, Yang Minghui, Xiao Yang, Yu Fusheng, Dong Yueqi. 2015. The distribution of Early Cretaceous faulted-sags and their relationship with basement structure within Erlian Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 22(3): 118–128 (in Chinese with English abstract).
- Qin Yan, Zhang Wenzhen, Peng Pingan, Zhou Zhenju. 2009. Occurrence and concentration of uranium in the hydrocarbon sources of Chang 7 member of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2469–2476 (in Chinese with English abstract).
- Shang Huiyun, Li Jinchao. 1981. Abundance and type of organic matter in source rocks of continental facies [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2(4): 8–16 (in Chinese with English abstract).
- Shi Jixi, Yu Xiaoying. 1995. The role of ancient oil reservoirs, bitumens and bitumen inclusions in metallogenetic research [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 15(2): 117–122 (in Chinese with English abstract).
- Shi Lanting, Zheng Rongcai. 2008. Method for improving the modeling precision of seismic inversion—Method for natural gamma ray inversion modeling [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 30(5): 68–72 (in Chinese with English abstract).
- Singh S, Awasthi A K, Khanna Y, Kumari A, Singh B, Kumar A, Popli C. 2021. Sediment colour as recorder of climate and tectonics: Cenozoic continental red beds of the Himalayan foreland basin in NW India [J]. *Catena*, 203: 105298.
- Sun Dapeng, Tang Chao, Wei Jialin, Zeng Hui, Chen Jun, Xiao Defu. 2021. Logging responsive characteristics of formation lithology from Nenjiang Formation to Taikang Formation in southern Daqing Placanticline[J]. *North China Geology*, 44(1): 14–20, 26 (in Chinese with English abstract).
- Susan A C, Grant D, Kliti G, John W M. 2016. Uranium mobility in organic matter-rich sediments: A review of geological and geochemical processes[J]. *Earth-Science Reviews*, 159:160–185.
- Wang Dongsheng, Zhang Jinchuan, Li Zhen, Tong Zhongzheng, Niu Jialiang, Ding Wang, Zhang Cong. 2022. Formation Mechanism of Framboidal Pyrite and its Theory Inversion of Paleo-redox Conditions[J]. *Geology in China*, 49(1): 36–50 (in Chinese with English abstract).
- Wang Miao, Wu Bailin. 2022. Experimental study on possibility of deep uranium-rich source rocks providing uranium source in Ordos Basin[J]. *Earth Science*, 47(1): 224–239.
- Wang Wenguang. 2016. Features and the origin of mineral in sandstone type uranium deposit related to petroleum asphalt in Erlian Basin of Inner Mongolia [J]. *Uranium Geology*, 32(5): 270–278 (in Chinese with English abstract).

- Wang Yizhe, Wu Chaodong, Ma Jian, Fang Yanan, Xu Zhuo, Zhou Yanxi. 2019. Strata color rhythm of the Cretaceous–Neogene and evolution of palaeoenvironment and palaeoclimate in Junggar Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 21(3): 451–468 (in Chinese with English abstract).
- Wu Piao. 2020. The Hydrocarbon Accumulation Mechanism of Typical Depression Troughs in Erlian Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Yan Yutong, Li Shengrong, Jia Baojian, Zhang Na, Yan Lina. 2012. Composition typomorphic characteristics and statistic analysis of pyrite in gold deposits of different genetic types[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(4): 214–226 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hua, Zhang Wenzheng, Wu Kai, Li Shanpeng, Peng Ping'an, Qin Yan. 2010. Uranium enrichment in lacustrine oil source rocks of the Chang 7 member of the Yanchang Formation, Erdos Basin, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(4): 285–293.
- Yi Chao, Wang Gui, Li Ping. 2017. Sulfur isotope composition of pyrite in the Zhiluo Formation of northeastern Ordos Basin and its indications[C] //Abstract Collection of Eighth National Symposium on Metallogenic Theory and Prospecting Methods. *Acta Mineralogica Sinica*, 272–273(in Chinese).
- Zhang Jindai. 2016. Innovation and development of metallogenic theory for sandstone type uranium deposit in China [J]. *Uranium Geology*, 32(6): 321–332(in Chinese with English abstract).
- Zhang Ruliang. 2004. Uranium metallogenic conditions and prospecting direction in Jiulongzhang volcanic basin [J]. *Uranium Geology*, 20(4): 213–234 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zilong. 2018. Metallogenesis of Sandstone– type Uranium Deposits in the Southeastern Ordos Basin [D]. Beijing: Beijing Research institute of Uranium Geology(in Chinese with English abstract).
- Zhao Wenzhi, Fang Jie. 2007. Petroleum enrichment rules in lithologic and stratigraphic pools in different faulted basins: An example from the correlation of lithologic and stratigraphic pools in Jizhong Depression and in Erlian Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 34(2): 129–134(in Chinese with English abstract).
- Zhao Xianzheng, Jin Fengming, Qi Jiafu, Wang Quan, Yang Minghui, Shi Yuanpeng, Dong Xiongying. 2015. The structural types and petroleum geological significance of Early Cretaceous complex faulted sag in Erlian Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 26(7): 1289–1298 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua. 1997. *Geochemical Principles of Trace Elements*[M]. Beijing: Science Press, 1–249 (in Chinese).
- Zhao Zhigang, Wang Feiyu, Wang Hongbo, Wang Mingwei, Wang Hao, Lan Baofeng. 2017. Source kitchen and organic facies of source rocks in Sahantala Sag, Erlian Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 29(2): 28–35 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Dazhong, Zheng ruofeng. 2004. Study on hydrides as significant transferring forms of mineral formation [J]. *Journal of Salt Lake Research*, 12(4): 9–17 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈治军, 高怡文, 刘护创, 陈义国. 2013. 二连盆地高力罕凹陷查干诺尔洼槽测井烃源岩评价方法及应用[J]. *内蒙古石油化工*, (11): 30–32.
- 陈祖伊, 陈戴生, 古抗衡. 2013. 中国铀矿床研究评价第三卷: 砂岩型铀矿床[R]. 北京: 中国核工业地质局.
- 戴金星. 1993. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别[J]. *天然气地球科学*, (2–3): 1–40.
- 冯伟平, 王飞宇, 王宗秀, 师玉雷, 江涛, 王予帆, 周洪峰. 2020. 乌兰花凹陷原油特征及成因[J]. *地质力学学报*, 26(6): 932–940.
- 顾雪祥, 章永梅, 李葆华, 薛春纪, 董树义, 付绍洪, 程文斌, 刘丽, 吴程赟. 2010. 沉积盆地中金属成矿与油气成藏的耦合关系[J]. *地质前缘*, 17(2): 83–105.
- 郭强, 李子颖, 秦明宽, 钟大康, 张放东, 贾翠, 邬军. 2014. 内蒙古二连盆地白音查干凹陷热水沉积序列探讨[J]. *沉积学报*, 32(5): 810–815.
- 黄广文, 余福承, 潘家永, 陈正乐, 吴德海, 薛万文, 宋泰忠, 李善平. 2021. 伊犁盆地蒙古其古尔铀矿床黄铁矿成因特征及其对铀成矿作用的指示[J]. *中国地质*, 48(2): 507–519.
- 黄世杰. 1994. 层间氧化带砂岩型铀矿的形成条件及找矿判据[J]. *铀矿地质*, 10(1): 6–13.
- 黄振凯, 郝运轻, 李双建, 沃玉进, 孙冬胜, 黎茂稳, 陈建平. 2020. 鄂尔多斯盆地长7段泥页岩层系含油气性与页岩油可动性评价——以H317井为例[J]. *中国地质*, 47(1): 210–219.
- 江国平, 赵利信. 2021. 某高碳酸盐砂岩铀矿混合有机酸原地浸出试验研究[J]. *原子能科学技术* 55(Suppl.): 380–388.
- 康世虎, 杨建新, 刘武生, 赵兴齐, 乔鹏, 杜鹏飞, 吕永华. 2017. 二连盆地中部古河谷砂岩型铀矿成矿特征及潜力分析[J]. *铀矿地质*, 33(4): 206–217.
- 李星波, 季军良, 曹展铭, 王朴, 吴武军, 孙玲. 2021. 柴达木盆地北缘古一新近纪河湖相沉积物颜色的气候意义[J]. *地球科学*, 46(9): 3278–3289.
- 李子颖, 方锡珩, 陈安平, 欧光习, 孙晔, 张珂, 夏毓亮, 周文斌, 陈法正, 李满根, 刘忠厚, 焦养泉. 2009. 鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿叠合成矿模式[J]. *铀矿地质*, 25(2): 65–70.
- 李子颖, 方锡珩, 陈安平, 欧光习, 肖新建, 孙晔, 刘池洋, 王毅. 2007. 鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿目标层灰绿色砂岩成因[J]. *中国科学D辑: 地球科学*, 37(s1): 139–146.
- 李子颖, 秦明宽, 蔡煜琦, 方锡珩, 郭庆银, 易超, 夏毓亮, 孙晔, 张子龙, 贾立成. 2020. 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿成矿作用和前景分析[J]. *铀矿地质*, 36(1): 1–13.
- 李子颖. 2019. 鄂尔多斯盆地北部砂岩铀成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 471.
- 林锦荣, 田华, 董文明, 夏毓亮, 郑纪伟, 欧光习, 庞雅庆. 2009. 松辽盆地东南部油气、煤层气后生蚀变硫同位素特征[J]. *世界核地质科学*, 26(2): 63–67.

- 刘倩. 2022. 共生成矿(藏)过程中的有机-无机相互作用[J]. 石油化工应用, 41(2): 8-12.
- 刘池洋, 张复, 新高飞. 2006. 沉积盆地成藏(矿)系统[J]. 中国地质, 34(3): 365-374.
- 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(s1): 164-176.
- 刘武生, 李西得, 薛宗安, 吕永华, 刘持恒. 2020. 内蒙古二连盆地哈达图铀矿床地球化学特征及其地质意义[J]. 铀矿地质, 36(5): 325-335.
- 吕永华, 康世虎, 刘武生, 苗爱生, 杜鹏飞. 2021. 二连盆地哈达图铀矿床关键控矿要素与成矿模式研究[J]. 铀矿地质, 37(4): 584-593.
- 马杏垣, 刘和甫, 王维襄, 汪一鹏. 1983. 中国东部中、新生代裂陷作用和伸展构造[J]. 地质学报, (1): 22-32.
- 聂逢君, 李满根, 邓居智, 严兆彬, 张成勇, 姜美珠, 杨建新, 旷文战, 康世虎, 申科峰. 2015. 内蒙古二连盆地“同盆多类型”铀矿床组合与找矿方向[J]. 矿床地质, 34(4): 711-726.
- 聂逢君, 严兆彬, 夏菲, 李满根, 卢亚运, 蔡建芳, 郭福能, 宁君. 2017. 内蒙古开鲁盆地砂岩型铀矿热流体作用[J]. 地质通报, 36(10): 1850-1866.
- 漆家福, 赵贤正, 李先平, 杨明慧, 肖扬, 于福生, 董越崎. 2015. 二连盆地早白垩世断陷分布及其与基底构造的关系[J]. 地学前缘, 22(3): 118-127.
- 秦艳, 张文正, 彭平安, 周振菊. 2009. 鄂尔多斯盆地延长组长7段富铀烃源岩的铀赋存状态与富集机理[J]. 岩石学报, 25(10): 2469-2476.
- 尚慧芸, 李晋超. 1981. 陆相生油岩有机质的丰度及类型[J]. 石油学报: 8-16.
- 施继锡, 王华云. 1995. 古油藏, 沥青及沥青包裹体在金属成矿研究中的应用[J]. 矿物学报, 15(2): 117-122.
- 石兰亭, 郑荣才. 2008. 提高地震反演中测井建模精度的方法与应用——自然伽马反演模型建模方法[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 30(5): 68-72.
- 孙大鹏, 汤超, 魏佳林, 曾辉, 陈军, 肖德富. 2021. 大庆长垣南端含铀岩系地层测井响应特征及应用[J]. 华北地质, 44(1): 14-20, 26.
- 王文广. 2016. 二连盆地与地沥青密切相关的砂岩型铀矿床微观矿物特征及成因分析[J]. 铀矿地质, 32(05): 270-278.
- 王东升, 张金川, 李振, 全忠正, 牛嘉亮, 丁望, 张聪. 2022. 草莓状黄铁矿的形成机制探讨及其对古氧化-还原环境的反演[J]. 中国地质, 49(1): 36-50.
- 王苗, 吴柏林, 李艳青, 刘池阳, 郝欣, 刘明义, 张婉莹, 李琪, 姚璐航, 张效瑞. 2022. 鄂尔多斯盆地深部富铀烃源岩提供铀源可能性的实验研究[J]. 地球科学, 47(1): 224-239.
- 王熠哲, 吴朝东, 马健, 房亚男, 许酌, 周彦希. 2019. 准噶尔盆地白垩纪一新近纪地层颜色韵律与古环境和古气候演化[J]. 古地理学报, 21(3), 451-468.
- 吴飘. 2020. 二连盆地典型注槽成藏机理研究[D]. 博士学位论文, 中国地质大学(北京), 北京.
- 严育通, 李胜荣, 贾宝剑, 张娜, 闫丽娜. 2021. 中国不同成因类型金矿床的黄铁矿成分标型特征及统计分析[J]. 地学前缘, 19(4): 214-226.
- 易超, 王贵, 李平. 2017. 鄂尔多斯盆地东北部直罗组黄铁矿硫同位素特征及其指示意义探讨[C]//第八届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文摘要文集. 矿物学报, 272-273.
- 张金带. 2016. 我国砂岩型铀矿成矿理论的创新和发展[J]. 铀矿地质, 2016, 32(6): 321-332.
- 张如良. 2004. 鄂尔多斯深盆气与铀矿化关系初探[J]. 铀矿地质, 20(4): 213-234.
- 张宇龙. 2018. 鄂尔多斯盆地东南部砂岩型铀矿成矿作用研究[D]. 北京: 核工业北京地质研究院.
- 赵文智, 方杰. 2007. 不同类型断陷湖盆岩性-地层油气藏油气富集规律——以冀中坳陷和二连盆地岩性-地层油气藏对比为例[J]. 石油勘探与开发, 34(2): 129-134.
- 赵贤正, 金凤鸣, 漆家福, 王权, 杨明慧, 史原鹏, 董雄英. 2015. 二连盆地早白垩世复式断陷构造类型及其石油地质意义[J]. 天然气地球科学, 26(7): 1289-1298.
- 赵振华. 1997. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1-249.
- 赵志刚, 王飞宇, 王洪波, 王名巍, 王浩, 蓝宝锋. 2017. 二连盆地赛罕塔拉凹陷烃源岩有机质与烃源灶[J]. 岩性油气藏, 29(2): 28-35.
- 郑大中, 郑若锋. 2004. 论硫化物是成矿的重要迁移形式[J]. 盐湖研究, 12(4): 9-17.