

doi: 10.12029/gc20210416

黄广楠, 黄广文, 王伟超, 陈正乐, 严翔, 俞初安, 张成勇. 2021. 柴北缘冷湖地区砂岩型铀矿床地质特征及成矿条件分析[J]. 中国地质, 48(4): 1200–1211.

Huang Guangnan, Huang Guangwen, Wang Weichao, Chen Zhengle, Yan Xiang, Yu Reng'an, Zhang Chengyong. 2021. Geology and minerogenetic condition of the Lenghu sandstone-type uranium deposit in the northern margin of Qaidam Basin [J]. *Geology in China*, 48(4): 1200–1211 (in Chinese with English abstract).

## 柴北缘冷湖地区砂岩型铀矿床地质特征 及成矿条件分析

黄广楠<sup>1,2</sup>, 黄广文<sup>2,3</sup>, 王伟超<sup>1</sup>, 陈正乐<sup>4</sup>, 严翔<sup>1</sup>, 俞初安<sup>5</sup>, 张成勇<sup>3</sup>

(1. 青海煤炭地质一〇五勘探队, 青海 西宁 810007; 2. 青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室, 青海 西宁 810012; 3. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 4. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 5. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170)

**摘要:**冷湖地区砂岩型铀矿是近年柴北缘新发现的具有工业价值的铀矿床, 为了进一步研究该地区砂岩型铀成矿岩石学及矿物学特征、铀成矿条件等问题, 本文在野外地质调查的基础上, 利用偏光显微镜结合电子探针分析手段, 对该区内大煤沟组中含矿岩石进行了系统研究。结果表明: 研究区中侏罗统大煤沟组含矿岩石类型主要为(粉)砂质泥岩、薄层煤及细粒石英杂砂岩, 整体发育一系列后生蚀变。研究区北东侧安南坝山古元古界达肯达坂群及赛什腾山海西期花岗岩为区内砂岩型铀成矿提供了丰富的铀源。砂岩型铀矿中铀主要以独立铀矿物沥青铀矿的形式赋存, 其次含有少量分散吸附态铀, 沥青铀矿总体呈不规则粒状、星点状、“串珠状、线状”及粉末状赋存于黄铁矿边缘、裂隙部位或黄铁矿与方解石的接触部位, 吸附态铀主要赋存于炭屑及煤线内; 区内沥青铀矿为柴北缘地区首次揭露并发现的独立铀矿物, 总体上填补了柴北缘地区无独立铀矿物出露的空白。铀成矿条件方面, 含矿目的层中方解石的发育, 显示了铀成矿流体富含 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 等挥发分和矿化剂, 其次出露的众多还原性介质(油气、炭屑及黄铁矿等)为区内砂岩型铀成矿提供了氧化还原反应必需的还原剂, 最终将 U<sup>6+</sup> 还原成 U<sup>4+</sup> 以沥青铀矿等形式沉淀成矿。

**关键词:**砂岩型铀矿; 沥青铀矿; 电子探针; 柴北缘; 冷湖地区; 地质调查工程; 青海省

中图分类号: P619.14 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2021)04-1200-12

## Geology and minerogenetic condition of the Lenghu sandstone-type uranium deposit in the northern margin of Qaidam Basin

HUANG Guangnan<sup>1,2</sup>, HUANG Guangwen<sup>2,3</sup>, WANG Weichao<sup>1</sup>, CHEN Zhengle<sup>4</sup>,  
YAN Xiang<sup>1</sup>, YU Reng'an<sup>5</sup>, ZHANG Chengyong<sup>3</sup>

(1. No. 105 Exploration Team, Qinghai Bureau of Coal Geological Exploration, Xining 810007, Qinghai, China; 2. Key Laboratory of the Northern Qinghai-Tibet Plateau Geological Processes and Mineral Resources, Xining 810012, Qinghai, China; 3. State Key

收稿日期: 2020-06-05; 改回日期: 2021-06-01

基金项目: 青海省青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室资助项目(2019-KY-04)、中国地质调查局地质调查项目(DD20160127)、青海省科技厅基础研究计划项目(2018-ZJ-779)及青藏高原二次科考项目(2019QZKK0702)联合资助。

作者简介: 黄广楠, 男, 1989年生, 硕士, 工程师, 主要从事铀矿地质及非常规能源勘查工作; E-mail: 904223995@qq.com。

通讯作者: 黄广文, 男, 1991年生, 博士生, 主要从事铀矿地质调查与研究; E-mail: 807334699@qq.com。

*Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China;*  
4. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;* 5. *Tianjin Geological Survey Center of China Geological Survey, Tianjin 300170, China)*

**Abstract:** The Lenghu sandstone-type uranium deposit is the newly discovered industrial deposit in the northern margin of Qaidam basin. Based on the field geological survey, the ore-bearing rocks in the Dameigou Formation in this area were studied by means of polarizing microscope and electron probe analysis to further clarify the characteristics of uranium source, petrology and mineralogy of Lenghu sandstone-hosted uranium deposit. Results show that the ore-bearing rocks in the Dameigou Formation are mainly (silty) sandy mudstone and thin layer coal and fine-grained quartz greywacke, accompanied with a series of epigenetic alteration phenomena. The Lower Proterozoic Dakendaban Group and Hercynian granite in the northeastern part of the study area provide abundant uranium sources for uranium mineralization. The uranium minerals in this deposit are mainly pitchblende and minor adsorption state of uranium. In general, the pitchblende occurs in irregular granular, stellate, "beadlike, linear" and powdery forms at the edge of pyrite, in the crack or on the contact between pyrite and calcite. The adsorbed uranium mainly occurs in the carbon chips and coal lines. The pitchblende deposit is the first exposed and discovered independent uranium mineral in the northern margin of Qaidam basin, which generally fills the blank of no independent uranium mineral exposed in this area. The presence of calcite in ore-bearing layer indicates that the uranium mineralization fluid is rich in CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O etc. volatile and mineralizer. In addition, many exposed reducing medium (oil and gas, carbon and pyrite, etc.) provides reductant required for REDOX reaction of this type of deposit, which eventually reduces U<sup>6+</sup> to U<sup>4+</sup> and results in precipitation of pitchblende.

**Key words:** sandstone-type uranium deposit; pitchblende; electron probe; northern margin of Qaidam basin; Lenghu area; geological survey; Qinghai Province

**About the first author:** HUANG Guangnan, male, born in 1989, master, engineer, engaged in survey of uranium geology and Unconventional energy exploration; E-mail: 904223995@qq.com.

**About the corresponding author:** HUANG Guangwen, male, born in 1991, doctoral candidate, engaged in the exploration and research of uranium geology; E-mail: 807334699@qq.com.

**Fund support:** Supported by Key Laboratory of the Northern Qinghai-Tibet Plateau Geological Processes and Mineral Resources (No. 2019-KY-04), the project of China Geological Survey (No. DD20160127), the Natural Science Foundation of Qinghai Provincial Department of Science and Technology (No. 2018-ZJ-779) and Qinghai-Tibet Plateau secondary research (No. 2019QZKK0702).

## 1 引言

砂岩型铀矿自19世纪80年代开始陆续进入国际视野,因其储量大、开采成本低和节能环保等优势目前已成为国内外铀矿找矿领域的主攻方向之一,随着研究方法与技术的不断革新,砂岩型铀矿形成了较具特色的区域控矿理论或成矿理论体系(张晓,2012;黄广文等,2017)。砂岩型铀矿作为中国具有工业意义的重要铀矿床类型之一,始于20世纪50年代。近年来,中国在铀矿资源勘探计划调整及加大找矿力度的形式下,重点加强了北方多个盆地内找寻可地浸砂岩型铀矿的找矿力度,并相继在鄂尔多斯盆地、伊犁盆地、吐哈盆地、二连盆地等地区取得了重大突破(张金带等,2005;辛存林,2007),探明了多个大型—超大型

砂岩型铀矿资源基地。

柴达木盆地位于青藏高原北缘青海省境内,是中国西部地区重要的中—新生代大型陆相沉积盆地(王丹等,2015),同时也是中国基础能源开发勘探的重要盆地之一,素有“祖国聚宝盆”的美誉。到目前为止,盆地内已发现的矿产能源主要有天然气、石油、煤以及砂岩型铀矿(王丹等,2015;刘文进等,2019;宋光永等,2020)。其中砂岩型铀矿主要分布于柴达木盆地北缘(以下简称柴北缘)地区,目前已发现有10余处铀矿点、矿化点及异常点,多分布于鱼卡、北大滩、冷湖及航亚等地。冷湖地区砂岩型铀矿为近年新发现的具有工业铀矿化的找矿远景区,发育有多处铀矿化点、异常点、带等,目前区内工作基础较为薄弱。前人对该地区砂岩型铀

成矿作用开展了少量研究工作,主要集中于铀矿化特征及成矿条件(辛存林,2007)、铀矿类型、找矿方向及前景(路耀祖等,2007;刘林等,2013;冯伟和宋宪生,2018)、多种能源矿产勘查模式(王丹等,2015)等方面,而针对区内砂岩型铀矿岩石学与矿物学特征、铀源及成矿条件等方面研究程度很低。本文初步解析区内含矿目的层岩石学、矿物学等特征对铀成矿作用的指示,以期进一步为区内砂岩型铀矿勘探提供重要的理论依据和指导意义。

## 2 矿区地质概况

柴达木盆地夹持于北部阿尔金山、北东祁连山及南部昆仑山之间(图1a),是元古宙晋宁运动克拉通化及晚古生代海西运动加积增生后发展起来的大型中—新生代压扭性陆相沉积盆地(路耀祖,2007)。柴北缘位于华北板块和柴达木微板块之间,属祁连造山带类前陆逆冲推覆构造带,主体构造方向为NW—NWW,其北界为达肯大坂—宗务隆山断裂带,南界为冷湖—陵间断裂带,是侏罗系主要分布地区(辛存林,2007;冯伟和宋宪生,2018)。冷湖地区位于柴达木断陷带北部昆特依凹陷和赛什腾凹陷之间,北东为赛什腾山,北邻阿尔金山(图1a),地势上呈现北西高、南东低的特点(路耀祖,

2007;徐文等,2012)。

冷湖地区地层从老到新分别出露古元古界(Pt<sub>1</sub>)、侏罗系、古—新近系及第四系。其中古元古界在区内仅出露于小红山及小孤山一带,岩性由花岗片麻岩、绿泥石片岩、云母片岩及石英片岩组成,其次见有中酸性侵入岩(花岗岩等)出露,其基底为一套中酸性火山岩类,多以安山岩、安山玢岩为主。侏罗系是柴北缘地区主要的含煤含铀地层,分为中侏罗统小煤沟组(J<sub>2x</sub>)和大煤沟组(J<sub>2d</sub>);其中大煤沟组是该区主要的含煤(铀)地层,出露面积约3 km<sup>2</sup>,岩性以深灰色砂砾岩、(粉)砂质泥岩、细粒石英杂砂岩、炭质砂质泥岩、粉砂岩及薄层煤等,粉砂岩中夹有较多黑色炭质植物化石、煤线。古—新近系(N—E)区内仅出露路乐河组(E<sub>1-2l</sub>),其岩性主要以砖红色粗碎屑岩、灰黄色砂砾岩和红色砂质泥岩为主,分选差,磨圆差,自下而上由粗变细,为正旋回。第四系(Q)主要由冲积、洪积砂砾石、盐湖化学沼泽堆积等组成,厚度介于0~80 m。

冷湖地区共发育F1、F2、F3、F4、F5、F6六条断裂构造,本文研究区出露的断裂构造为F2、F3、F4、F6,其中工业铀矿化位于F4断裂南缘(图1b)。F2断裂即呼北断裂,其走向NW,倾向NE,为正断层;F3断裂即呼南断裂,为逆断层,其走向、倾向与F2断裂一

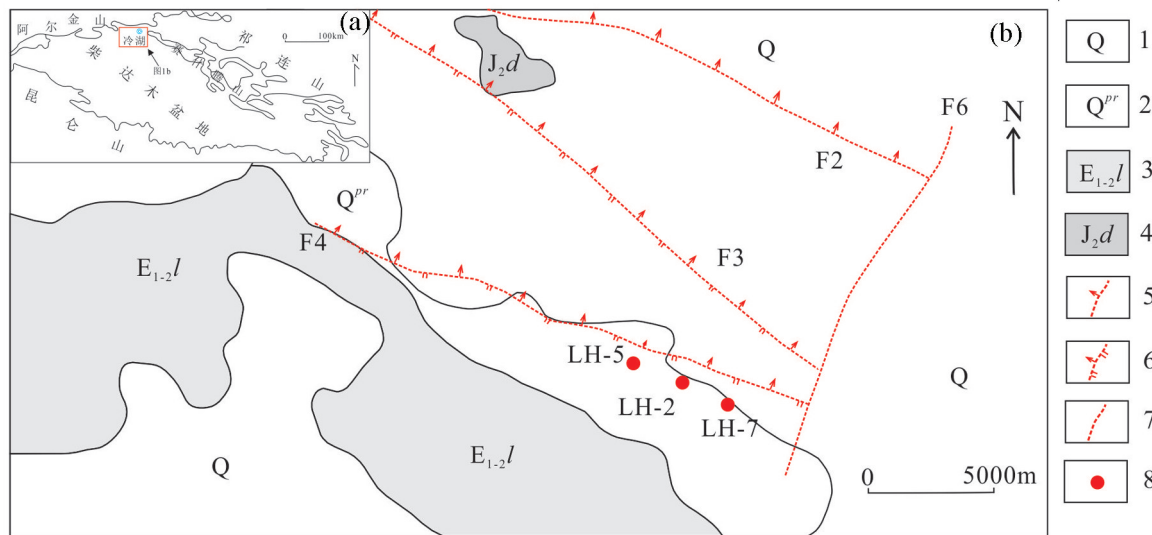


图1 柴北缘冷湖地区地质简图(底图据周雪峰等,2018修改)

1—第四系松散堆积物;2—第四系成因不明沉积;3—古近系路乐河组;4—侏罗系大煤沟组;5—正断层;6—逆断层;7—推测断层;8—已施工工业铀矿孔

Fig.1 Geological map of Lenghu area in the northern margin of Qaidam basin (base map after Zhou Xuefeng et al.,2018)

1—Quaternary loose deposits; 2—Quaternary deposit of unknown origin; 3—Paleogene Lulehe Formation; 4—Jurassic Dameigou Formation; 5—Normal fault; 6—Reverse fault; 7—Presumed fault; 8—Industrial uranium ore hole has been constructed

致,与区内F5逆断层构成呼南断陷;F4断裂走向NW,倾向NE,为逆断层,该断裂为F5断裂的分支部分,是研究区域南部昆特依构造带的分界线;F6断裂为一推测断层,其走向NNE<sup>①</sup>(白亚东等,2019)。

### 3 岩相古地理特征

冷湖地区含矿目的层中侏罗统大煤沟组以含

煤碎屑岩沉积为主,为温暖潮湿背景下的三角洲沉积。目前根据冷湖LH-7钻孔沉积素描与沉积相图(图2)可进一步分为水下分流河道、分流间湾、河口沙坝和水下决口扇等沉积微相,总体以水下分流河道和分流间湾为主。

(1)水下分流河道。岩性以灰白色、浅黄色、红色砂质砾岩、含砾粗砂岩为主,分选性中等一差,碎

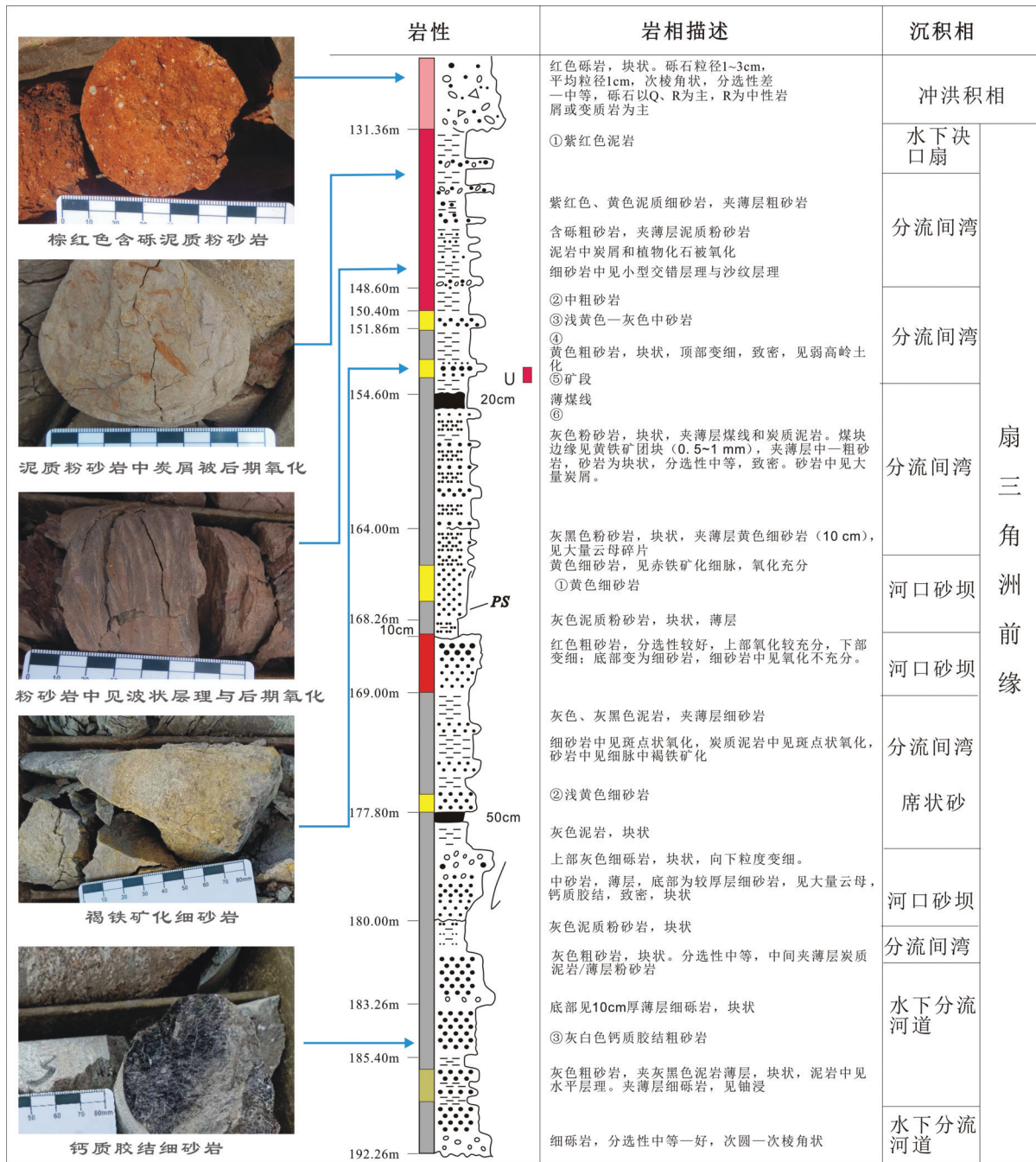


图2 冷湖LH-7钻孔沉积素描与沉积相图

Fig.2 Sedimentary sketch and facies diagram of borehole LH-7 in the Lenghu deposit

层呈次棱角状,发育有块状构造,局部见交错层理,多发育复合正韵律,韵律底部常见冲刷充填构造。垂向上可见含砾粗砂岩或粗砂岩直接过渡为砂质泥岩的沉积序列,水下分流河道测井曲线以箱状或“圣诞树状”为主,呈顶部突变的接触关系,指示物源供应的间歇性。

(2)水下分流河道间湾。由一套暗色、灰黑色泥岩、粉砂岩组成,夹薄层炭质泥岩或中、细砂岩,其中粉砂岩中含有大量白云母碎片,且粉砂岩和泥岩中见植物叶片化石和植物茎干化石,多顺层分布。发育水平层理、波状层理和小型交错层理。

(3)河口砂坝。由一套由粗变细的细砂岩—中粗砂岩组成,颗粒分选性、磨圆度较好,自下至上由细逐渐变粗,呈明显的倒粒序,单层厚度为0.5~1.0 m,测井曲线上表现为“倒圣诞树”型,包络线多呈齿状。

(4)重力流沉积。三角洲前缘水下分流河道中携带沉积物入湖斜坡区,由于坡度的影响造成的重力驱动下的滑动,形成泥包砂等重力流沉积和软沉积变形,在钻孔岩心中主要表现为:垂向上,大煤沟组为形成多个砂体厚度范围的韵律,表现为退积序列,含矿目的层下部为水下分流河道沉积,上部逐渐演变为河口砂坝沉积,顶部过渡为分流间湾泥岩为主的沉积,倒粒序不明显指示湖扩的沉积背景。钻孔沉积素描面所示砾岩或含砾粗砂岩直接过渡为泥岩或砂质泥岩的沉积序列,反映了该区物源的水系不稳定,洪水起了重要作用,造成河道的频繁迁移。

通过对野外露头 and 钻孔的观察和描述,结合煤炭和石油在该地区做的勘查工作,初步认为冷湖地区目的层大煤沟组沉积上可能具备多物源、近物源、堆积快、变化大的特点,结合该地区出现的重力流沉积,确定其为扇三角洲沉积,北部石泉滩地区为三角洲平原沉积,南部冷湖三号构造带为三角洲前缘沉积亚相(图3)。

#### 4 岩石学特征

冷湖地区含矿目的层中侏罗统大煤沟组( $J_2d$ )以含煤碎屑岩沉积为主,为温暖潮湿背景下的三角洲沉积,岩性上表现为一套含砾砂岩、中粗粒砂岩、砂质泥岩及夹薄煤层等一套岩石组合,同时含大量炭屑和植物化石等。研究区钻孔揭露的铀矿化异常分布于(粉)砂质泥岩、灰色细粒石英杂砂岩和薄煤层中。

(粉)砂质泥岩总体发育砂质隐晶状、微晶状结构(图4a),层理构造,局部发育弱定向构造(图4b)。岩石整体发育一系列不同程度后生蚀变,主要为绿泥石化、伊利石化、水云母化、碳酸盐化及高岭石化(图4b、c)。岩石主要由黏土矿物伊利水云母、高岭石、绿泥石、绢云母及砂屑组成,另见少量炭屑、方解石及铁质氧化物等。伊利水云母呈隐晶状、显微细鳞片状,局部被铁染显褐色,整体略显顺层弱定向排列,含量约48%。绿泥石呈显微叶片状、显微鳞片集合体状展布,发育淡绿色微带褐色调,常与伊利水云母交织分布,整体含量约7%。绢云母以细鳞片状锥晶的形式分布,均为黏土物质等组分转变而来,个别锥晶状白云母向白云母过渡,干涉色鲜艳,含量约3%。砂屑主要为石英、长石及岩屑,粒径为0.02~0.36 mm,个别最大者约0.50 mm,含量约31%。其中石英呈次棱角—次圆状展布,且边缘被熔蚀呈不规则港湾状(图4b),推测可能来源于中酸性火山岩;长石呈次棱角状,多为微斜长石及斜长石,隐约可见格子双晶及聚片双晶;岩屑见有千枚岩岩屑,主要由锥晶绢云母组成。方解石呈团粒集合体状展布,经茜素红硫酸为红色,具高级白干涉色,含量约2%。炭质经压实作用呈弯曲片状、细脉状展布(图4a),铁质氧化物呈红褐色凝粒状、团粒状出露,部分与黏土矿物混染。

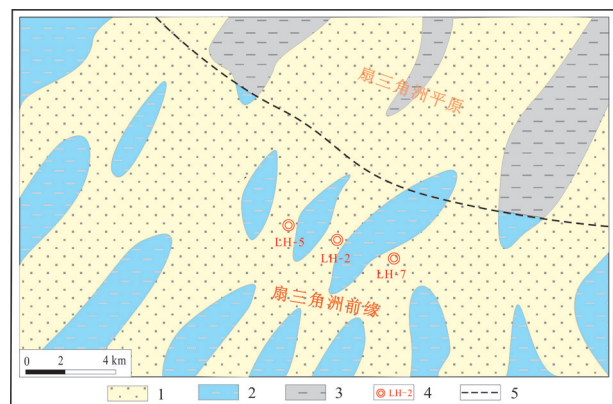


图3 冷湖地区沉积相平面图

1—分流河道;2—水下分流间湾;3—扇平原分流间湾;4—钻孔编号;  
5—沉积相分割虚线

Fig.3 Sedimentary facies plan of the Lenghu area

1—Diversiion channel; 2—Underwater diversion bay; 3—Fan plain  
diversion bay; 4—Drilling number; 5— Sedimentary facies segmentation  
dashed line

薄层煤样品主要由炭质有机质、石英、黏土矿物、不透明金属矿物及方解石组成,整体发育凝胶状结构(图4d),块状构造。其中炭质有机质含量约70%,呈胶状、凝胶状不透明分布,局部较薄区域呈现棕褐色色调;黏土矿物含量约10%,呈显微鳞片状、隐晶状展布,多为水云母、高岭石等,局部与炭质组分互混;石英以微晶状分布于炭质中;不透明金属矿物见黄铁矿及赤铁矿,含量约8%;其中黄铁矿呈他形晶粒状、粒状集合体展布(图4d),个别以凝块状、弥散状分布;赤铁矿呈他形晶不规则细脉状、胶状分布于岩石裂隙内,具弱非均质性,发育明显朱红色内反射色,局部交代星点状黄铁矿明显,二者构成包含结构(图4d)。方解石含量约12%,呈他形晶粒状展布,局部以粒状集合体形式出露,整体发育机械双晶及高级白干涉色明显(图4e),常分布于炭质有机质内。

细粒石英杂砂岩发育细粒砂状结构(图4f),块状构造,局部构成微层状构造。主要由石英、长石、岩屑、黑云母、雏晶白云母、绢云母组成,胶结物由氧化铁质及黏土矿物组成,支撑类型为杂基支撑,基底式胶结,颗粒间呈点接触或无接触。岩石整体成分成熟度低及结构成熟度一般。砂屑石英含量约69%,呈棱角状一次棱角状展布,粒径介于0.10~0.52 mm,个别粒径最大者约0.60 mm,见少数石英边缘被熔蚀呈港湾状(图4f),表明其来源于中酸性火山岩类;长石多为钾长石及斜长石,含量约2%,呈次棱角状,偶见聚片双晶发育,整体黏土化较强;岩屑多为千枚岩岩屑,以棱角状居多;绢云母及白云母含量约4%,呈雏晶状、显微鳞片状展布,局部绢云母经重结晶作用向白云母过渡,干涉色鲜艳;黑云母大多已蚀变完全,呈交代残留状展布,蛭石化、黏土化明显,部分因褪色反应仅保留其细鳞片状外形,含量约1%;黏土矿物含量约20%,多为高岭石、水云母等,呈隐晶状、显微鳞片状分布,部分因铁染呈褐色;氧化铁质组分含量约3%,呈凝粒状、胶状,与黏土矿物互混分布于砂屑粒间。

## 5 矿石及铀矿物特征

### 5.1 矿石特征

截至目前,冷湖地区共发现5个砂岩型铀矿工业孔、4个异常孔及3个铀矿化孔,其所在地层均为中侏

罗统大煤沟组( $J_2d$ )。为了系统判别区内铀矿物形态、类型及赋存状态等特征,笔者针对工业孔LH-5内已揭露的含矿目的层大煤沟组中不同含矿岩芯,依据矿石贫富特征及伽马值含量特征,共采集3件矿石样品(表1)。本次所采样品埋深介于364.05~420.75 m,野外含铀伽马值介于25~589 CPS,且伽马值较高的样品伴随炭屑有机质或煤线等发育明显,表明铀含量与炭屑有机质等组份关系密切。

### 5.2 铀矿物特征

选择含矿目的层大煤沟组中代表性铀矿石样品,进行普通薄片及电子探针片的磨制,经室内显微镜下仔细观察鉴定后,挑选出具有代表性的电子探针片进行喷碳处理后开展电子探针微区成分分析。本次铀矿物微区化学成分分析实验在廊坊区调所电子探针室完成,所用仪器型号为JEOL JXA-8230型电子探针和与之耦合的Inca Energy型能谱仪,测试条件为:加速电压15 kV,探针电流20 nA,电子束斑直径为1  $\mu\text{m}$ 。实验室条件:温度23 $^{\circ}\text{C}$ ,湿度介于55%~60%。测试过程严格按照国家标准(GB/T15617-2002)进行,其中测试所用标样主要为:U-UO<sub>2</sub>(测试时间30 s)、Y-钇铝榴石(30 s)、Th-方钍石(30 s)、Pb-PbCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>(60 s)、Ce、Nd-合成稀土五磷酸盐(20 s)、Ca-钙蔷薇辉石(10 s)、Fe-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(10 s)、Si-钠长石(10 s)等,测试元素中U、Th、Pb分析线系为M $\alpha$ , Y、Ce、Nd分析线系为L $\alpha$ , Ca、Fe、Si分析线系为K $\alpha$ (张龙等,2016;黄广文等,2017),校正方法为ZAF修正法(李洁等,2013;陶继华等,2020)。

研究区铀矿物电子探针化学成分分析结果详见表2。结果显示冷湖砂岩型铀矿床代表性含矿样品中的铀主要以独立铀矿物的形式赋存,且均为沥青铀矿;其次通过能谱仪定性分析发现有少量的分散吸附态铀分布于炭屑及煤中。截至目前,区内沥青铀矿的发现为柴北缘地区首次揭露查证的砂岩型独立铀矿物。

因含矿目的层内出露的铀矿物粒径总体偏小,故测试过程中对应测试点的总量(total)相对略低。沥青铀矿中UO<sub>2</sub>含量为53.43%~80.63%,平均69.17%;SiO<sub>2</sub>含量为4.12%~5.42%,平均4.77%;CaO含量为1.64%~7.32%,平均4.04%;P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量为0.04%~0.28%,平均0.14%;Na<sub>2</sub>O含量为0.25%~

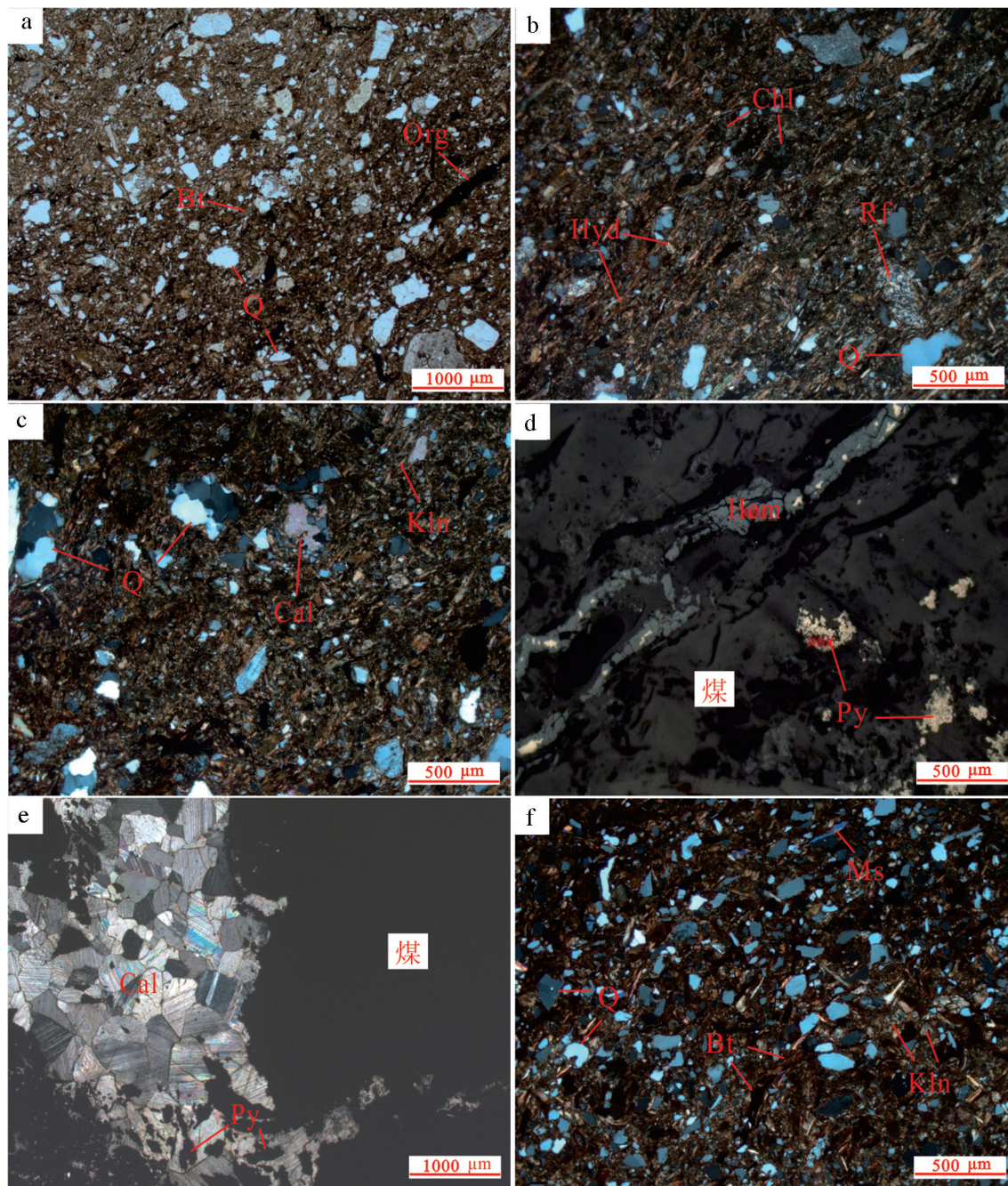


图4 冷湖铀矿床含矿样品岩相学特征

a—岩石发育砂质隐晶状、微晶状结构,常见炭屑(Org)出露,薄片号YK17-01;b—岩石隐约发育弱定向构造、层理构造,发育绿泥石(Chl)化、水云母(Hyd)化,另见千枚岩岩屑(Rf),砂粒石英(Q)边缘熔蚀明显,薄片号YK17-01;c—岩石发育碳酸盐化、高岭石(Kln)化明显,薄片号YK17-01;d—岩石反射光下见细脉状赤铁矿(Hem)、黄铁矿(Py)出露,薄片号YK17-03;e—岩石主要由方解石(Cal)、黄铁矿(Py)及煤组成,薄片号YK17-03;f—岩石发育细砂状结构,部分砂粒石英边缘被熔蚀呈港湾状及不规则状,黑云母(Bt)发育褪色暗化明显,仅保留其细鳞片状轮廓,且岩石发育高岭石化明显,可见白云母(Ms),薄片号YK17-04

Fig. 4 Petrographic characteristics of ore-bearing samples of the Lenghu deposit

a—The rocks with sandy cryptocrystalline and microcrystalline structures, and common carbon shavings (Org) are exposed (YK17-01); b—The rocks are faintly developed with weak directional structure and bedding structure, and chlorite (Chl) and hydromica (Hyd). In addition, there are phyllite cuttings (Rf), sand quartz (Q) with obvious edge erosion (YK17-01); c—The rocks are well developed with carbonation and obvious kaolinite (Kln) alteration (YK17-01); d—Hematite (Hem) and pyrite (Py) can be seen under the reflected light; e—Rocks are mainly composed of calcite (Cal), pyrite (Py) and coal (YK17-03); f—The rocks developed fine sand-like structure, part of the sand quartz edge was corroded into bay and irregular shape, biotite (Bt) developed fading and darkening obviously, only its fine scale contour was retained, and the rocks developed kaolinite obviously, there are muscovite (Ms) (YK17-04)

表1 冷湖铀矿床样品特征及采样位置

序号	样号	岩性	层位	钻孔编号	样深/m	野外伽马值/CPS	编录仪型号
1	YK17-01	(粉)砂质泥岩	大煤沟组 (J <sub>2</sub> d)	LH-5	364.05	580	
2	YK17-03	煤			371.05	589	FD-3010
3	YK17-04	细粒石英杂砂岩			420.55	25	

0.60%, 平均0.39%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为0.30%~0.51%, 平均0.42%; FeO含量为3.29%~13.59%, 平均5.63%; SO<sub>3</sub>含量为1.28%~17.94%, 平均5.56%。上述8个测试点的氧化物含量总体表现出UO<sub>2</sub>含量较高, SiO<sub>2</sub>、CaO、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Na<sub>2</sub>O、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeO及SO<sub>3</sub>含量偏低, 同时除测试点YK17-03-2中FeO及SO<sub>3</sub>含量异常外(由于该点沥青铀矿总体分布于黄铁矿边缘, 且粒径较小, ≤1 μm, 呈微球粒的集合体状, 受黄铁矿的影响明显), 其余测试点中氧化物含量相对趋于稳定。

分散吸附态铀采用Inca Energy型能谱仪定性分析得出(共计3个点), 测点集中于探针片内出露的炭屑及煤部位, 其中UO<sub>2</sub>含量为9.30%~23.72%; SiO<sub>2</sub>含量为0.83%~1.82%; CaO含量为1.54%~3.02%; 总体呈现出富UO<sub>2</sub>, 贫SiO<sub>2</sub>及CaO。

冷湖砂岩型铀矿床中铀矿物赋存形式多样, 依据背散射图像内其出露形态、展布位置及矿物共生等特征, 本次共划分出如下几类形态特征及赋存形式:

(1) 沥青铀矿呈他形晶不规则粒状分布于主晶黄铁矿内(图5a), 个别星点状沥青铀矿以类似包含嵌晶

的形式展布于主晶黄铁矿核部, 其总体粒径介于1~3 μm, 表明沥青铀矿的赋存与黄铁矿关系密切。另外背散射图像显示主晶黄铁矿内发育裂纹明显, 且局部与不规则状方解石颗粒构成“共接边”现象。

(2) 沥青铀矿呈不规则粒状、星点状分布于他形晶粒状黄铁矿边缘或黄铁矿与方解石二者矿物的接触部位(图5b), 局部见少量沥青铀矿以粉末状形式展布于方解石或黄铁矿晶体表面。该类沥青铀矿的赋存表明黄铁矿内含大量的Fe<sup>2+</sup>为U<sup>4+</sup>提供了良好的还原环境; 同时方解石的出露, 在一定程度上增加了沥青铀矿中CaO的组分含量。

(3) 沥青铀矿呈他形晶不规则粒状、粉末状形式充填于主晶黄铁矿裂隙及溶蚀凹坑内(图5c)。背散射图像显示主晶黄铁矿在压实成岩过程中晶内碎裂明显, 裂纹发育普遍, 可能为含铀流体在迁移富集过程中提供了有利的沉淀富集空间, 经氧化还原作用最终在黄铁矿裂隙及溶蚀凹坑内富集成矿。

(4) 沥青铀矿呈他形晶不规则“串珠状”、“线状”等形式分布于主晶黄铁矿内侧或黄铁矿外围带(图5d), 粒径均<1 μm, 其形态及赋存形式为砂岩

表2 柴北缘冷湖砂岩型铀矿床铀矿物电子探针分析结果(%)

Table 2 Results of electron probe analysis of uranium minerals in the northern margin of Qaidam basin (%)

测试项目	样品编号							
	YK-1-1	YK-1-2	YK-1-4	YK-3-1	YK-3-2	YK-3-3	YK-3-5	YK-3-6
CaO	7.05	7.32	7.12	2.96	1.86	1.64	1.69	2.68
TiO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-
UO <sub>2</sub>	69.92	58.92	65.68	80.63	53.43	73.46	71.46	79.87
ThO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-
PbO	-	-	-	0.25	-	-	-	0.12
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.15	0.04	0.06	0.28	0.13	0.07	0.08	0.27
Na <sub>2</sub> O	0.36	0.60	0.63	0.27	0.31	0.28	0.25	0.38
MgO	0.02	0.04	0.05	0.01	0.03	-	-	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.42	0.46	0.48	0.34	0.51	0.40	0.45	0.30
SiO <sub>2</sub>	4.68	4.99	4.32	4.07	5.17	5.39	5.42	4.12
FeO	4.71	4.25	4.85	3.29	13.59	5.43	5.40	3.52
SO <sub>3</sub>	3.63	4.63	4.60	1.52	17.94	5.41	5.47	1.28
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0.05	0.04	-	0.02	-	-	0.03
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.20	0.23	0.24	-	0.36	0.34	0.31	-
Total	91.14	81.53	88.07	93.62	93.35	92.42	90.53	92.58

注:“-”表示含量低于检测限; 测试单位廊坊区调所电子探针实验室, 测试仪器为JXA-8230型电子探针, 测试电压为15.0 kV, 探针束流20nA, 束斑直径为1 μm。



型铀矿床中较为少见。笔者初步推测,可能为成矿作用过程中受贫铀、沉淀富集空间等因素影响所致,项目组后期将进行大量研究,以便做出合理的解释说明。

## 6 成矿条件分析

柴北缘及冷湖地区碎屑沉积具备多物源、近物源、堆积快、变化大的特点,且研究区含矿目的层中石英、长石等碎屑呈次棱角状,颗粒边缘被熔蚀呈不规则港湾状,表明该部分碎屑组分主体来源于中酸性火山岩类,其次含矿岩石内出露有少量千枚岩及片岩等岩屑。区域上柴达木盆地北东缘岩浆活动发育有5个期次,分别为中元古代花岗闪长岩,早古生代蛇绿混杂岩,晚志留世一晚石炭世闪长岩、花岗闪长岩和晚三叠世二长花岗岩、钾长花岗岩、正长花岗岩脉等,由此可以初步得出,晚三叠世二长花岗岩、

钾长花岗岩、正长花岗岩脉等,该套中酸性岩浆活动对区内铀成矿最为有利(刘林等,2013)。另外,冷湖地区北东侧安南坝山和赛什腾山为研究区中生代盖层蚀源区,岩性主要为下元古界达肯达坂群片岩、片麻岩和海西期二长花岗岩、花岗岩等,其中达肯达坂群铀含量为 $4.3 \times 10^{-6}$ ,海西期二长花岗岩铀含量为 $3.9 \times 10^{-6}$ ,花岗岩铀含量为 $4.3 \times 10^{-6} \sim 20.5 \times 10^{-6}$ ,整体铀含量偏高,为公认的含铀建造(幸存林等,2007;路耀祖,2007),而研究区中生代地层内铀含量也相对较高(放射性强度Bq介于12~40),表明源岩在风化、剥蚀、搬运过程中有活化铀迁出,最终在区内固结成岩时铀含量存在一定的继承性,继而指明蚀源区安南坝山和赛什腾山为冷湖地区砂岩型铀成矿提供了丰富的铀源。

冷湖地区工业铀矿化主要分布于大煤沟组砂质泥岩、薄层煤及细粒石英杂砂岩中。区内在早—中侏

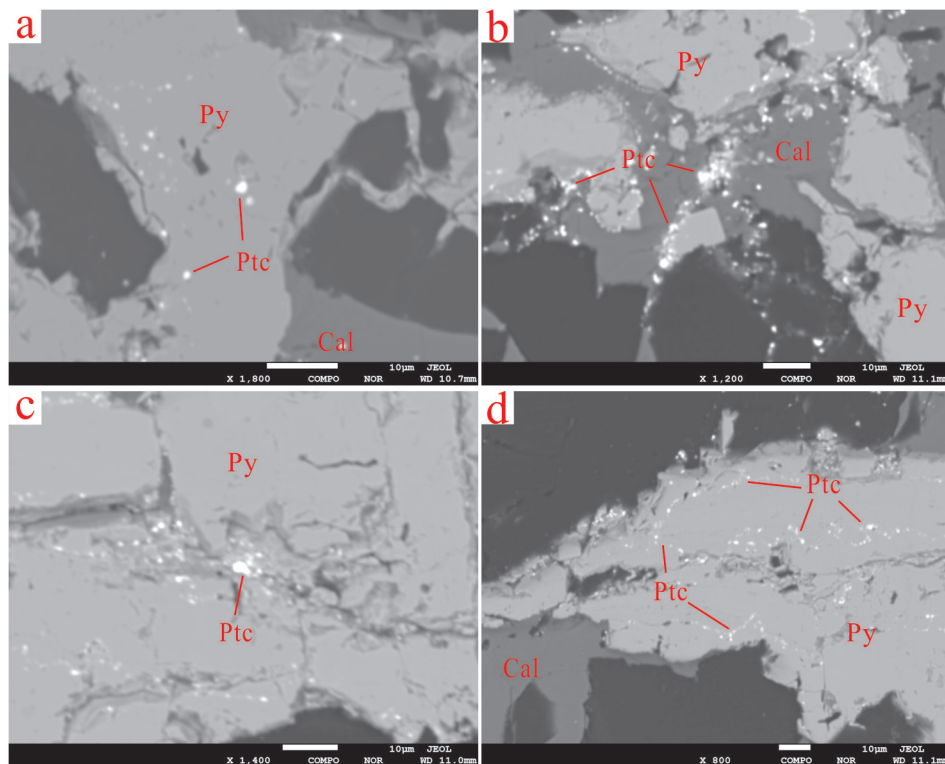


图5 冷湖铀矿床沥青铀矿背散射图像

a—沥青铀矿(Ptc)呈不规则粒状分布于黄铁矿(Py)晶内;b—沥青铀矿呈不规则星点状或星点状集合体的形式展布于黄铁矿边缘以及方解石(Cal)与黄铁矿的接触部位;c—沥青铀矿呈粒状他形晶充填于黄铁矿裂隙或溶蚀凹坑内;d—沥青铀矿呈不规则串珠状、线状、星点状分布于主晶矿物黄铁矿内侧

Fig.5 Backscatter image of pitchblende in the Lenghu deposit

a—Pitchblende (Ptc) was distributed irregularly in pyrite (Py) crystals; b—Pitchblende is distributed at the edge of pyrite and the contact between calcite (Cal) and pyrite in the form of irregular stellate or stellate aggregates; c—Pitchblende was filled in pyrite fissure or dissolution pit with granular allochthonous crystals; d—Pitchblende is irregularly beadlike, linear and starlike in the interior of the main crystalline mineral pyrite

罗世成岩作用强烈,发育明显压实作用及胶结作用,使含矿岩石内原生孔隙逐步变小,导致含铀流体在迁移过程中无合适的容矿储矿空间。而成岩过程中砂体伴随多期次溶蚀作用及次生孔隙发育,且区内溶蚀流体以地下水及下渗大气水为主,其中蚀源区山地基岩裂隙水铀含量底数为 $n \times 10^{-6}$  g/L,中酸性侵入岩(花岗岩、二长花岗岩等)出露区地下水铀含量底数为 $n \times 10^{-5}$  g/L,研究区地层水铀含量 $n \times 10^{-5}$  g/L(辛存林,2007),表明溶蚀流体在运移过程中不断完善了砂体孔隙度及孔隙间连通性,继而为砂体内铀矿富集提供了有利条件,最终在研究区大煤沟组细粒石英杂砂岩内形成工业铀矿化。

另外,砂岩型铀成矿在成岩过程中经历溶蚀作用及后生蚀变作用时,可以为铀的富集沉淀提供有利条件(黄广文等,2017,2021)。研究区岩石学特征显示,区内含矿目的层岩石在成岩过程中伴随有一系列后生蚀变现象,如伊利水云母化、高岭石化、绿泥石化、蛭石化等,这些黏土矿物可能为岩石内长石、岩屑等不稳定组分经历成岩溶蚀作用后的产物,在一定物理化学条件下可相互转化,进而改变含矿目的层砂体的地球化学环境(黄广文等,2017)。冷湖地区大煤沟组内出露有大量黄铁矿、炭屑及薄层煤线,初步证实含矿砂体形成于还原环境,同时该环境为铀的沉淀富集提供了良好条件,且成岩过程中,炭屑、煤线及新生黏土矿物的出露对铀存在吸附作用,继而促使部分铀以吸附态形式赋存。

铀在自然界中主要以独立铀矿物(晶质铀矿、沥青铀矿等)、类质同象(含铀副矿物如锆石、独居石、磷钇矿)以及分散吸附态(常被黑色页岩、煤层、黏土矿物吸附)3种形式赋存(余达淦等,2005)。铀在氧化条件下呈六价态( $U^{6+}$ )以碳酸铀酰络合物或磷酸铀酰络合物或氟酸铀酰络合物的形式迁移,在还原条件下以四价态( $U^{4+}$ )形式沉淀,形成沥青铀矿、晶质铀矿及铀石等独立铀矿物(Hu et al., 2008; Joël Brugger et al., 2016; Liu et al., 2018; Wu et al., 2019; 吴德海等, 2019; 黄广文等, 2021)。

根据冷湖地区中铀矿物的显微特征(图5)可以看出,铀矿物(沥青铀矿)常分布于方解石和黄铁矿等矿物的边缘、裂隙或晶内凹坑中,与方解石、黄铁矿等密切共生,表明冷湖地区成矿流体中的铀主要以碳酸铀酰络合物的形式迁移(Hu et al., 2008)。方解

石的大量存在暗示了冷湖地区铀成矿流体富含 $CO_2$ 、 $H_2O$ 等挥发分和矿化剂,当冷湖地区的环境(如区内构造、压力和温度等)发生改变时,流体中的 $CO_2$ 、 $H_2O$ 等挥发分和矿化剂容易发生一定规模的逃逸。 $CO_2$ 的逸出会导致呈迁移态的碳酸铀酰络离子不稳定而解聚;挥发分和矿化剂逃逸的同时,也会消耗成矿热液系统中的大量热量,导致成矿热液系统的温度降低,进一步引起碳酸铀酰络离子的溶解度明显下降(吴德海等,2019)。侏罗纪—白垩纪期间,北方陆相盆地沉积了大规模含煤炭、油气层的岩层,构成了较为典型的红—黑岩系结构,为北方砂岩型铀矿的主成矿层位(金若时等,2017),其中生代陆相盆地内共轭产出的黑色岩系和红色岩系是古沉积环境由还原向氧化环境转变形成的,即氧化条件下形成的红层,为表生流体溶解铀矿提供了“场”;黑色岩系为铀矿物质沉淀提供了“障”,表明北方陆相盆地砂岩型铀矿与“红—黑岩系”在时空上密切共生(金若时等,2017; Cheng et al., 2019)。冷湖地区为柴北缘重要的油气资源勘探区(周飞等,2019),其油气资源多富含于研究区中侏罗统目的层中,随着区内发育的逆断层直接上移形成还原性气体 $CH_4$ 、 $H_2S$ 。另外研究区在晚侏罗世—白垩纪时期由于缺失白垩纪地层,造成了沉积间断,此时目的层暴露地表,最终来自蚀源区具有含铀地下水及大气降水性质的含铀含氧水形成富铀流体直接垂向渗入成矿砂体内,富铀流体会不断产生游离的 $[UO_2]^{2+}$ ,当 $[UO_2]^{2+}$ 浓度达到饱和时,伴随着冷湖地区的还原性介质(还原性介质来源于冷湖地区中的还原性气体 $CH_4$ 、 $H_2S$ 、煤线等含有机碳、硫化物—黄铁矿), $[UO_2]^{2+}$ 与之发生氧化还原反应, $U^{6+}$ 被还原成 $U^{4+}$ 以沥青铀矿等形式沉淀成矿。

## 7 结 论

(1)冷湖地区大煤沟组含矿岩石类型主要为(粉)砂质泥岩、薄层煤及细粒石英杂砂岩为主,发育明显伊利水云母化、高岭石化及绿泥石化等后生蚀变现象;研究区北东侧安南坝山古元古界达肯达坂群及赛什腾山海西期花岗岩为砂岩型铀成矿提供了丰富的铀源。

(2)冷湖地区砂岩型铀矿中铀矿物主要以沥青铀矿为主,总体粒径为 $1 \sim 3 \mu m$ ,呈不规则粒状、星

点状、“串珠状、线状”等形态赋存于黄铁矿边缘、裂隙部位或黄铁矿与方解石的接触部位。区内沥青铀矿为柴北缘地区首次揭露并发现的独立铀矿物,为柴北缘地区进一步找寻砂岩型铀矿提供了必要的理论和现实依据。

(3)含矿目的层中方解石的出露,指示了区内铀主要以碳酸铀酰络合物的形式迁移,暗示了冷湖地区铀成矿流体富含 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 等挥发分和矿化剂;其次出露的众多还原性介质(油气- $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、煤线等含有机碳、硫化物-黄铁矿)为研究区砂岩型铀成矿提供了发生氧化还原反应必需的还原剂,最终将 $\text{U}^{6+}$ 还原成 $\text{U}^{4+}$ 以沥青铀矿等形式沉淀成矿。

**致谢:**文章得到东华理工大学吴德海博士、中国科学院广州地球化学研究所杨春四博士的热心指导,在此表示诚挚的谢意。

#### 注释:

①青海煤炭地质一〇五勘探队. 2019. 青海冷湖—绿草山地区铀矿地质调查成果报告[R].1-148.

#### References

- Bai Yadong, Yang Wei, Ma Feng, Shi Zhenghao, Wang Zhaobing. 2019. Tectonic feature and oil and gas exploration direction of Lenghu 7-Nanbaxian Area on North Margin of Qaidam Basin[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 26(1): 75-79(in Chinese with English abstract).
- Cheng Y H, Wang S Y, Jin R S, Li J G, Ao C, Teng X M. 2019. Global Miocene tectonics and regional sandstone-style uranium mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 106: 238-250.
- Feng Wei, Song Xiansheng. 2018. Study on the type and prospecting direction of sandstone-type uranium deposits in the northern margin of the Qaidam basin[J]. *Western Resources*, (5):45-47(in Chinese with English abstract).
- Hu R Z, Bi X W, Zhou M F. 2008. Uranium metallogenesis in South China and its relationship to crustal extension during the Cretaceous to Tertiary[J]. *Economic Geology*, 103(3):583-598.
- Huang Guangwen, Pan Jiayong, Zhang Zhanfeng, Huang Guangnan, Liao Zhiqian, Du Houfa. 2017. Study on petrological characteristics and distribution of uranium minerals of sandstones in Mengqiguer uranium by electron microprobe, Xinjiang[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 36(2): 209-220(in Chinese with English abstract).
- 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).
- Joël Brugger, Liu W, Etschmann B, Mei Y, Sherman D M, Testemale D. 2016. A review of the coordination chemistry of hydrothermal systems, or do coordination changes make ore deposits?[J]. *Chemical Geology*, 447: 219-253.
- Jin Ruoshi, Cheng Yinhang, Li Jianguo, Sima Xianzhang, Miao Peisen, Wang Shaoyi, Ao Cong, Li Hongliang, Li Yangfeng, Zhang Tianfu. 2017. Late Mesozoic continental basin "Red and Black beds" coupling formation constraints on the sandstone uranium mineralization in northern China[J]. *Geology in China*, 44(2): 205-223(in Chinese with English abstract).
- Li Jie, Zhong Junwei, Yu Yang, Huang Xiaolong. 2013. Insights on magmatism and mineralization from micas in the Xihuashan granite, Jiangxi Province, South China[J]. *Geochimica*, 42(5): 393-404(in Chinese with English abstract).
- Liu Lin, Feng Wei, Chen Qing. 2013. Uranium forming conditions and exploration prospect in the northeast margin of Qaidamu[J]. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science)*, 36(3): 249-254(in Chinese with English abstract).
- Liu G Q, Zhao K D, Jiang S Y, Chen W. 2018. In-situ sulfur isotope and trace element analysis of pyrite from the Xiawang uranium ore deposit in South China: Implication for ore genesis[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 7: 1-17.
- Liu Wenjin, Dang Hongliang, Huang Guangnan, Huang Xianhao, Liu Binqiang, Zhang Yongan, Wang Weichao, Qi Lajia. 2019. Metallogenic Conditions and Prospecting Target of Sand Type Uranium Deposits in the Tuanyushan Area of Northern Qaidam Basin[J]. *Northwestern Geology*, 52(4): 232-240(in Chinese with English abstract).
- Lu Yaozu. 2007. Ore potentiality of in-situ leaching sandstone-type uranium deposits in the Lower and Upper Tertiary in Lenghu, Qaidam[J]. *Journal of Sichuan Geology*, 27(2): 104-106(in Chinese with English abstract).
- Song Guangyong, Gong Qingshun, Pang Hao, Xia Zhiyuan, Li Senming, Wu Jin, Tian Mingzhi, Huang Xuebing. 2020. High-precision sequence stratigraphy and sandbody architecture of the Lower Xiaganchaigou Formation in the slope area of Western Qaidam Basin[J]. *Geology in China*, 47(1):188-200(in Chinese with English abstract).
- Tao Jihua, Lin Qiuling, Li Xinghao, Cao Jun, Wang Andong, Xu Zhitian. 2020. Mineral chemical characteristics of biotites from the Jintan granites in Jiangxi Province and the implication for uranium enrichment[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 39(2): 267-282(in Chinese with English abstract).
- Wu D H, Pan J Y, Xia F, Huang G W, Lai J. 2019. The mineral chemistry of chlorites and its relationship with uranium mineralization from Huangsha uranium mining area in the Middle Nanling Range, SE China[J]. *Minerals*, 9(3):199.
- Wang Dan, Wu Bailin, Cun Xiaoni, Sun Li, Xu Zigao, Zhan Jie, Yuan

- Kang. 2015. Coexistence of multiple energy minerals in Qaidam Basin and its geological significance[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 37(3): 55–67(in Chinese with English abstract).
- Wu Dehai, Xia Fei, Pan Jiayong, Liu Guoqi, Huang Guolong, Liu Wenquan, Wu Jianyong. 2019. Characteristics of hydrothermal alteration and material migration of Mianhuakeng uranium deposit in northern Guangdong Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9): 2745–2764(in Chinese with English abstract).
- Xin Cunlin. 2007. Analysis on ore-formation conditions and character of in-situ leachable sandstone type uranium deposit in Lenghu region of Caidam basin[J]. *Journal of Northwest Normal University (Natural Science)*, 43 (2): 93–97(in Chinese with English abstract).
- Xu Wen, Bao Jianping, Zhu Jianfeng, Tie Huijuan. 2012. Correlation of crude oil from Lenghu area in northern Qaidam Basin[J]. *Global Geology*, 31(2): 357–364(in Chinese with English abstract).
- Yu Dagan, Wu Rengui, Chen Peirong. 2005. Uranium Geology[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 1–450(in Chinese).
- Zhang Jindai, Xu Gaozhong, Chen Anping, Wang Cheng. 2005. Preliminary discussion on uranium metallogenic models of China's in situ leachable sandstone type uranium deposits[J]. *Uranium Geology*, 21(3): 139–145(in Chinese with English abstract).
- Zhang Long, Chen Zhenyu, Tian Zejin, Huang Guolong. 2016. The application of electron microprobe dating method on uranium minerals in Changjiang granite, Northern Guangdong[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 35(1): 98–107(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiao. 2012. A Review on Genesis of Mengqier Uranium Deposit in the Southern Margin of Yili Basin, Xinjiang[D]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology(in Chinese with English abstract).
- Zhou Fei, Wang Bo, Li Zhexiang, Sui Guojie, Qi Wenzhen, Cui Shoukai, Ma Jinye, Cheng Dingshu. 2019. Geochemical characteristics and accumulation elements controlling the natural gas in Lenghu tectonic belts of Qaidam Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 30(10): 1496–1507(in Chinese with English abstract).
- Zhou Xuefeng, Zhang Yongshu, Yan Detian, Tang Jianrong, Wu Zhixiong, Ma Zisen, Zhou Fei, Zhao Rui, He Jie, Yu Chao. 2018. Quantitative Evaluation of sealing capacity of tertiary mudstone caprock in Lenghu Area, Qaidam Basin[J]. *Earth Science*, 43(S2): 226–233(in Chinese with English abstract).
- 布规律[J]. *岩矿测试*, 36(2): 209–220.
- 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.
- 金若时, 程银行, 李建国, 司马献章, 苗培森, 王少轶, 奥琮, 里宏亮, 李艳锋, 张天福. 2017. 中国北方晚中生代陆相盆地红-黑岩系耦合产出对砂岩型铀成矿环境的制约[J]. *中国地质*, 44(2): 205–223.
- 李洁, 钟军伟, 于洋, 黄小龙. 2013. 赣南西华山花岗岩的云母成分特征及其对岩浆演化与成矿过程的指示[J]. *地球化学*, 42(5): 393–404.
- 刘林, 冯伟, 陈擎. 2013. 柴达木东北缘铀成矿地质条件及找矿远景研究[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 36(3): 249–254.
- 刘文进, 党洪量, 黄广楠, 黄献好, 刘炳强, 张永安, 王伟超, 祁拉加. 2019. 柴达木盆地北缘团鱼山地区砂岩型铀成矿条件与找矿方向[J]. *西北地质*, 52(4): 232–240.
- 路耀祖. 2007. 柴达木盆地冷湖地区古近—新近系可地浸砂岩型铀成矿前景[J]. *四川地质学报*, 27(2): 104–106.
- 宋光永, 官清顺, 庞皓, 夏志远, 李森明, 伍劲, 田明智, 黄学兵. 2020. 柴达木盆地西部斜坡区下干柴沟组下段高精度层序地层及砂体构型分析[J]. *中国地质*, 47(1): 188–200.
- 陶继华, 林秋伶, 李鑫浩, 曹俊, 王安东, 徐志添. 2020. 江西金滩花岗岩中黑云母矿物化学特征及其对铀富集的启示[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 39(2): 267–282.
- 王丹, 吴柏林, 寸小妮, 孙莉, 徐梓皋, 詹杰, 袁康. 2015. 柴达木盆地多种能源矿产同盆地共存及其地质意义[J]. *地球科学与环境学报*, 37(3): 55–67.
- 吴德海, 夏非, 潘家永, 刘国奇, 黄国龙, 刘文泉, 吴建勇. 2019. 粤北棉花坑铀矿床热液蚀变与物质迁移研究[J]. *岩石学报*, 35(9): 2745–2764.
- 辛存林. 2007. 柴达木盆地冷湖地区可地浸砂岩型铀矿化特征及成矿条件分析[J]. *西北师范大学学报*, 43(2): 93–97.
- 徐文, 包建平, 朱建峰, 铁辉娟. 2012. 柴达木盆地北缘冷湖地区原油对比[J]. *世界地质*, 31(2): 357–364.
- 余达淦, 吴仁贵, 陈培荣. 2005. 铀资源地质学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1–450.
- 张金带, 徐高中, 陈安平, 王成. 2005. 我国可地浸砂岩型铀成矿模式初步探讨[J]. *铀矿地质*, 21(3): 139–145.
- 张龙, 陈振宇, 田泽瑾, 黄国龙. 2016. 电子探针测年方法应用于粤北长江岩体的铀矿物年龄研究[J]. *岩矿测试*, 35(1): 98–107.
- 张晓. 2012. 伊犁盆地南缘蒙古铀矿床成因研究[D]. 北京: 核工业北京地质研究院.
- 周飞, 王波, 李哲翔, 隋国杰, 祁文珍, 崔守凯, 马进业, 成定树. 2019. 柴达木盆地冷湖构造带天然气地球化学特征及成藏主控因素[J]. *天然气地球科学*, 30(10): 1496–1507.
- 周雪峰, 张永庶, 严德天, 汤建荣, 吴志雄, 马子森, 周飞, 赵睿, 何杰, 于超. 2018. 柴达木盆地冷湖地区第三系泥岩盖层封盖能力定量评价[J]. *地球科学*, 43(增刊2): 226–233.

## 附中文参考文献

- 白亚东, 杨巍, 马峰, 石正灏, 王兆兵. 2019. 柴北缘冷湖七号-南八仙地区构造特征及油气勘探方向[J]. *特种油气藏*, 26(1): 75–79.
- 冯伟, 宋宪生. 2018. 柴达木盆地北缘砂岩型铀矿类型及找矿方向研究[J]. *西部资源*, (5): 45–47.
- 黄广文, 潘家永, 张占峰, 黄广楠, 张涛, 廖志权, 杜后发. 2017. 应用电子探针研究蒙古铀矿床含矿砂岩岩石学特征及铀矿物分