

柴北缘冷湖砂岩型铀矿铀矿物赋存特征及成因机制

张超¹, 王善博¹, 俞初安¹, 程银行¹, 奥琮¹, 滕雪明¹, 冯平², 于航²

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 四川省核工业地质局二八三大队, 四川达州 635000)

摘要: 冷湖铀矿床是近年来在柴达木盆地北部新发现的具有工业价值的砂岩型铀矿床, 为了研究该地区铀矿物的类型、成分特征、赋存形式及铀成矿作用, 本文在野外地质调查的基础上, 对下侏罗统小煤沟组相关蚀变矿物进行了矿相学、电子探针、背散射电子成像分析。研究发现, 冷湖小煤沟组矿石主要包括杂砂岩型及碳质砂岩型两种, 整体发育后生蚀变。铀矿物主要为铀石与沥青铀矿, 含少量硒铅矿, 与黏土矿物、有机质及黄铁矿密切共生, 呈微细柱状、似胶状或不规则锯齿状产于石英、长石等蚀变岩屑矿物颗粒之间或蚀变矿物的解理缝隙中。后期多次流体作用携带的 U^{6+} 在 Fe^{2+} 提供的还原环境中发生还原-沉淀-吸附铀成矿作用。综合铀矿物存在高 Y 与低 Y 两种类型、蚀变序列及环境特征分析, 推测铀矿物中的铀为原铀矿物残留, 经不含 Y 元素或 Y 元素含量很低流体的多期改造而富集成矿。

关键词: 砂岩型铀矿; 电子探针; 小煤沟组; 冷湖; 柴北缘

中图分类号: P619.14

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)01-0047-14

Genetic mechanism and occurrence characteristics of uranium minerals in the Lenghu sandstone-type uranium deposit, northern Qaidam Basin

ZHANG Chao¹, WANG Shan-bo¹, YU Reng-an¹, CHENG Yin-hang¹, AO Cong¹, TENG Xue-ming¹,
FENG Ping² and YU Hang²

(1. Tianjin Center of Geological Survey, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 2. The Nuclear Industry Geological Survey 283 Brigade in Sichuan Province, Dazhou 635000, China)

Abstract: Lenghu uranium deposit is a newly discovered in recent years and have industrial value sandstone-type uranium deposit in the northern part of the Qaidam Basin. In order to study the classification, occurrence and mineralization of uranium minerals in this area, this paper conducted the mineralogical, electron probe, backscatter electron imaging analysis of the altered minerals in Xiaomeigou Formation of Lower Jurassic on the basis of field investigation. These studies found that the ore types of Xiaomeigou Formation in Lenghu are mainly composed of complex sandstone-type and carbonaceous sandstone-type, which have occurred overall epigenetic alteration. It is found that the main uranium minerals are uranite, pitchblende and minor of lead selenite, which is closely associated with clay minerals, organic matter, and pyrite, and lie in the intergranular space of quartz, feldspar and other altered lithic mineral grains or in cleavage joints of altered minerals occurs in fine columnar, gel-like or irregular sawtooth shape. In late multiple fluid processes, U^{6+} occurred reduction-precipitation-adsorption uranium mineralization in the reduction environment provided by Fe^{2+} . Based on the analysis of high Y and low Y-types uranium minerals, alteration sequence and environmental characteristics, it is inferred that uranium in uranium minerals was

收稿日期: 2021-03-23; 接受日期: 2021-10-16; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190119); 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-02); 青海省清洁能源矿产专项资金勘查项目(2021074006ky006)

作者简介: 张超(1987-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事沉积地球化学、矿床学研究及矿产地质调查工作, E-mail: 402709002@qq.com。

the residual of original uranium minerals, which is enriched and mineralized by multi-stage transformation of fluids with no Y element or very low Y element.

Key words: sandstone-type uranium deposit; electron probe; Xiaomeigou Formation; Lenghu; northern Qaidam Basin
Fund support: Geological Survey Program from China Geological Survey (DD20190119); Funding Project of Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources in Northern Qinghai-Tibet Plateau (2019-KY-02); Qinghai Province Clean Energy Mineral Exploration Project (2021074006ky006)

砂岩型铀矿因其规模大、埋藏浅、开采成本相对较低等特点成为近年来具有重要经济及工业价值的铀矿类型(陈祖伊, 2002; 陈戴生等, 2003; 张金带等, 2008; 焦养泉等, 2015; 冯晓曦等, 2019; 魏佳林等, 2019; 肖志斌等, 2020; 张超等, 2020a)。伴随着开采技术的不断革新及先进找矿理论的提出, 在我国内蒙古及新疆等地陆续发现一批大型、超大型砂岩型铀矿床(Feng *et al.*, 2017; 金若时等, 2017; Han *et al.*, 2018; 程银行等, 2020; 刘波等, 2020; 俞初安等, 2020; 张超等, 2020b, 2021a; 司庆红等, 2021; 汤超等, 2021; 王善博等, 2021)。前人对我国西北砂岩型铀矿铀赋存特征进行了初步研究(权志高等, 2012; Yang *et al.*, 2015; 程银行等, 2020; Wang *et al.*, 2021), 认为伊犁盆地蒙古古尔铀矿主要为沥青铀矿, 铀石较少, 矿物主要赋存在长石或石英等颗粒边缘, 与有机质及黄铁矿等关系密切(张鑫等, 2015; 丁波等, 2019); 鄂尔多斯盆地东胜地区铀矿物主要为水硅铀矿和铀石, 沥青铀矿较少(杨晓勇等, 2009; 易超等, 2018); 巴音戈壁、二连、吐哈盆地铀矿物以少量铀石以及部分沥青铀矿赋存于其他矿物颗粒边缘(陈路路等, 2017)。

柴达木盆地是一个典型的多能源中、新生代沉积盆地, 蕴含丰富的钾盐、煤、石油、天然气、芒硝及铀等多种矿产资源。前人认为侏罗系在柴北缘边缘造山带及沉降带均有分布, 下侏罗统形成于伸展环境, 上侏罗统以粗碎屑沉积为主, 中下侏罗统以湖相含煤岩系为主, 柴西北缘花土沟地区砂岩孔隙度及渗透系数较大, 其中狮子沟组因富含黄铁矿等还原性物质, 具有砂岩型铀矿成矿地质条件。

在柴达木盆地北缘中下侏罗统含煤碎屑岩建造中发现一批砂岩型铀矿点及异常点(陈贵华, 2001; 刘林, 2008; 权志高等, 2014), 但铀矿找矿工作至今未取得重大突破, 其关键地质问题是铀矿物赋存特征及铀成矿作用。笔者在前人研究基础上, 通过对冷湖地区铀矿区进行野外钻孔岩心编录、系统采样等工作, 选取典型铀矿物作为主要研究对象, 通

过矿相学、电子探针及背散射电子成像等工作, 对该地区铀矿物类型、成分特征及赋存形式进行研究, 以期查明不同铀矿物存在形式、与其他矿物之间的关系、铀矿物形成期次及成矿环境, 进而分析铀成矿机制, 为该地区进一步铀矿找矿提供地质依据。

1 区域地质概况

柴达木盆地位于青藏高原东北缘(图1a), 在印支期由于特提斯洋壳向古欧亚大陆的不断俯冲, 导致俯冲带后的走滑拉张, 后期受喜山期构造运动影响形成大型内陆断拗盆地(黄汉纯等, 1989; 刘永乐等, 2018; 陈敏等, 2020; 庄玉军等, 2020; 张超等, 2021b)。柴北缘铀矿带主要分布于前寒武纪及中生代地层, 砂岩型铀矿异常点主要分布于冷湖、德令哈、绿草山及北大滩地区(傅成铭, 2009), 其中冷湖地区位于柴北缘西北部, 冷湖镇西北约10 km处。中生代以来经历南祁连和阿尔金多期性质不同的构造运动, 形成复杂断裂系统, 同时区内发育一系列断褶构造, 控制区内侏罗系及白垩系分布。

区内地层从老到新依次为下元古界达肯达坂群(Pt₁dk)、下侏罗统小煤沟组(J₁x)、古新统-始新统路乐河组(E₁₋₂l)、中新统上干柴沟组(N₁g)、上新统油砂山组(N₂y)、更新统洪积物(Q₃^{pl})及全新世盐湖化学堆积物(Q₄^{2ch}), 其中下元古界达肯达坂群(Pt₁dk)仅在小孤山和小红山附近出露, 岩性主要由石英云母片岩及花岗岩片麻岩组成; 下侏罗统小煤沟组(J₁x)为区域内主要含铀层位, 总体走向呈北西-南东向, 倾向南西, 条带状展布, 主要为浅灰、绿黄、灰白色碎屑岩, 局部夹灰黑色碳质泥岩、泥质粉砂岩和薄煤层, 东部埋藏较浅, 西部较深; 古新统-始新统路乐河组(E₁₋₂l)以棕红色粗碎屑岩为主, 由砂岩、泥岩及砾岩混杂堆积而成, 发育有灰色碳质泥岩, 与下伏小煤沟组呈不整合接触, 为生油层; 中新统上干柴沟组(N₁g)以灰绿、黄绿色厚层状砂岩为主, 夹紫红、棕灰色泥灰岩及泥质粉砂岩, 其中泥

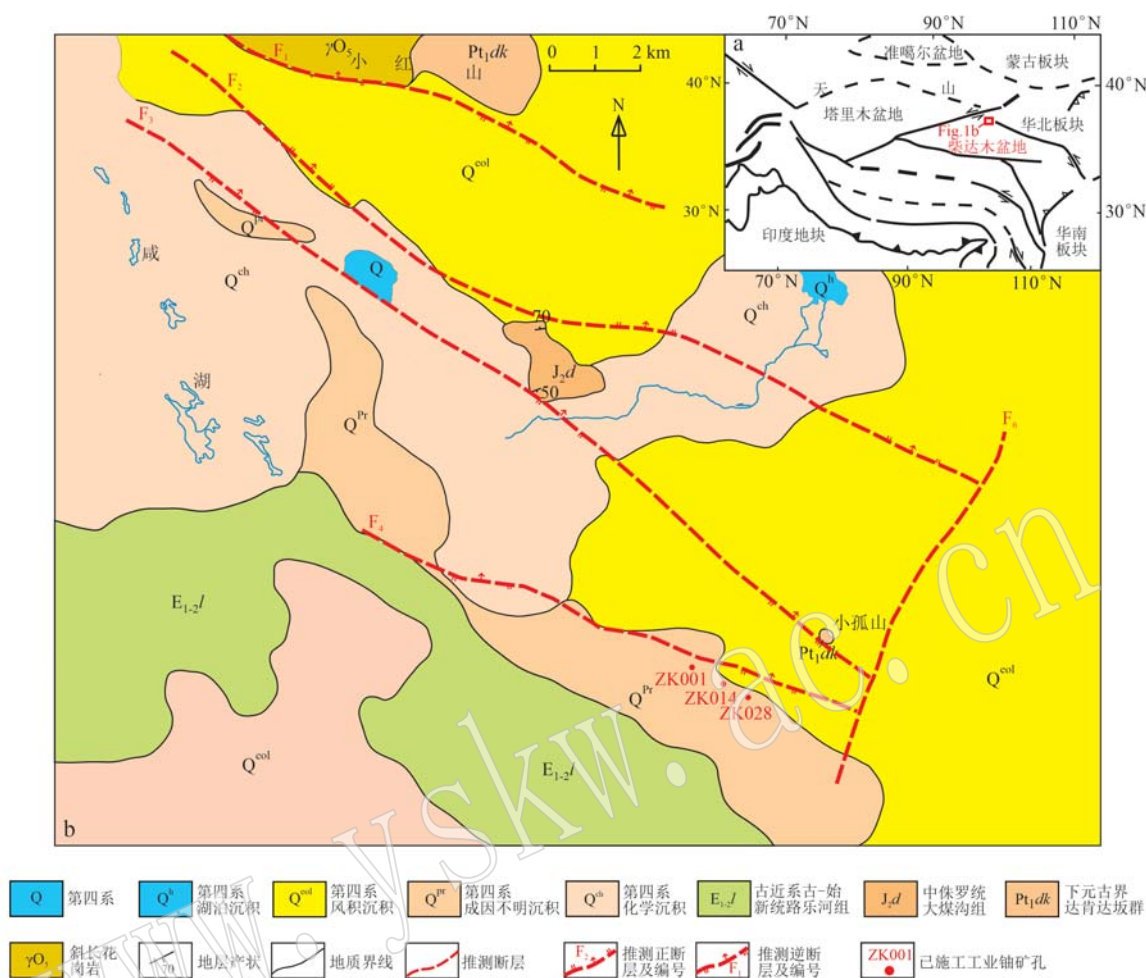


图 1 青藏高原及邻区大地构造简图(a, 据张超等, 2020a)和冷湖地区地质简图(b)

Fig. 1 Simplified geological map of Tibetan Plateau (a, after Zhang Chao *et al.*, 2020a) and Lenghu area (b)

灰岩夹层较稳定；上新统油砂山组(N_2y)上部为灰色细粒长石石英砂岩与砾岩互层，中部为灰白色长石石英砂岩及泥质粉砂岩夹少量砾岩，自下而上碎屑物由细变粗，与下伏上干柴沟组呈整合接触；区域内第四系(Q)发育较广泛，主要由盐湖沼泽及冲积砂砾岩堆积而成。其中下侏罗统较发育，局部受到褶皱和断裂构造破坏，其西山组泥岩是良好的烃源岩，上部小煤沟组砂岩为铀矿物良好的储集层。

冷湖地区在中生代晚期发生大规模隆升构造运动，侏罗系遭到剥蚀，断裂发育，致使对其含铀岩系研究的困难程度增大(付锁堂, 2009)。研究区构造主体方向为NW-NWW，发育 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 及 F_6 五条断裂，本文研究的工业矿体分布在 F_4 断裂南部(图1b)， F_1 位于小红山与第四系风积沉积之间，走向北西，倾向北东，为推测逆断层； F_2 为呼北断裂、 F_3 为呼南断裂，两者近乎平行分布； F_4 为 F_5 断裂

的分支， F_2 、 F_3 、 F_4 三个断裂走向、倾向与 F_1 断裂几乎一致，其中 F_2 为正断层， F_3 、 F_4 为逆断层， F_6 断裂走向NNE，与 F_2 、 F_3 、 F_4 相交。

2 含铀矿目的层特征

按照产出地质背景及成因机制，冷湖铀矿床属于层间氧化带型中的古层间氧化带亚型。喜山期构造运动对古层间氧化带进行了强烈改造。冷湖铀矿化位于褶皱翼部，铀矿体及层间氧化带受褶皱和构造双重控制，属于褶-断保存型(权志高等, 2012)。冷湖地区下侏罗统由于受气候和构造影响，小煤沟组植物化石丰富，发育一套湖泊-三角洲-河流相巨厚灰色含煤碎屑沉积，岩性主要为灰黑色富含有机质煤及碎屑沉积的中细粒石英岩屑砂岩、砂质泥岩、页岩等，单层砂体发育且厚度不大，具有泥-砂-泥

互层沉积结构,具有形成铀矿环境基础,有利于含铀含氧水大量富集形成层间氧化带,所以小煤沟组是该区砂岩型铀矿找矿主要目的层之一。

对冷湖铀矿床3个工业铀矿孔(ZK001、ZK014、ZK028)进行了岩相学及矿物分析,其中ZK001见多层铀异常,产于灰黑色碳质砂岩、灰色粗砂岩和煤层中;ZK014见2层铀异常,产于灰黑色碳质砂岩、

灰色含砾中砂岩中,岩石疏松,透水性好,顶板为灰黑色含砾中砂岩,岩石致密,渗透性差;底板为绿灰色中砂岩,岩石弱固结,渗透性差;ZK028见1层铀异常,发育在灰黑色碳质砂岩中,顶板为红褐色中砂岩,岩石致密;底板为灰色中砂岩,岩石弱固结;3个钻孔铀异常均产于下侏罗统小煤沟组中(图2)。

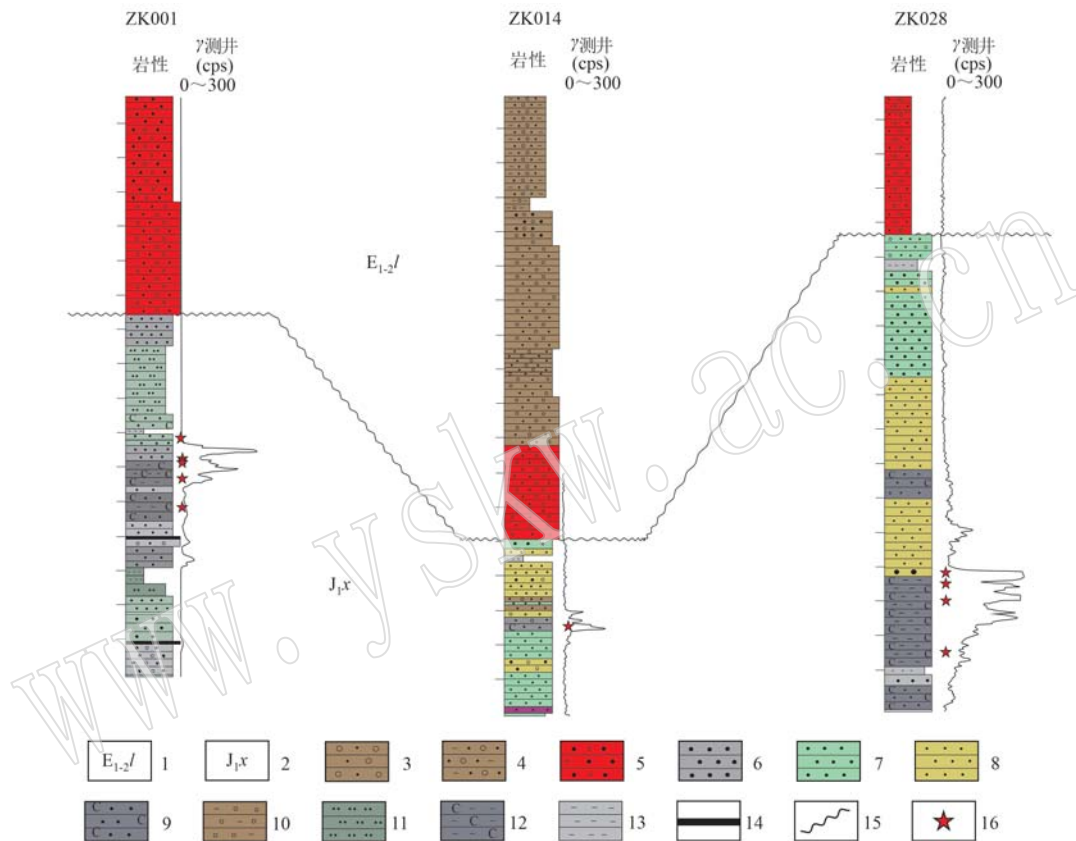


图2 冷湖铀矿床钻孔连井剖面图

Fig. 2 Profile of bore-well of uranium deposit in Lenghu area

- 1—古近系路乐河组; 2—下侏罗统小煤沟组; 3—砂砾岩; 4—含泥砾砂岩; 5—含砾粗砂岩; 6—粗砂岩; 7—中砂岩; 8—细砂岩;
9—碳质砂岩; 10—泥质砾岩; 11—粉砂岩; 12—炭屑泥岩; 13—泥岩; 14—煤层; 15—不整合界线; 16—采样位置
1—Paleogene Lulehe Formation; 2—Jurassic Xiaomeigou Formation; 3—glutenite; 4—sandstone contain mudstone and conglomerate; 5—gravelly grit;
6—coarse sandstone; 7—medium sandstone; 8—fine sandstone; 9—carbonaceous sandstone; 10—argillaceous conglomerate; 11—siltstone;
12—carbonaceous mudstone; 13—mudstone; 14—coal seam; 15—unconformity boundary; 16—sampling position

冷湖地区小煤沟组矿石类型按产出的主岩可分为杂砂岩型及碳质砂岩型两种矿石类型: ① 杂砂岩型矿石, 主要由陆源碎屑和填隙物组成, 中细粒杂砂状结构, 块状构造; 主要为基底式胶结; 岩石碎屑中的部分长石发生黏土化, 黑云母发生不同程度的水黑云母化、蛭石化(图3a、3b); ② 碳质砂岩型矿石, 主要由碎屑物、碳质和泥质组成, 含碳质杂砂状结构, 块状构造, 胶结物为粘土矿物。炭屑呈细

纹层状产出, 局部与黑云母、方解石细脉连生在一起, 受后期挤压及拉伸作用, 炭屑及与炭屑相关矿物整体变形, 炭屑呈长条状, 内部形成一系列平行排列炭屑胞腔, 胞腔内常有黄铁矿充填(图3c、3d)。区内的矿化蚀变有碳酸盐化、黄铁矿化等。碳酸盐化蚀变作用在下侏罗统小煤沟组上部发育, 尤其是含矿层灰黑色杂砂岩中较为常见。黄铁矿化蚀变作用在下侏罗统小煤沟组上部普遍发育, 特别是矿石

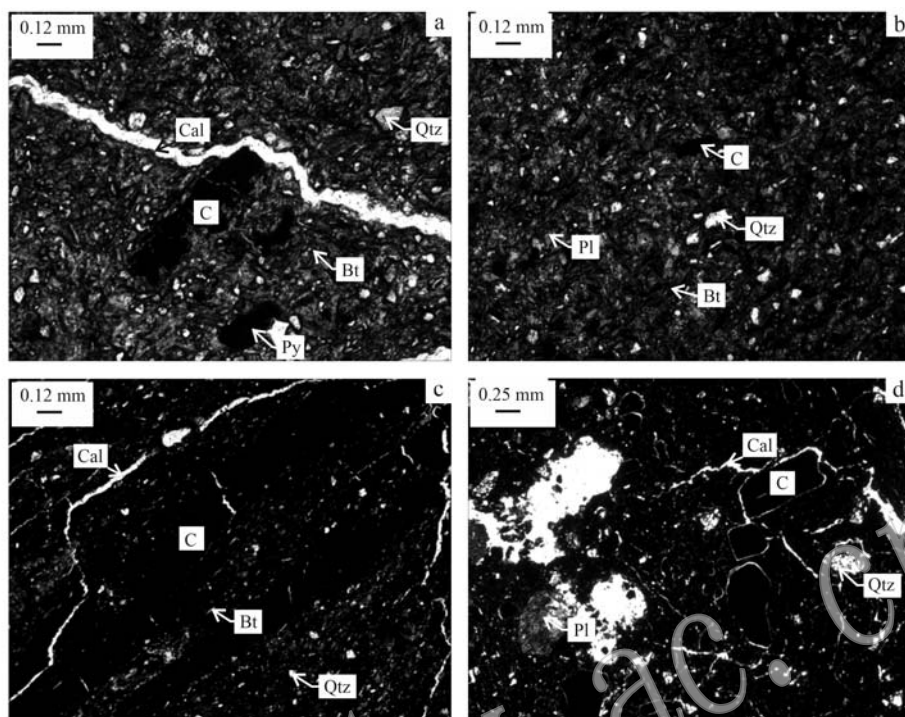


图 3 冷湖地区小煤沟组含矿样品正交偏光显微照片

Fig. 3 Microphotographs under crossed nicols of ore-bearing samples of Xiaomeigou Formation in Lenghu area
 a—含粗粒质中细粒岩屑杂砂岩, ZK028(294.4 m); b—细粒岩屑杂砂岩, ZK001(305.0 m); c—碳质粉砂质泥岩, ZK028(315.1 m);
 d—含碳质不等粒砂质泥岩, ZK001(308.6 m); Cal—方解石; Qtz—石英; Pl—斜长石; Bt—黑云母; C—炭屑; Py—黄铁矿
 a—coarse-grained fine-grained lithic sandstones, ZK028(294.4 m); b—fine-grained lithic miscellaneous sandstone, ZK001(305.0 m);
 c—carbonaceous silty mudstone, ZK028(315.1 m); d—carbonaceous unequal sandy mudstone, ZK001(308.6 m); Cal—calcite; Qtz—quartz;
 Pl—plagioclase; Bt—biotite; C—carbo; Py—pyrite

中均见到黄铁矿。

结合冷湖三号地区钻孔岩心取样分析、测井资料和地震资料的综合研究,对 3 个剖面的岩石学特征、沉积构造特征等典型相标志分析,认为工作区下侏罗统小煤沟组沉积岩系属于河流-三角洲-湖泊相(表 1)。

表 1 冷湖地区小煤沟组沉积相、亚相和微相划分
 Table 1 Division of sedimentary facies, sub-facies and micro-facies of Xiaomeigou Formation in Lenghu area

沉积体系(相)	亚相	微相
辫状河	河道	辫状河道河床滞留沉积 心滩
	泛滥平原	河漫滩
辫状河三角洲	辫状河三角洲平原	分流河道、河道间、河道间湾与河间沼泽
	辫状河三角洲前缘	水下分支流河道、水下分流间湾
	辫状河前三角洲	辫状河前三角洲泥
湖泊	滨湖	沿岸滩坝、滩坝间、砂坪
	浅湖	近岸滩坝、泥坪

下侏罗统小煤沟组总体上为一套河流沼泽相含煤粗碎屑沉积。地震勘探结果表明冷湖三号地区下侏罗统小煤沟组沉积时期主要发育三凸两凹的古构造格局,区内发育北东向、北西向及南东向三大物源剥蚀区,沉积沉降中心主要位于盆地北中缘(图 4)。研究区 3 个钻孔中砂岩砂体的自然伽玛均呈明显的箱形、钟形、漏斗形等特征,且锯齿化不明显(图 2),反映砂体杂基含量低的特点,具有河道心滩、辫状河河漫滩微相特征。

小煤沟组底部属低位体系域的辫状河、辫状河三角洲、滨湖、浅湖相沉积;中部为湖侵体系域的半深湖-深湖相沉积;顶部为辫状河、辫状河三角洲、滨湖、浅湖相沉积,以灰白色砾岩为主,岩石搬运距离较短,水动力条件较强,颗粒磨圆度以次棱角状-棱角状为主、分选中等,颗粒支撑,填隙物含量少。

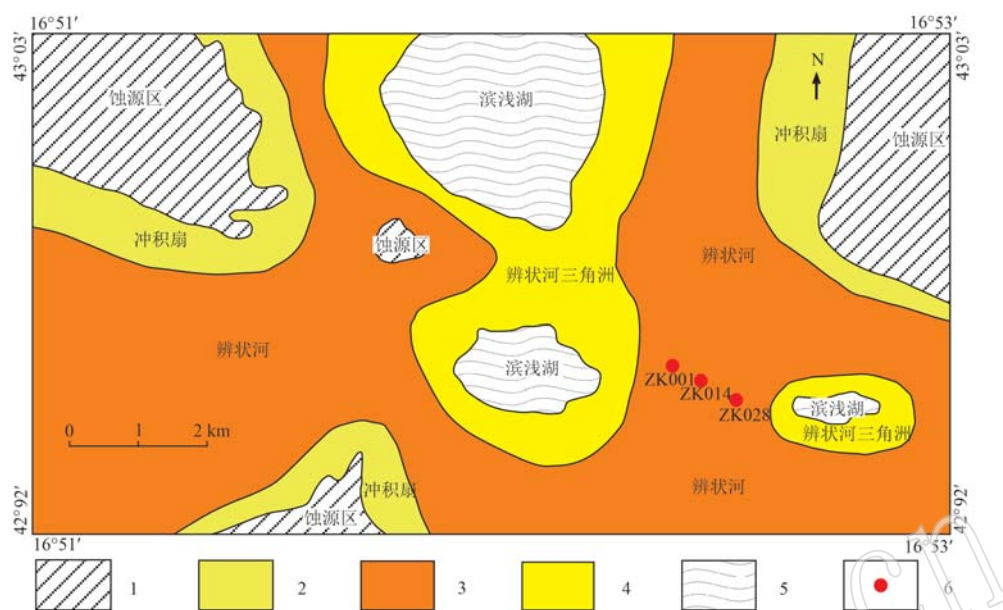


图4 冷湖地区早侏罗世小煤沟期沉积相展布图

Fig. 4 Distribution map of sedimentary facies of Early Jurassic Xiaomeigou period in Lenghu area

1—蚀源区；2—冲积扇；3—辫状河；4—辫状河三角洲；5—滨浅湖；6—钻孔

1—erosion source; 2—alluvial fan; 3—discernable river; 4—discernable river delta; 5—shallow lake; 6—bore hole

3 研究手段及方法

对3个典型工业钻孔进行全孔地质编录,详细观察3个钻孔岩相学和矿物蚀变差异,利用岩心 $\gamma+\beta$ 编录仪对岩心进行编录并确定铀含矿层位,对典型含矿段进行样品采集(表2),根据典型矿物共生组合特征磨制电子探针片,利用偏光显微镜对探针片进行观察,利用电子显微镜对不同类型含铀矿物

进行背散射图像分析,分别对3种铀矿物进行微区化学成分测定,研究不同铀矿物的类型、赋存形式及其与其他矿物之间的共生组合关系。

微区化学成分测定测试仪器为JXA-8100,方法为波谱分析,用ZAF修正,束斑直径 $1\mu\text{m}$,测试U、Si、Th、Ti、Fe、P等19种元素,测试结果见表3,测试单位为核工业北京地质研究院。

4 主要铀矿物类型及赋存形式

在镜下观察电子探针片铀矿物特征的基础上,结合电子探针数据发现冷湖铀矿床铀矿物以铀石为主,沥青铀矿次之,铀硒铅矿含量最少(表3)。

4.1 铀石特征

铀石是四价铀的硅酸盐,是以 U^{4+} 和 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 为主要成分的化合物。样品中 UO_2 含量为39.85%~80.76%, SiO_2 含量为4.27%~19.41%, FeO 含量为0.10%~8.50%, SO_3 含量为0.03%~16.90%, CaO 含量为1.13%~3.94%, Al_2O_3 含量为0.08%~3.68%,部分矿石中 Y_2O_3 含量为0.35%~10.35%,其次为 K_2O 、 MgO 、 TiO_2 、 MnO 等,含量均小于1%,测点UXS-2-3、UXS-7-2及UXS-7-5铀含量偏低,应该是含有 FeO 、 Y_2O_3 及 SO_3 等强氧化剂成分。因铀石

表2 冷湖铀矿床下侏罗统小煤沟组样品特征及采样位置
Table 2 Sample characteristics and sampling location from Xiaomeigou Formation of Lower Jurassic in Lenghu uranium deposit

序号	样号	岩性	钻孔	采样深度/m
1	UXS-1	浅灰色细砂岩		304.8
2	UXS-2	灰黑色碳质泥岩	ZK001	308.4
3	UXS-3	灰黑色碳质泥岩		313.3
4	UXS-4	灰黑色碳质泥岩		322.7
5	UXS-5	黄褐色粗砂岩		291.9
6	UXS-6	灰黑色碳质泥岩	ZK028	299.8
7	UXS-7	灰黑色碳质泥岩	ZK014	434.8
8	GB-28	灰黑色碳质泥岩	ZK028	294.4
9	GB-30	灰黑色碳质泥岩		315.1
10	GB-35	灰黑色碳质泥岩		ZK001

$w_B/\%$

表 3 冷湖铀矿床铀矿物电子探针分析结果
Table 3 Results of electron probe analysis of uranium mineral from Lenghu uranium deposit

样号	钻孔	UO ₂	SiO ₂	ThO ₂	TiO ₂	FeO	Na ₂ O	As ₂ O ₅	MgO	MnO	Y ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	NiO	K ₂ O	V ₂ O ₅	CaO	SO ₃	ZrO ₂	PbO	P ₂ O ₅	SeO ₂	总量	铀矿物	
UXS-2-1		65.53	9.80	0.00	0.00	2.37	1.13	0.05	0.32	0.08	0.00	1.40	0.00	0.34	0.00	2.14	0.53	0.00	0.00	0.00	0.47		84.16	
UXS-2-2		66.48	7.97	0.00	0.30	2.34	0.56	0.04	0.18	0.24	0.00	0.70	0.00	0.22	0.00	1.33	1.12	0.00	0.00	0.00	0.15		81.63	
UXS-2-3	ZK001	39.85	13.53	0.00	0.00	8.50	0.28	0.00	0.34	0.00	6.00	3.68	0.00	0.14	0.00	2.73	16.90	0.00	0.00	0.00	5.09		97.04	
UXS-3-3		57.73	9.35	0.00	0.28	2.59	0.60	0.00	0.06	0.00	6.04	0.64	0.00	0.21	0.00	3.94	3.41	0.00	0.00	0.00	5.38		90.23	
UXS-3-4		80.76	6.24	0.00	0.21	0.91	0.34	0.10	0.00	0.17	0.35	0.42	0.00	0.18	0.09	1.29	0.05	0.00	0.00	0.00	0.20		91.31	
UXS-6-1		66.33	4.77	0.00	0.18	3.45	0.51	0.00	0.12	0.08	4.54	0.08	0.12	0.19	0.00	2.35	5.16	0.00	0.00	0.00	4.28		92.16	
UXS-6-2	ZK028	80.68	4.49	0.00	0.15	1.01	0.51	0.00	0.08	0.15	0.98	0.41	0.00	0.26	0.00	2.66	0.19	0.00	0.00	0.00	0.96		92.53	铀石
UXS-6-3		55.91	7.78	0.00	0.00	0.29	0.04	0.00	0.11	0.00	10.35	0.16	0.00	0.10	0.00	3.62	0.26	0.00	0.00	0.00	7.40		86.02	
UXS-6-5		74.66	4.27	0.00	0.79	0.99	0.33	0.00	0.05	0.24	0.41	0.15	0.00	0.14	0.00	1.13	6.13	0.00	0.00	0.00	0.19		89.48	
UXS-7-1		56.52	14.48	0.07	0.41	1.10	0.25	0.00	0.04	0.00	8.36	0.43	0.15	0.13	0.00	2.37	0.14	0.00	0.00	0.19	2.84		86.48	
UXS-7-2		42.89	19.41	0.00	0.18	1.47	0.97	0.00	0.58	0.08	8.15	2.18	0.00	0.18	0.11	3.04	0.38	0.00	0.00	0.00	3.16		82.78	
UXS-7-3	ZK014	55.87	19.06	0.00	0.00	0.24	0.96	0.00	0.08	0.07	7.65	0.67	0.00	0.18	0.16	2.36	0.13	0.00	0.00	0.14	2.22		89.79	
UXS-7-5		49.06	16.64	0.00	0.21	0.49	0.83	0.00	0.10	0.00	9.25	0.81	0.00	0.21	0.00	2.29	0.11	0.12	0.07	0.07	3.39		83.58	
UXS-7-6		58.97	17.65	0.00	0.26	0.38	1.03	0.00	0.10	0.00	5.66	0.65	0.00	0.17	0.12	2.36	0.03	0.00	0.00	0.05	1.63		89.06	
UXS-1-1		79.57	0.68	4.52	0.00	0.25	0.84	0.00	0.09	0.00	0.97	0.08	0.18	0.16	0.00	0.57	0.09	0.00	0.00	8.63	0.06		96.69	
UXS-3-1		48.33	1.91	4.68	0.00	2.06	0.18	0.00	0.09	0.00	0.80	0.74	0.00	0.17	0.00	0.67	0.14	0.17	0.17	6.94	0.00		66.88	
UXS-3-2	ZK001	78.41	1.70	3.49	0.00	0.61	0.23	0.00	0.08	0.10	0.42	0.13	0.00	0.27	0.00	0.22	0.14	0.13	0.13	4.17	0.00		90.10	
UXS-4-2		72.83	0.49	2.57	0.12	0.35	0.10	0.00	0.04	0.00	0.36	0.05	0.00	0.23	0.00	0.09	0.06	0.10	0.10	3.74	0.07		81.20	沥青
UXS-4-1		69.65	1.81	0.00	0.27	0.73	0.57	0.00	0.25	0.00	0.00	1.03	0.14	2.69	0.00	2.35	0.13	0.00	0.00	0.36	10.37		90.35	铀矿
UXS-5-3	ZK028	61.56	9.38	9.86	0.00	3.76	1.06	0.00	0.30	0.00	0.00	1.19	0.00	0.64	0.00	0.82	0.12	0.00	0.11	0.11	0.34		89.14	
UXS-6-4		60.75	2.83	0.00	0.97	1.37	0.57	0.00	0.06	0.12	0.57	0.05	0.00	0.18	0.00	1.96	3.17	0.00	0.00	0.00	0.51		73.11	
UXS-7-4	ZK014	84.82	1.30	0.00	0.00	0.32	0.13	0.92	0.10	0.00	0.12	0.02	0.11	0.17	0.00	3.90	0.00	0.97	0.00	0.00	1.46		94.34	
UXS-5-1		15.03	2.55	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.08	0.65	0.08	0.00	0.06	0.00	0.58	1.12	0.05	50.79	0.81	22.04		93.92	
UXS-5-2		23.08	3.93	0.00	0.00	0.19	0.14	0.00	0.00	0.00	1.26	0.11	0.00	0.05	0.00	1.07	1.25	0.14	40.43	1.10	18.14		90.89	含铀
UXS-5-4		16.86	2.54	0.00	0.15	0.21	0.10	0.00	0.05	0.00	0.98	0.06	0.00	0.06	0.00	0.86	1.39	0.05	41.61	1.20	19.45		85.57	硒铅矿
UXS-5-5		16.11	2.49	0.00	0.26	0.24	0.10	0.00	0.00	0.00	1.26	0.10	0.00	0.06	0.17	0.91	1.36	0.08	48.24	1.00	17.90		90.28	

注：因各铀矿物中含水，所以铀矿物彼此之间总量数据差异很大且总量不足 100%。

中含水, 所以其化学总量为 81.63%~97.04% (表 3)。背散射显示铀石主要赋存于矿物颗粒孔隙中, 无明显晶形, 粒径一般介于 0.01~0.05 mm 之间, 大部分呈似胶状、网脉状或不规则细脉状围绕草莓

状黄铁矿产出或充填于黄铁矿裂隙中, 少部分呈不规则粒状、微细柱状围绕碎屑石英、岩屑等矿物颗粒产出, 是冷湖地区含矿砂岩铀矿物的主要产出形式 (图 5a、5b)。

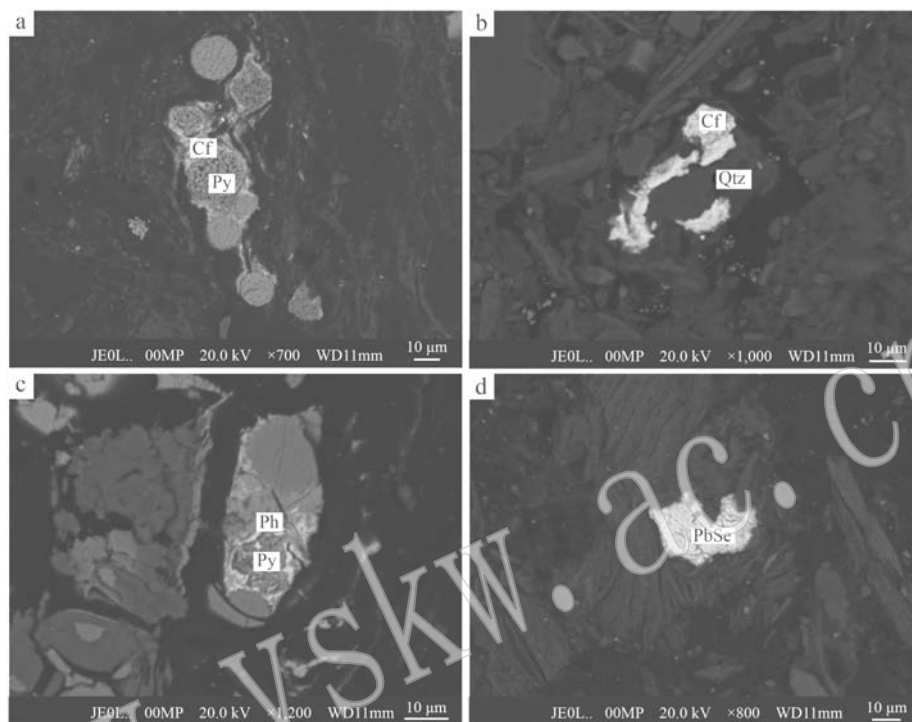


图 5 冷湖铀矿床铀矿物赋存形式的背散射图像

Fig. 5 BSE images of occurrence forms of uranium minerals of Lenghu deposit

a—铀石 (Cf) 围绕草莓状黄铁矿 (Py) 产出; b—铀石 (Cf) 围绕石英 (Qtz) 产出; c—沥青铀矿 (Ph) 围绕黄铁矿 (Py) 产出;
d—含铀硒铅矿 (PbSe); Ph—沥青铀矿; Cf—铀石; Py—黄铁矿; Qtz—石英; PbSe—硒铅矿

a—uraninite occurs around strawberry-shaped pyrite; b—uraninite occurs around quartz; c—pitchblende occurs around strawberry-shaped pyrite;
d—selenite which contain selenite; Ph—pitchblende; Cf—uranite; Py—pyrite; Qtz—quartz; PbSe—selenite

为了较好地分析冷湖铀矿床铀石的化学成分特征, 将我国北方典型砂岩型铀矿床铀石与冷湖铀矿床铀石主要元素含量进行了对比 (表 4、图 6), 结果显示, 冷湖铀矿床铀石 P、Y 元素含量分为低磷低钇和高磷高钇两种类型, 与鄂尔多斯盆地纳岭沟地区 (陈路路等, 2017) 及伊犁盆地蒙其古尔地区 (黄广文等, 2017) 铀矿床铀石具有相似的化学成分特征, 其中冷湖铀矿床钍的氧化物含量非常低, 推测其钍铁矿等矿物可能受到后期流体强烈的蚀变改造作用。

4.2 沥青铀矿特征

沥青铀矿是 U^{4+} 和 U^{6+} 以不同比例组成的简单氧化物。样品中 UO_2 含量一般为 48.33%~84.82%, SiO_2 含量为 0.49%~9.38%, FeO 含量为 0.25%~3.76%, CaO 含量为 0.09%~3.90%, K_2O 含量为

0.16%~2.69%, Al_2O_3 含量为 0.02%~1.19%, 部分矿石中 ThO_2 含量为 2.57%~9.86%, PbO 含量为 0.11%~8.63%, MgO 、 TiO_2 、 MnO 、 Y_2O_3 等含量均小于 1% (表 3)。沥青铀矿呈不规则锯齿状围绕黄铁矿产出, 与铀石相比颜色更亮, 为原铀矿物的蚀变残留, 无明显晶形, 粒径一般介于 0.005~0.01 mm 之间 (图 5c)。

4.3 硒铅矿特征

硒铅矿化学式为 $PbSe$, 伴随着铀矿物产出。样品中主要成分 UO_2 含量为 15.03%~23.08%, PbO 含量为 40.43%~50.79%, SeO_2 含量为 17.90%~22.04%, SiO_2 含量为 2.49%~3.93%, P_2O_5 含量为 0.81%~1.20%, SO_3 含量为 1.12%~1.39%, Na_2O 、 K_2O 、 FeO 、 Al_2O_3 等成分含量均小于 1% (表 3)。硒

铅矿呈不规则集合体产出, 局部较破碎, 可能因破碎部位易吸附 U 或类质同像而富集铀矿物, 无明显晶形, 集合体粒径介于 0.02~0.04 mm 之间, 在冷湖地区含矿砂岩铀矿物中含量较少(图 5d)。

表 4 我国北方典型砂岩型铀矿床铀石主要元素含量统计表

Table 4 Major elements compositions of the uranite from typical sandstone-hosted uranium deposits in northern China

矿区	分类	UO ₂	SiO ₂	P ₂ O ₅	Y ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	FeO	数据来源
柴达木盆地冷湖地区	低磷低钇	73.62	6.55	0.39	0.35	1.71	0.29	1.52	本文
	高磷高钇	53.68	13.63	3.93	7.33	2.78	0.17	1.95	
	平均值	63.65	10.09	2.16	3.84	2.25	0.23	1.73	
松辽盆地白兴吐地区	低磷	58.71	11.05	0.12	—	1.25	1.21	4.44	吴仁贵等, 2011
	高磷	48.98	10.64	6.73	—	4.10	0.57	6.80	
	平均值	53.84	10.85	3.43	—	2.67	0.89	5.62	
鄂尔多斯盆地杭锦旗地区	低钇	72.45	12.09	0.22	0.00	2.52	0.09	0.17	Zhang <i>et al.</i> , 2017
	高钇	59.00	15.75	0.29	5.43	2.21	0.09	2.04	
	平均值	65.72	13.92	0.26	2.71	2.37	0.09	1.11	
鄂尔多斯盆地东胜地区	低磷	68.37	17.11	0.42	0.23	1.33	0.21	0.80	向伟东等, 2006
	高磷	59.20	15.69	1.54	0.34	2.37	0.83	0.42	
	平均值	63.78	16.40	0.98	0.29	1.85	0.52	0.61	
鄂尔多斯盆地纳岭沟地区	低磷低钇	68.35	18.77	0.51	0.84	2.30	0.80	0.32	陈路路等, 2017
	高磷高钇	58.51	18.77	1.04	5.35	1.77	0.52	0.62	
	平均值	63.43	18.77	0.77	3.09	2.04	0.66	0.47	
鄂尔多斯盆地大营地区	低钇	61.22	16.05	—	1.49	2.20	0.36	0.44	寸小妮等, 2016
	高钇	62.99	17.75	—	4.08	1.49	0.60	0.42	
	平均值	62.10	16.90	—	2.79	1.84	0.48	0.43	
伊犁盆地蒙古其地区	低磷低钇	74.73	6.07	0.62	0.00	1.70	2.12	2.21	黄广文等, 2017
	高磷高钇	65.64	13.76	2.52	1.03	2.96	0.66	1.00	
	平均值	70.19	9.91	1.57	0.51	2.33	1.39	1.60	

注: “—”表示低于检测线或未检测。

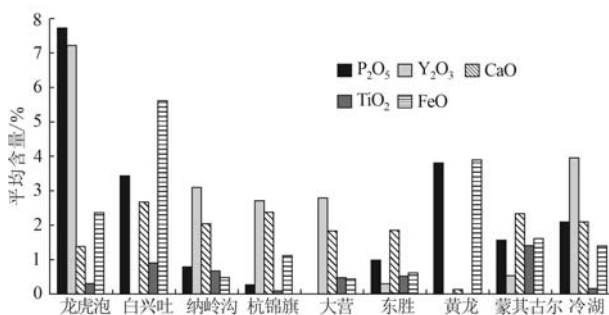


图 6 北方砂岩型铀矿铀石主要元素含量对比图

Fig. 6 A diagram for comparing major elements of uranite in the north sandstone-hosted uranium deposits

5 地质意义及讨论

通过对典型矿物电子探针分析测试, 发现冷湖铀矿床主要铀矿物为铀石和沥青铀矿, 其次为含铀

硒铅矿。研究发现, 相对于沥青铀矿和硒铅矿, 铀石矿物中元素 Y 含量较高。铀石中 UO₂ 含量平均约 60.80%, SiO₂ 含量平均约 11.10%, TiO₂ 介于 0~0.79% 之间, Y₂O₃ 含量介于 0~10.35% 之间, 大部分介于 4.54%~10.35% 之间(表 3), 而沥青铀矿中元素 Y 含量小于 1%, 硒铅矿中元素 Y 含量小于 2%, 两者 Y 元素含量明显小于铀石中含量。马晔等(2013)认为铀石中 Y 元素含量高与成矿后期携带 Y 元素的热液从构造裂隙进入铀异常区与铀石发生反应有关。陈祖伊等(2010)认为层间氧化带前锋区 Y 元素的迁移受 pH 值和 Eh 值地球化学障影响, 以碳酸或硫酸络合物形式迁移, 在铀矿富矿体区域富集(图 7b)。鉴于此, 笔者认为冷湖铀矿床中铀石、沥青铀矿及硒铅矿 3 种铀矿物存在高 Y 型和低 Y 型两种类型(图 7a)是由 Y₂O₃ 含量不同的两期成矿流体所致。

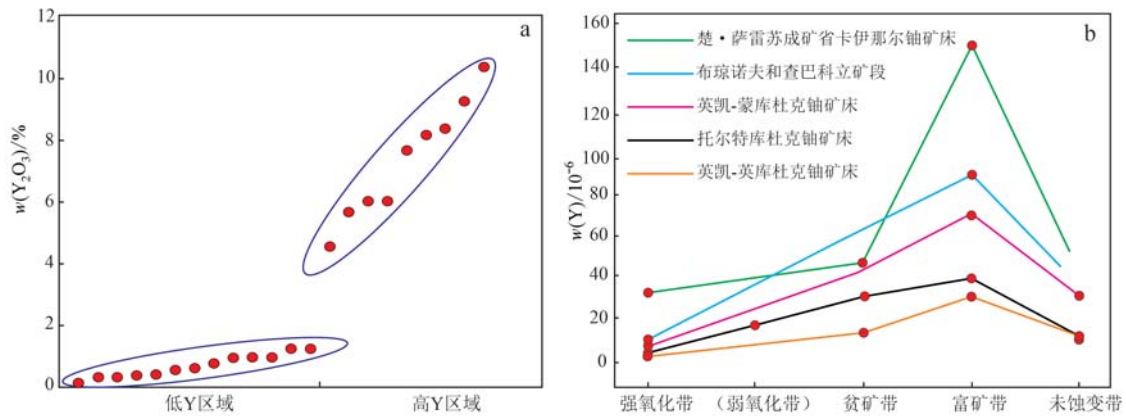


图7 冷湖地区小煤沟组 Y_2O_3 含量分布图(a)和中亚地区不同铀矿床 Y 元素含量统计图(b, 据陈路路等, 2017)

Fig. 7 Distribution map of Y_2O_3 content in Xiaomeigou Formation in Lenghu area(a) and statistics of Y element content from different uranium deposits in Central Asia(b, after Chen Lulu *et al.*, 2017)

电子探针分析结果表明沥青铀矿中 UO_2 平均含量为 60.80%, SiO_2 平均含量为 11.10%。铀石矿物中 UO_2 含量与 Y_2O_3 含量呈负相关关系, 其中 Y_2O_3 含量小于 5% 的铀石中 UO_2 含量均大于 60%。沥青铀矿和硒铅矿中 Y_2O_3 含量较少, 与 UO_2 含量无明显相关关系, 结合所研究部分铀矿物成分中不含元素 Y 及陈祖伊等 (2010) 关于 Y 元素易于在铀矿富矿区域富集的认识, 推测冷湖矿床铀元素为原铀矿物残留, 该地区富铀岩系经历多期流体改造作用 (图 3b) 且后期流体中 Y 元素含量很低或不含 Y 元素。

3 种铀矿物呈微细柱状、似胶状、不规则锯齿状或集合体分布于石英、长石等岩屑颗粒之间或蚀变矿物解理缝隙中 (图 5)。该地区铀矿物与黄铁矿及有机质密切共生, 其中很多铀石、沥青铀矿等铀矿物围绕黄铁矿产出, 两者之间界限清晰 (图 5a、5c)。围岩中黑云母、磁铁矿、赤铁矿等矿物经过后期富氧含铀流体蚀变, 成矿流体作用携带的 U^{6+} 以铀石、沥青铀矿或硒铅矿等矿物形式呈透镜状集合体在解理缝隙中沉淀或者吸附在黏土矿物的解理面上, 其中复杂的还原-沉淀-吸附作用是铀矿物产于矿物颗粒间及被蚀变矿物解理缝隙中的主要模式。

黄铁矿为岩石中常见的金属矿物, 有五角十二面体状黄铁矿、立方体状黄铁矿、它形粒状黄铁矿和草莓状黄铁矿等。冷湖地区下侏罗统小煤沟组含矿层砂岩富含有机炭和黄铁矿, 反映其处于氧逸度低的还原环境, 成矿流体中 U、 SiO_2 在该环境下发生沉淀, 形成铀矿富集区。

观察研究区下侏罗统小煤沟组岩心发现大量高

岭土化蚀变矿物, 局部可见黄铁矿团块及方解石脉切穿砾石现象 (图 3b), 反映后期流体的作用。铀矿物富集成矿经历了成矿物质从源区溶解-迁移-沉淀 (富集) 的过程。综合岩心、显微镜下观察和背散射图像、铀矿物存在高 Y 与低 Y 两种类型及 Y_2O_3 化学特征分析, 认为该地区铀矿是多期成矿流体作用的产物。

前人研究证明, 柴北缘砂岩型铀矿主成矿期在 25 Ma 左右, 找矿类型以古层间氧化带型为主 (王夏涛等, 2008), 柴北缘中生代晚期及新生代地层分布范围较广, 埋藏深度适中, 处于基底较平缓的斜坡带, 补-径-排系统完善, 具有较好的水文地质条件; 小煤沟组砂泥互层且单层砂体厚度适中, 为富含有机质的碎屑沉积, 具备多物源、堆积快等特点, 属原生黑色岩系, 具有形成砂岩型铀矿的物质基础; 柴北缘北大滩、鱼卡等地也发现砂岩型铀矿体产出, 赛什腾山及安南坝山为柴北缘新生代盖层主要蚀源区, 岩性主要为花岗岩、海西期二长花岗岩及达肯达坂群片岩及片麻岩, 因其铀含量整体较高被认为是该地区典型含铀建造, 同时柴北缘新生代地层本身铀含量相对较高, 表明成矿源岩在风化、搬运过程中不断有活化铀析出, 在一定的地质条件下在适当位置富集成矿形成工业铀矿体。

6 结论

(1) 冷湖小煤沟组矿石类型主要为杂砂岩型及碳质砂岩型两种, 整体发育后生蚀变。

(2) 冷湖铀矿床铀矿物主要为铀石与沥青铀

矿,含少量硒铅矿,主要产于蚀变矿物粒间空隙中,与黏土矿物、有机质及黄铁矿密切共生,呈微细柱状、似胶状或不规则锯齿状产出于石英、长石等岩屑颗粒之间或蚀变矿物解理缝隙中。

(3) 冷湖小煤沟组后期多次流体作用携带的 U^{6+} 在 Fe^{2+} 提供还原环境中发生还原-沉淀-吸附铀的成矿作用。

(4) 综合铀矿物存在高 Y 与低 Y 两种类型、蚀变序列及环境特征分析,推测冷湖小煤沟组铀矿物中铀为原铀矿物残留,经多期流体改造作用且后期流体中不含 Y 元素或 Y 元素含量很低。

致谢 感谢四川省核工业地质局二八三大队提供的大力支持。由衷感谢编辑部老师及审稿专家提出的细心而宝贵的修改意见。

References

- Chen Daisheng, Li Shengxiang and Cai Yuqi. 2003. A discussion on research situation and development direction of sandstone-type uranium deposits in the Meso-Cenozoic basin of China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(1): 113~117 (in Chinese with English abstract).
- Chen Guihua. 2001. Analysis on metallogenic conditions of sandstone-type uranium deposits at eastern margin of Qaidam basin[J]. *Uranium Geology*, 17(2): 70~75 (in Chinese with English abstract).
- Chen Lulu, Feng Xiaoxi, Sima Xianzhang, *et al.* 2017. Occurrence forms of the uranium minerals in the Nalinggou area of the Ordos Basin and geological implications[J]. *Geology and Exploration*, 53(4): 632~642 (in Chinese with English abstract).
- Chen Min, Xue Chunji, Xue Wanwen, *et al.* 2020. Discovery and geological significance of Xuji diorite in Zongwulong tectonic belt on the northern margin of Qaidam Basin[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 39(5): 552~568 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zuyi. 2002. Regional distribution regularity of sandstone uranium deposits in Asian continent and prospecting strategy for sandstone uranium deposits in China[J]. *Uranium Geology*, 18(3): 129~137 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zuyi and Guo Qingyin. 2010. The mechanism of rare elements concentration in the redox front area of interlayer oxidation type sandstone-hosted uranium deposits[J]. *Uranium Geology*, 26(1): 1~8 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Yinhang, Zhang Tianfu, Zeng Wei, *et al.* 2020. Driving forces for sandstone-type uranium super-enrichment in Meso-Cenozoic basins, North China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(4): 590~606 (in Chinese with English abstract).
- Cun Xiaoni, Wu Bolin, Zhang Hongshen, *et al.* 2016. Study on uranium occurrence state of Daying sandstone-type uranium deposits in Ordos Basin[J]. *Northwestern Geology*, 49(2): 198~212 (in Chinese with English abstract).
- Deng Wenshi, Zhang Lixia and Cheng Yongsheng. 2009. Coal-bearing strata sedimentary features and coal accumulation process in Lower Middle Series, Jurassic system, Qinghai, Province[J]. *Coal Geology of China*, 21(S2): 15~18 (in Chinese with English abstract).
- Ding Bo, Liu Hongxu, Zhang Bin, *et al.* 2019. Mineralogical and isotopes evidence for origin of pyrite: Implication for formation mechanism of pyrite and its relationship with uranium mineralization in Mengqigu'er uranium deposit, Yili Basin[J]. *Mineral Deposits*, 38(6): 1379~1391 (in Chinese with English abstract).
- Feng Xiaoxi, Teng Xueming and He Youyu. 2019. Preliminary discussions on the metallogenesis of the Dongsheng uranium orefields in the Ordos basin[J]. *Geological Survey and Research*, 42(2): 96~108.
- Feng Z B, Nie F J, Deng J Z, *et al.* 2017. Spatial-temporal collocation and genetic relationship among uranium, coal, and hydrocarbons and its significance for uranium prospecting: A case from the Meso-zoic-Cenozoic uranium basins, North China[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 58: 611~623.
- Fu Chengming. 2009. Basin range coupling characteristics and its controlling effects on sandstone type uranium metallogenesis at the northern margin of Qaidam Basin[J]. *World Nuclear Geoscience*, 26(1): 31~37 (in Chinese with English abstract).
- Fu Suotang. 2009. Geological conditions of deep gas pools and their favorable prospects[J]. *Natural Gas Geoscience*, 20(6): 841~845 (in Chinese with English abstract).
- Jin Ruoshi, Cheng Yinhang and Li Jianguo. 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).
- Jiao Yangquan, Wu Liqun and Peng Yunbiao. 2015. Sedimentary-tectonic setting of the deposition-type uranium deposits forming in the Paleo-Asian tectonic domain, North China[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 189~205 (in Chinese with English abstract).
- Han J B, Jiang H C, Xu J X, *et al.* 2018. Hydraulic connection affects uranium distribution in the Gas Hure salt lake, Qaidam Basin, China[J]. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 25: 4881~4895.

- Huang Guangwen, Pan Jiayong, Zhang Zhanfeng, *et al.* 2017. Study on petrological characteristics and distribution of uranium minerals of sandstones in the Mengqier uranium deposit by electron microprobe, Xinjiang[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 36(2): 196~207(in Chinese with English abstract).
- Huang Hanchun, Zhou Xianqiang and Wang Changli. 1989. Tectonic evolution of the Qaidam basin and the regularity of oil accumulation [J]. *Geological Reviews*, 35(4): 314~322(in Chinese with English abstract).
- Liu Bo, Shi Zhiqiang, Peng Yunbiao, *et al.* 2020. Geological characteristics and uranium metallogenic model of Tamusu uranium deposit in Bayin Gobi Basin[J]. *Mineral Deposits*, 39(1): 168~183(in Chinese with English abstract).
- Liu Lin. 2008. Analysis on fault styles and formation of paleo and present interlayer oxidation zone in northern margin of Qaidam basin [J]. *Uranium Geology*, 24(1): 12~16(in Chinese with English abstract).
- Liu Yongle, Liu Zhigang, Zhang Aikui, *et al.* 2018. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and petrogeochemical characteristics of diorite from Dadak-enwulashan area on the northern margin of Qaidam basin and their tectonic implications[J]. *Mineral Deposits*, 37(5): 1 079~1 090 (in Chinese with English abstract).
- Ma Ye, Wu Bolin, Liu Yalei, *et al.* 2013. Study on uranium occurrence state of sandstone-type uranium deposits in HJQ region, Ordos Basin [J]. *Northwestern Geology*, 46(2): 141~152(in Chinese with English abstract).
- Quan Zhigao and Xu Gaozhong. 2012. Ore-bearing Formation and exploration perspective of sandstone-type uranium deposits in Northwestern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(2): 307~315(in Chinese with English abstract).
- Quan Zhigao, Xu Gaozhong, Fu Chengming, *et al.* 2012. The paleo-interlayer oxidation and the paleointerlayer oxidation type uranium mineralization in the north area of Qaidam Basin[J]. *Northwestern Geology*, 45(1): 159~164(in Chinese with English abstract).
- Quan Zhigao, Song Zhe, Fu Chengming, *et al.* 2014. Metallogenic condition and potential of sandstone-type uranium deposits in the Northern Margin of Qaidam Basin[J]. *Uranium Geology*, 30(3): 155~160(in Chinese with English abstract).
- Si Qinghong, Yu Rengan, Cai Hongguang, *et al.* 2021. Element geochemical characteristics and geological significance of sandstones of Zhiluo formation in uranium-bearing strata in Naimadai area, Ordos basin[J]. *North China Geology*, 44(2): 49~57(in Chinese with English abstract).
- Tang Chao, Xiao Peng, Wei Jialin, *et al.* 2021. Geological and geochemical characteristics of uranium mineralization in Anding Formation in Zhidan Area, Ordos basin[J]. *North China Geology*, 44(2): 4~13(in Chinese with English abstract).
- Wang G, Chen Z L, Wang G R, *et al.* 2021. Up-welling leakage-recharge genetic model of the Mengqier sandstone-type uranium deposit, southern Yili Basin, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 138: 104369.
- Wang Shanbo, Zhang Chao, Zhang Tianfu, *et al.* 2021. Elemental geochemical characteristics of Jurassic uranium-bearing Zhiluo Formation in Taran Gol Area, Northeastern Ordos Basin [J]. *Science Technology and Engineering*, 21(1): 77~86(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiatao, Fu Chengming and Li Haisen. 2008. Basin-mountain coupling characters of northern edge of Qaidam Basin and the prospect area for sandstone-host U deposit[J]. *Mineral Resources And Geology*, 22(6): 492~495(in Chinese with English abstract).
- Wei Jialin, Tang Chao, Jin Ruoshi, *et al.* 2019. A study of the relationship between the Fe-Ti oxide and sandstone-hosted uranium mineralization in Longhupao area, northern Songliao Basin[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 38(3): 375~789(in Chinese with English abstract).
- Wu Rengui, Cai Jianfang, Yu Zhenqing, *et al.* 2011. The hydrothermal alteration and mineral composition of Baixintu uranium deposit in Songliao basin[J]. *Uranium Geology*, 27(2): 74~80(in Chinese with English abstract).
- Xiang Weidong, Fang Xiheng, Li Tiangang, *et al.* 2006. Metallogenic characteristics and model of Dongsheng uranium deposit in Ordos basin, North China[J]. *Uranium Geology*, 22(5): 257~266(in Chinese with English abstract).
- Xiao Zhibin, Zhang Ran, Ye Lijuan, *et al.* 2020. In-situ U-Pb dating of pitchblende (GBW04420) [J]. *Geological Survey and Research*, 43(1): 1~4(in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaoyong, Ling Mingxing, Lai Xiaodong, *et al.* 2009. Uranium mineral occurrence of sandstone-type uranium deposits in the Dongsheng-Huanglong region, Ordos basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(8): 1 167~1 177(in Chinese with English abstract).
- Yang Y B, Fang X M, Li M H, *et al.* 2015. Paleoenvironmental implications of uranium concentrations in lacustrine calcareous clastic-evaporite deposits in the western Qaidam Basin [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 417: 422~431.
- Yi Chao, Wang Gui, Li Xide, *et al.* 2018. A tentative discussion on uranium enrichment characteristics and metallogenic model in Zhiluo Formation, northeastern Ordos Basin [J]. *Mineral Deposits*, 37(4): 835~852(in Chinese with English abstract).

- Yu Rengan, Zhu Qiang, Wen Sibao, *et al.* 2020. Tectonic setting and provenance analysis of Zhiluo Formation sandstone of Tarangaole area in the Ordos Basin[J]. *Earth Science*, 45(3): 829~843(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chao, Si Qinghong, Yu Rengan, *et al.* 2020. Analysis of the relationship between sedimentary strata and uranium deposits from the Neogene Shizigou Formation in Huatugou area, Northwest Qaidam Basin[J]. *Geology in China*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20201010.1111.005.html> (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chao, Wang Shanbo, Cheng Yinhang, *et al.* 2020. The characteristics of sedimentary and uranium source analysis of the Neogene Youshashan Formation in Huatugou area, North Qaidam[J]. *Science Technology and Engineering*, 20(9): 3 427~3 434(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chao, Wang Shanbo, Yu Rengan, *et al.* 2021a. Mesozoic-cenozoic tectonic evolution and uranium source analysis in northwestern Qaidam Basin[J]. *North China Geology*, 44(2): 67~73(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chao, Yu Rengan, Wang Shanbo, *et al.* 2021b. Late Cenozoic sedimentary characteristics and sedimentary facies evolution in Yuejin 2 area of Northwest Qaidam[J]. *Northwestern Geology*, 54(3): 27~38(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jindai, Li Youliang and Jian Xiaofei. 2008. Situation and development prospect of uranium resources exploration in China[J]. *China Academy of Engineering Physics*, 10(1): 54~60(in Chinese with English abstract).
- Zhang Long, Liu Chiyang, Fayek Mostafa, *et al.* 2017. Hydrothermal mineralization in the sandstone-hosted Hangjinqi uranium deposit, North Ordos Basin, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 80: 103~115.
- Zhang Xin, Nie Fengjun, Zhang Chengyong, *et al.* 2015. Study on uranium occurrence state of sandstone-type uranium deposits in Mengqiguer deposit, Yili Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 15(33): 18~24(in Chinese with English abstract).
- Zhuang Yujun, Gu Pingyang, Gao Yongwei, *et al.* 2020. Petrogenesis of middle Permian gabbro in Saishiteng mountain of the northern Qaidam Basin and its constraint to the time of Zongwulong ocean subduction[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 39(6): 718~734(in Chinese with English abstract).
- 陈贵华. 2001. 柴达木盆地东部层间氧化带砂岩型铀矿形成条件分析[J]. *铀矿地质*, 17(2): 70~75.
- 陈路路, 冯晓曦, 司马献章, 等. 2017. 鄂尔多斯盆地纳岭沟地区铀矿物赋存形式研究及其地质意义[J]. *地质与勘探*, 53(4): 632~642.
- 陈敏, 薛春纪, 薛万文, 等. 2020. 柴北缘宗务隆构造带蓄集地区闪长岩的发现及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 39(5): 552~568.
- 陈祖伊. 2002. 亚洲砂岩型铀矿区域分布规律和中国砂岩型铀矿找矿对策[J]. *铀矿地质*, 18(3): 129~137.
- 陈祖伊, 郭庆银. 2010. 砂岩型铀矿床层间氧化带前锋区稀有元素富集机制[J]. *铀矿地质*, 26(1): 1~8.
- 程银行, 张天福, 曾威, 等. 2020. 中国北方中新世盆地砂岩型铀超常富集的驱动力[J]. *大地构造与成矿学*, 44(4): 590~606.
- 寸小妮, 吴柏林, 张洪深, 等. 2016. 鄂尔多斯盆地大营铀矿铀的赋存状态研究[J]. *西北地质*, 49(2): 198~212.
- 丁波, 刘红旭, 张宾, 等. 2019. 伊犁蒙古尔铀矿床含矿层砂岩中黄铁矿形成机制及对铀成矿的指示意义[J]. *矿床地质*, 38(6): 1 379~1 391.
- 冯晓曦, 滕雪明, 何友宇. 2019. 初步探讨鄂尔多斯盆地东胜铀矿田成矿作用研究若干问题[J]. *地质调查与研究*, 42(2): 96~108.
- 傅成铭. 2009. 柴达木盆地北缘盆-山耦合特征及对砂岩型铀成矿的控制作用[J]. *世界核地质科学*, 26(1): 31~37.
- 付锁堂. 2009. 柴北缘深层气藏形成的地质条件及有利勘探区带[J]. *天然气地球科学*, 20(6): 841~845.
- 金若时, 程银行, 李建国. 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.
- 焦养泉, 吴立群, 彭云彪. 2015. 中国北方古亚洲构造域中沉积型铀矿形成发育的沉积-构造背景综合分析[J]. *地学前缘*, 22(1): 189~205.
- 黄广文, 潘家永, 张占峰, 等. 2017. 应用电子探针研究蒙古尔铀矿床含矿砂岩岩石学特征及铀矿物分布规律[J]. *岩矿测试*, 36(2): 196~207.
- 黄汉纯, 周显强, 王长利. 1989. 柴达木盆地构造演化与石油富集规律[J]. *地质论评*, 35(4): 314~322.
- 刘波, 时志强, 彭云彪, 等. 2020. 巴音戈壁盆地塔木素铀矿床地质特征及铀成矿模式研究[J]. *矿床地质*, 39(1): 168~183.
- 刘林. 2008. 试论柴达木盆地北缘构造样式与古、今层间氧化带的形成[J]. *铀矿地质*, 24(1): 12~16.
- 刘永乐, 刘智刚, 张爱奎, 等. 2018. 柴北缘达达肯乌拉山地区闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄、岩石地球化学特征及其构造意义

附中文参考文献

- 陈戴生, 李胜祥, 蔡煜琦. 2003. 我国中生代盆地砂岩型铀矿研究现状及发展方向的探讨[J]. *沉积学报*, 21(1): 113~117.

- [J]. 矿床地质, 37(5): 1 079~1 090.
- 马 晔, 吴柏林, 刘亚非, 等. 2013. 鄂尔多斯盆地 HJQ 地区砂岩型铀矿铀赋存状态研究[J]. 西北地质, 46(2): 141~152.
- 权志高, 徐高中. 2012. 中国北西部地区砂岩型铀矿含矿建造及找矿前景[J]. 地质学报, 86(2): 307~315.
- 权志高, 徐高中, 付成铭, 等. 2012. 柴北缘地区古层间氧化作用及古层间氧化带型铀矿化[J]. 西北地质, 45(1): 159~164.
- 权志高, 宋 哲, 傅成铭, 等. 2014. 柴达木盆地北缘地区砂岩型铀矿成矿条件与成矿潜力[J]. 铀矿地质, 30(3): 155~160.
- 司庆红, 俞初安, 蔡洪广, 等. 2021. 鄂尔多斯盆地乃马岱地区直罗组砂岩元素地球化学特征及其地质意义[J]. 华北地质, 44(2): 49~57.
- 汤 超, 肖 鹏, 魏佳林, 等. 2021. 鄂尔多斯盆地志丹地区安定组铀矿化地质地球化学特征[J]. 华北地质, 44(2): 4~13.
- 王善博, 张 超, 张天福, 等. 2021. 鄂尔多斯盆地东北部塔然高勒地区侏罗系直罗组含铀地层地球化学特征分析[J]. 科学技术与工程, 21(1): 77~86.
- 王夏涛, 付成铭, 李海森. 2008. 柴达木盆地北缘盆山耦合作用特征及砂岩型铀成矿远景分析[J]. 矿产与地质, 22(6): 492~495.
- 魏佳林, 汤 超, 金若时, 等. 2019. 松辽盆地北部龙虎泡地区铁钛氧化物与砂岩型铀矿化关系探讨[J]. 岩石矿物学杂志, 38(3): 375~389.
- 吴仁贵, 蔡建芳, 于振清, 等. 2011. 松辽盆地白兴吐铀矿床热液蚀变及物质组成研究[J]. 铀矿地质, 27(2): 74~80.
- 向伟东, 方锡珩, 李田港, 等. 2006. 鄂尔多斯盆地东胜铀矿床成矿特征与成矿模式[J]. 铀矿地质, 22(5): 257~266.
- 肖志斌, 张 然, 叶丽娟, 等. 2020. 沥青铀矿(GBW04420)的微区原位 U-Pb 定年分析[J]. 地质调查与研究, 43(1): 1~4.
- 杨晓勇, 凌明星, 赖小东, 等. 2009. 鄂尔多斯盆地东胜-黄龙地区砂岩型铀矿铀赋存状态研究[J]. 地质学报, 83(8): 1 167~1 177.
- 易 超, 王 贵, 李西得, 等. 2018. 鄂尔多斯盆地东北部直罗组铀富集特征及铀成矿模式探讨[J]. 矿床地质, 37(4): 835~852.
- 俞初安, 朱 强, 文思博, 等. 2020. 鄂尔多斯盆地塔然高勒地区直罗组砂岩源区构造背景与物源分析[J]. 地球科学, 45(3): 829~843.
- 张 超, 司庆红, 俞初安, 等. 2020b. 柴西北缘花土沟地区新近系狮子沟组沉积地层与铀矿关系分析[J/OL]. 中国地质, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20201010.1111.005.html>.
- 张 超, 王善博, 程银行, 等. 2020a. 柴西北缘花土沟地区新近系油砂山组沉积特征及铀源分析[J]. 科学技术与工程, 20(9): 3 427~3 434.
- 张 超, 王善博, 俞初安, 等. 2021a. 柴西北缘中生代构造演化及铀源分析[J]. 华北地质, 44(2): 67~73.
- 张 超, 俞初安, 王善博, 等. 2021b. 柴西北缘跃进二号地区晚新生代沉积特征及沉积相演化[J]. 西北地质, 54(3): 27~38.
- 张金带, 李友良, 简晓飞. 2008. 我国铀资源勘查状况及发展前景[J]. 中国工程科学, 10(1): 54~59.
- 张 鑫, 聂逢君, 张成勇, 等. 2015. 伊犁盆地蒙古古尔矿床砂岩型铀矿赋存状态研究[J]. 科学技术与工程, 15(33): 18~24.
- 庄玉军, 辜平阳, 高永伟, 等. 2020. 柴北缘赛什腾中二叠世辉长岩成因及其对宗务隆洋盆俯冲时限的制约[J]. 岩石矿物学杂志, 39(6): 718~734.