

doi: 10.12029/gc20200814001

彭胜龙, 田家鹏, 郭晓宇, 靳云鹏, 孙波, 窦洪鑫, 张帆, 郝静, 胡英莲, 陈琳, 许伟, 佟野. 2023. 鄂尔多斯盆地塔然高勒地区砂岩型铀矿含矿层砂岩特征及成矿作用[J]. 中国地质, 50(1): 264–276.

Peng Shenglong, Tian Jiapeng, Guo Xiaoyu, Jin Yunpeng, Sun Bo, Dou Hongxin, Zhang Fan, Hao Jing, Hu Yinglian, Chen Lin, Xu Wei, Tong Ye. 2023. Characteristics and metallogeneses of ore-bearing sandstone in the Tarangaole sandstone type uranium deposit, Ordos Basin[J]. Geology in China, 50(1): 264–276(in Chinese with English abstract).

鄂尔多斯盆地塔然高勒地区砂岩型铀矿含矿层砂岩特征及成矿作用

彭胜龙¹, 田家鹏^{1,2}, 郭晓宇¹, 靳云鹏¹, 孙波¹, 窦洪鑫¹,
张帆¹, 郝静^{1,3}, 胡英莲^{1,3}, 陈琳¹, 许伟¹, 佟野¹

(1. 内蒙古自治区煤田地质局, 内蒙古 呼和浩特 010010; 2. 东华理工大学放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室, 江西南昌 330013; 3. 内蒙古自治区煤田地质局科研院所, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要:【研究目的】近几年, 砂岩型铀矿在北方发展较为迅速, 塔然高勒地区砂岩型铀矿地质勘探取得了重大找矿发现。通过对塔然高勒地区砂岩型铀矿进行研究, 有利于更好探寻深部砂岩型铀矿的分布规律及岩石学、矿物学赋存形态。塔然高勒地层结构与纳岭沟、大营铀矿床具有相似的地质特征, 但研究区含矿层岩石特征、铀矿物的赋存状态尚不明确。【研究方法】本文通过钻孔岩心观察、系统取样及详细的显微镜下鉴定, 并对塔然高勒地区铀矿石进行了电子探针分析。【研究结果】研究结果表明: 研究区中侏罗统直罗组下段砂岩以长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩为主, 成分成熟度和结构成熟度较低, 具有近物源沉积的特点。电子探针分析结果表明, 铀矿物主要以沥青铀矿、铀石及少量的钛铀矿、含钛铀矿为主。【结论】背散射图像显示铀矿多与黄铁矿及有机质矿物共同分布, 表明黄铁矿及有机质矿物为铀矿物的形成提供了还原剂。成岩过程中溶蚀作用及后生蚀变现象的发育, 为铀的富集沉淀提供了有利条件。观察含矿目的层砂岩中的蚀变现象及蚀变矿物特征, 表明各黏土矿物在一定的物理化学条件下发生相互转变, 地球化学环境的改变造成了黏土矿物间的相互转化, 进一步改变赋矿砂体的地球化学环境。

关键词:砂岩型铀矿; 中侏罗统直罗组; 岩石学特征; 铀矿物; 电子探针; 塔然高勒; 鄂尔多斯盆地; 矿产勘查工程

创新点:文章从赋矿岩石特征、岩相、及铀矿物特征等方面进行分析, 报道了鄂尔多斯盆地塔然高勒地区中侏罗统直罗组铀矿找矿发现, 指出直罗组具备铀成矿基本条件, 对研究该区砂岩型铀成矿规律和下一步铀矿勘查具有重要意义。

中图分类号: P619.14 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)01-0264-13

Characteristics and metallogeneses of ore-bearing sandstone in the Tarangaole sandstone type uranium deposit, Ordos Basin

PENG Shenglong¹, TIAN Jiapeng^{1,2}, GUO Xiaoyu¹, JIN Yunpeng¹, SUN Bo¹, DOU Hongxin¹,

收稿日期: 2020-08-14; 改回日期: 2020-12-09

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190119)、内蒙古自治区科技创新引导奖励基金项目“煤田钻孔自然伽玛放射性铀含量关系的研究”(KCBJ2018071)和“煤田勘查区砂岩型铀矿调查与勘查示范项目”(1212011501601)联合资助。

作者简介: 彭胜龙, 男, 1983年生, 高级工程师, 主要从事铀矿及煤田地质勘查; E-mail: 94255017@qq.com。

通讯作者: 田家鹏, 男, 1988年生, 硕士生, 工程师, 主要从事矿床地球化学及铀矿地质学研究; E-mail: 949889773@qq.com。

ZHANG Fan¹, HAO Jing^{1,3}, HU Yinglian^{1,3}, CHEN Lin¹, XU Wei¹, TONG Ye¹

(1. Inner Mongolia Autonomous Region Bureau of Coal Geology, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China; 2. State Key Laboratory of Radioactive Geology and Exploration Technology, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 3. Scientific Research Institute of Coalfield Geology Bureau of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

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

[Objective] In recent years, sandstone type uranium deposits have developed rapidly in North China. The geological exploration of sandstone type uranium deposits in the Tarangaole area has made significant discoveries. Through the study of sandstone type uranium deposits in the Tarangaole area, it is helpful to better explore the distribution rules of deep sandstone type uranium deposits and the occurrence patterns of petrology and mineralogy. The stratigraphic structure of Tarangaole is similar to that of Na Linggou and Da Ying uranium deposits, but the rock characteristics of ore bearing strata and the occurrence of uranium minerals in the study area are not clear. **[Methods]** In this paper, through core observation, systematic sampling and detailed identification under microscope, the uranium ore in Tarangaole area was analyzed by EPMA. **[Results]** The results show that the sandstones in the lower member of Zhiluo Formation of Middle Jurassic are mainly feldspathic lithic sandstone and lithic arkose, With low compositional maturity and structural maturity, and have the characteristics of near provenance deposition. **[Conclusions]** The results of electron microprobe analysis show that the main uranium minerals are pitchblende, uranite and a small amount of ilmenite. The backscatter images show that uranium deposits are mostly distributed together with pyrite and organic matter minerals, indicating that pyrite and organic matter minerals provide reducing agents for the formation of uranium minerals. The development of dissolution and epigenetic alteration during diagenesis provides favorable conditions for uranium enrichment and precipitation. By observing the alteration phenomena and the characteristics of altered minerals in sandstone of ore bearing Tarangaole bed, it is shown that the clay minerals transform each other under certain physical and chemical conditions. The change of geochemical environment causes the mutual transformation of clay minerals and further changes the geochemical environment of ore-bearing sand bodies.

Key words: sandstone type Uranium deposit; Zhiluo Formation of Middle Jurassic; petrological characteristics; uranium minerals; electron probe; Tarangaole; Ordos Basin; mineral exploration engineering

Highlights : Based on the analysis of the characteristics of ore-bearing rocks, Lithofacies and uranium minerals, this paper reports the discovery of uranium ore prospecting in the Middle Jurassic Zhiluo Formation in the Tarangaole area of the Ordos Basin, and points out that the Zhiluo Formation has the basic conditions for uranium mineralization, which is of great significance to the study of the sandstone-type uranium mineralization law and the next uranium ore exploration in the region.

About the first author: PENG Shenglong, male, born in 1983, senior engineer, mainly engaged in uranium and coal geological exploration; E-mail: 94255017@qq.com.

About the corresponding author: TIAN Jiapeng, male, born in 1988, master candidate, engineer, mainly engaged in research of deposit geochemistry and uranium geology; E-mail: 949889773@qq.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20190119), the Inner Mongolia Autonomous Region Science and Technology Innovation Guidance Award Fund Project "Research on the Relationship between Natural Gamma Radioactivity and Uranium Content in Coalfield Boreholes" (No.KCBI2018071) and " investigation and exploration demonstration project of Sandstone Type Uranium Deposit in Coalfield Exploration Area "(No.1212011501601).

1 引言

近几年,砂岩型铀矿在北方发展较为迅速,砂岩型铀矿为一种外生矿床,具有开采成本低、储量大,埋藏浅、环境污染小等优点,是中国目前在北方发展铀矿矿产资源的主要方向(王正邦,2002;张金带,

2003;王彦国等,2017;张鹏飞等,2018)。鄂尔多斯盆地具有相对稳定的基底和盖层构造条件(吴伟涛等,2014),同时,中侏罗统直罗组稳定展布的辫状河流相砂带,为铀成矿提供了良好的储矿空间(涂颖等,2016)。北部河套古隆起在成矿期间一直起主导作用,可提供长期稳定的含氧含铀水的补给,为盆地

北部铀成矿期一直持续到中新世及其之后(程银行等,2020)提供了保障。且直罗组下段各岩段均有较稳定的泥岩盖层,与中下侏罗统延安组上部泥岩层构成多层相对稳定的“泥—砂—泥”结构层,最为重要的是延安组煤和晚侏罗世—早白垩世红层构成的“红黑岩系”耦合沉积(金若时等,2017),为塔然高勒铀矿床的形成提供了较为有利的地质环境。本次研究区位于伊盟斜坡上的塔然高勒地区,地层结构与纳岭沟、大营铀矿床具有相似的特征(刘忠仁等,2018)。本次研究以中侏罗统直罗组为主要找矿目的层,其次为中下侏罗统延安组(J_{1-2y}),以研究区目的层岩石学特点为主要研究内容,探讨含矿砂岩岩石学特征及铀矿物的分布规律(黄广文等,2017)。

前人对鄂尔多斯盆地开展了大量的研究工作,其中主要集中于赋矿围岩的岩石地球化学特征(张强,2017)、成矿条件及成矿机理(陈戴生等,1996;王冰等,2015)、构造与控矿因素(王军堂等,2008;张占峰等,2010;蒋宏等,2011)、水文地球化学(王冰等,2009)、水动力特征(康勇和王冰,2010)、沉积体系(李胜祥等,2006;邱余波等,2014)、流体包裹体(修晓茜等,2015;武翠莲等,2015)等方面研究。鄂尔多斯盆地北部塔然高勒在含矿砂岩的岩石学特征、可能的物源方向、源区大地构造性质及铀的赋存状态等方面研究相对薄弱,尤其对研究区母岩性质及铀矿的分布规律方面的研究几乎处于空白(黄广文等,2017)。通过对岩石镜下薄片鉴定和矿石电子探针分析等手段(刘冉,2018),结合砂岩型铀矿成矿地质条件和成矿规律,查明该地区目的层岩石学特征、成分、结构、构造、后生蚀变、次生变化以及铀的存在形式等,以此来探讨塔然高勒地区矿物形成次序及成矿规律、含矿层及铀成矿作用的差异。因此,本文在野外地质调查与钻孔岩心编录基础上,通过室内岩矿鉴定、电子探针(EMPA)等系统研究了含矿砂岩的岩石学特征和铀矿物分布规律,为进一步寻找研究区内可地浸砂岩型铀矿提供必要的理论依据。

2 区域地质背景

鄂尔多斯盆地位于中国中西部地区,为中国第二大沉积盆地(图1)。盆地北侧与兴蒙褶皱带相邻,中元古代后以古陆形式出现。盆地南侧与秦岭造山带相接,自新生代后期才隆起成山,在两种不同大地构

造类型夹持控制下,鄂尔多斯盆地长期表现为北高南低的古构造面貌(刘晓雪等,2018)。鄂尔多斯盆地以燕山运动和印支运动两次构造运动面为界,划分出构造体均有较大不同的结晶基底及沉积盖层。结晶基底为太古界—下元古界,为地台沉积盖层的形成提供物源。印支运动造就了盆地由西向东、由北向南倾斜的大型斜坡带,该斜坡带上主要沉积了延安组、直罗组,为后期铀成矿提供了良好的储矿空间(涂颖等,2016)。燕山运动造成盆地多次抬升并总体向西掀斜,同时西缘逆冲带褶皱成山,北部河套古隆起一直起主导作用,提供长期稳定的含氧含铀水的补给,为盆地北部铀成矿提供保障。鄂尔多斯盆地发育的盖层主要包括中生界的三叠系(T)、侏罗系(J)、下白垩统(K_1)和新生界的古近系(E)、新近系(N)及第四系(Q)。区内主要找矿目的层为中侏罗统直罗组下段(J_{2z}^1),其以河流相沉积为主,可划分为下段下亚段的辫状河沉积(J_{2z}^{1-1})(刘正邦,2010),下段上亚段的辫状河—曲流河沉积(J_{2z}^{1-2})及上段的洪泛沉积(J_{2z}^2),直罗组下段上、下亚段辫状河砂体具有发育稳定、成岩固结程度低、孔隙性较好等特征,构成主要的储矿空间(刘正邦,2010)。

3 样品采集与分析方法

本次研究样品均采自鄂尔多斯盆地北部塔然高勒地区(朱强等,2018)。研究区中侏罗统直罗组下段(J_{2z}^1)岩性主要以灰色、浅灰绿色中砂岩及粗砂岩为主(图2)。共磨制镜下普通薄片和电子探针片28片。通过偏光显微镜对岩石的基本组分、结构、构造以及成岩作用和矿物蚀变组合进行了整体研究,测试元素中U、Th、Pb分析线系为Ma,元素Y、Ce、Nd分析线系为La,元素Ca、Fe、Si分析线系为Ka(张龙等,2016)。

4 塔然高勒目的层岩石学特征

塔然高勒含矿目的层主要分为直罗组下段(J_{2z}^1)及直罗组上段(J_{2z}^2)(图2),岩性主要为灰色、浅灰绿色、灰白色、灰黑色的含砾粗砂岩、砂质砾岩、粗砂岩、中砂岩及细砂岩。灰色砂岩中多见碳屑(图3a、f)、煤屑(图3c)和黄铁矿(图3b),黄铁矿大多呈团块状、细晶状。碳屑多呈细脉状及条带状沿节理裂隙充填,平均含量为12.5%。砂岩颗粒形

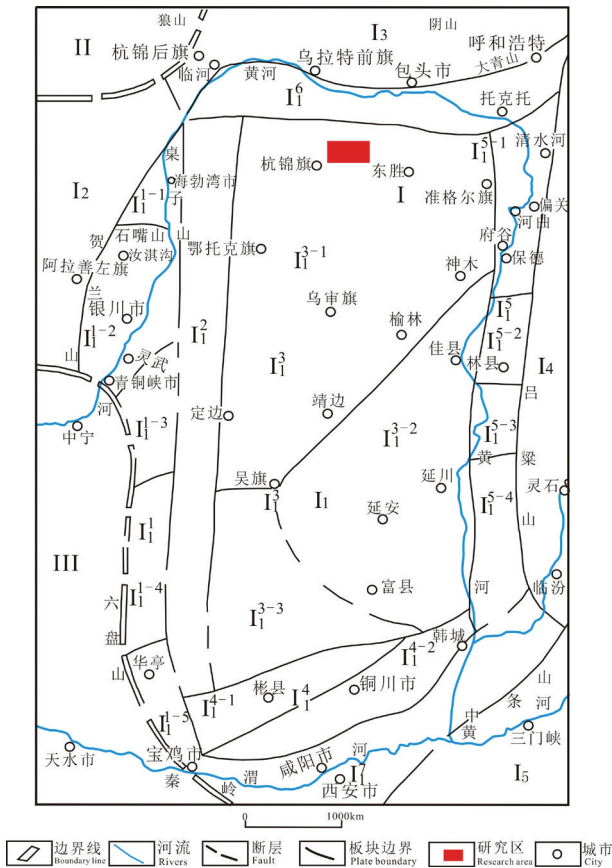


图1 鄂尔多斯盆地构造简图(据王思力等,2018修改)

I—中朝大陆板块; I₁—鄂尔多斯断块; I₁¹—西缘褶皱冲断带; I₁¹⁻¹—乌达—桌子山段; I₁¹⁻²—贺兰山—横山堡段; I₁¹⁻³—马家滩—甜水堡段; I₁¹⁻⁴—沙井子—平凉段; I₁¹⁻⁵—华亭—陇县段; I₁²—天环拗陷; I₁³—伊陕单斜区; I₁³⁻¹—东胜—靖边单斜; I₁³⁻²—延安单斜; I₁³⁻³—庆阳单斜; I₁⁴—渭北断隆区; I₁⁴⁻¹—彬县—黄陵拗褶带; I₁⁴⁻²—铜川—韩城断褶带; I₁⁵—河东断褶带; I₁⁵⁻¹—准格尔—兴县段; I₁⁵⁻²—兴县—临县段; I₁⁵⁻³—离石—吴堡段; I₁⁵⁻⁴—石楼—乡宁段; I₁⁶—乌拉山—呼和浩特断陷; I₁⁷—汾渭断陷; I₂—阿拉善断块; I₃—阴山断块; I₄—山西断块; I₅—豫皖断块; II—兴蒙褶皱带; III—秦祁褶皱带

Fig.1 Structural sketch of Ordos Basin (modified from Wang Sili et al., 2018)

I—Sino Korean continental plate; I₁—Ordos fault block; I₁¹—Western margin fold and thrust belt; I₁¹⁻¹—Wuda—Zhuozhishan section; I₁¹⁻²—Helanshan—Hengshanbao section; I₁¹⁻³—Majiatan—Tianshuibao section; I₁¹⁻⁴—Shajingzi—Pingliang section; I₁¹⁻⁵—Huating—Longyang section; I₁²—Tianhuan depression; I₁³—Yi Shan monocline; I₁³⁻¹—Dongsheng—Jinbian monocline; I₁³⁻²—Yan'an monocline; I₁³⁻³—Qingyang monocline; I₁⁴—Wei Bei fault uplift area; I₁⁴⁻¹—Binxian—Huangling depression fold belt; I₁⁴⁻²—Tongchuan—Hancheng fault fold belt; I₁⁵—Hedong fault fold belt; I₁⁵⁻¹—Zhungeer—Xingxian section; I₁⁵⁻²—Xingxian—Linxian section; I₁⁵⁻³—Lishi—Wubao section; I₁⁵⁻⁴—Shilou—Xiangning section; I₁⁶—Wu Lashan—Hohhot fault depression; I₁⁷—Fen Wei fault depression; I₂—ALashan fault block; I₃—Yinshan fault block; I₄—Shanxi fault block; I₅—Yu Wan fault block; II—Xing Meng fold belt; III—Qin Qi fold belt

态多为次棱角状,少见次圆状。岩石固结疏松,多以泥质胶结,次为钙质胶结,不含有机质,见水平层理、块状层理及小型的交错层理等。砂岩中可见大量的有机质、碳屑及黄铁矿,该段岩石是塔然高勒地区主要含矿目的层。

直罗组下段(J₂¹)是塔然高勒地区的主要含矿层位。为研究塔然高勒含矿目的层的岩石学特征,对该研究区的12个钻孔进行砂岩样品采取。制作普通薄片21件,薄片厚度为50 mm×25 mm,厚1 mm。通过偏光显微镜对21件薄片进行细致的岩矿鉴定及砂岩碎屑成分统计,可以很好地研究岩石的基本成分、结构、构造、成岩作用及蚀变组合。经过对塔然高勒目的层21件砂岩样品进行岩矿鉴定及碎屑成分的统计,将统计的21件样品碎屑颗粒成分含量,在Folk(1968)的分类图解上进行投图(图4)。由图可知,目的层砂岩大部分样品投点落在IV区,少部分样品投点落在V区,说明塔然高勒含矿目的层砂岩主要以中粗粒长石砂岩为主,次为岩屑长石砂岩。由碎屑颗粒统计可知(表1),塔然高勒含矿目的层砂岩成分成熟度较低(0.8%~4.25%),具有近物源沉积的特点(王思力等,2018)。

4.1 含矿目的层砂岩特征

4.1.1 碎屑特征

塔然高勒含矿目的层砂岩碎屑物主要由石英和长石组成,含少量岩屑、云母、不透明矿物及重矿物。其中石英含量占20%~55%,主要由单晶石英及少量的多晶石英组成(图5a),单晶石英呈他形粒状,薄片中还可见少量石英岩岩屑。部分颗粒具有波状消光。长石含量占25%~67%,多呈他形一半自形板柱状,可见聚片双晶、格子双晶、条纹结构(图5b),部分发生绢云母化。一些薄片见长石颗粒破裂或发生错断。长石以斜长石、钾长石为主,见少量微斜长石、条纹长石,长石镜下多见碳酸盐及不透明矿物沿长石裂隙或解理缝充填,部分颗粒可见碳酸盐矿物沿着裂隙和解理缝交代,或者沿着颗粒边缘交代长石形成港湾状。薄片见少量岩屑,岩屑含量在8%~21%,多为泥岩岩屑和变质岩岩屑。云母主要为黑云母,含量在1%~5%,呈褐色,部分发生绿泥石化。不透明矿物多发生破碎,间隙充填硅质,不透明矿物具有收缩间裂纹,经推断为碎屑颗粒之间的沥青(图5c),含量在1%~4%。碎屑物粒径主要在0.25~0.50 mm的中、粗

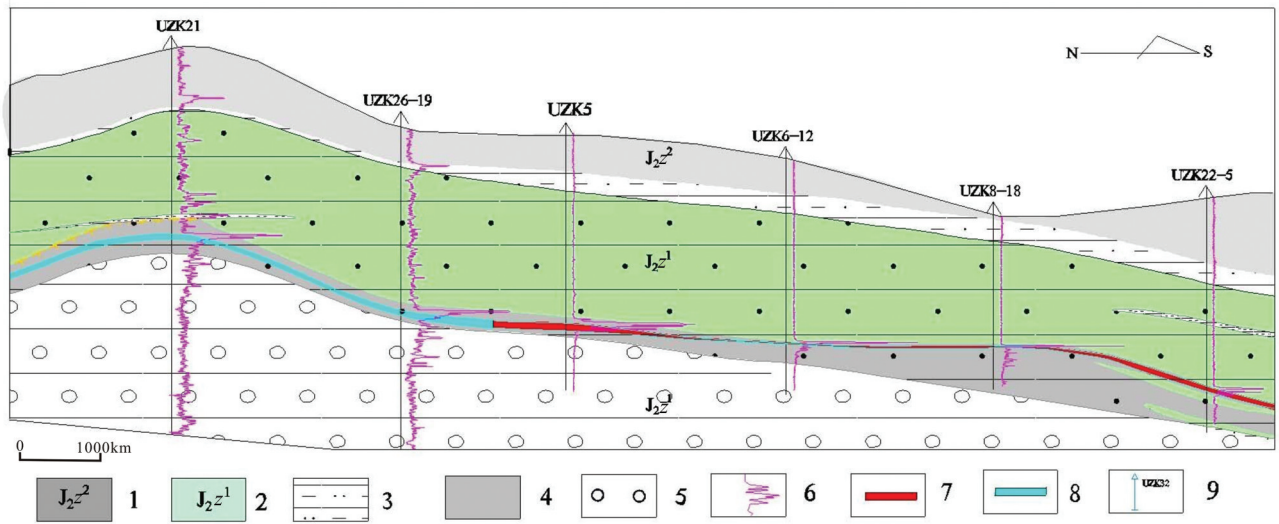


图2 塔然高勒地区部分钻孔采样位置及钻孔柱状示意图

1—中侏罗统直罗组上段;2—中侏罗统直罗组下段;3—中侏罗统直罗组上段砂质泥岩;4—中侏罗统直罗组下段灰色中、粗砂岩;5—中侏罗统直罗组下段灰白色砾岩;6—伽马曲线;7—工业铀矿体;8—铀矿化体;9—钻孔编号及位置

Fig.2 Sampling location and columnar diagram of some boreholes in Tarangaole area

1—Upper member of Middle Jurassic Zhiluo Formation; 2—Lower member of Middle Jurassic Zhiluo Formation; 3—Sandy mudstone of upper Zhiluo Formation of Middle Jurassic; 4—Gray medium and coarse sandstone in the lower part of Zhiluo Formation of Middle Jurassic; 5—Gray white conglomerate of lower Zhiluo Formation of Middle Jurassic; 6—Gamma curve; 7—Industrial uranium ore body; 8—Uranium mineralization hole; 9—Borehole number and location

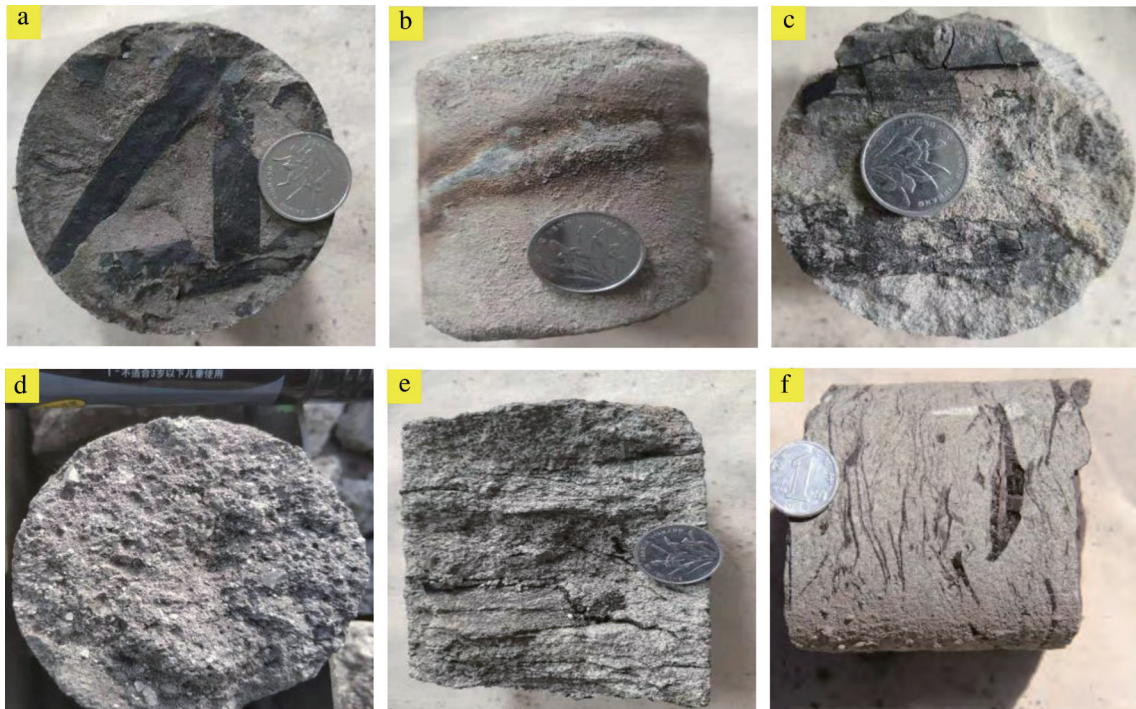


图3 塔然高勒含矿目的层钻孔岩心特征

a—灰色细砂岩中含少量碳屑;b—灰色细砂岩中见黄铁矿结核;c—浅灰色细砂岩中见碳化植物根茎化石;d—灰黑色粗砂岩中见少量紫色斑点;e—灰色中砂岩中含少量碳屑;f—灰色细砂岩中见碳屑

Fig.3 Core characteristics of boreholes in Tarangaole ore-bearing bed

a—Gray fine sandstone contains a small amount of carbon chips; b—Gray fine sandstone has pyrite nodules; c—Light gray fine sandstone has carbonated plant rhizome fossils; d—Gray black coarse sandstone has a small amount of purple spots; e—Gray medium sandstone contains a small amount of carbon chips; f—Gray fine sandstone has carbon chips

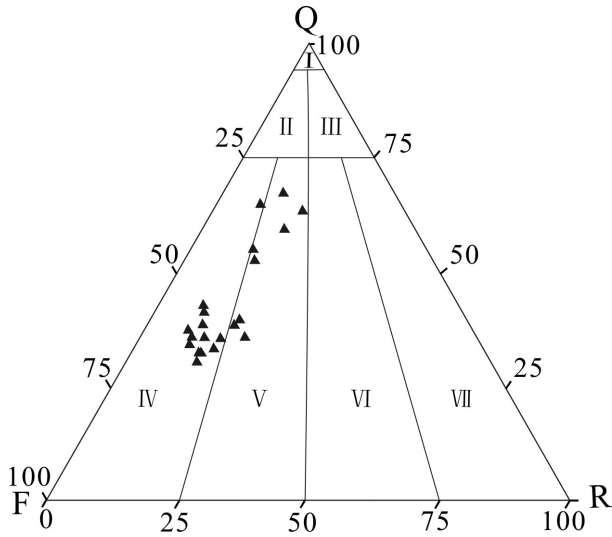


图4 塔然高勒含矿目的层直罗组下段砂岩分类图解
黑色三角与表1中的样品点对应; I—石英砂岩; II—长石石英砂岩; III—岩屑石英砂岩; IV—长石砂岩; V—岩屑长石砂岩; VI—长石岩屑砂岩; VII—岩屑砂岩

Fig.4 Classification diagram of sandstone in the lower member of Zhiluo Formation in Tarangaole ore-bearing bed
The Black triangle corresponds to the sample in the Table 1; I—Quartz sandstone; II—Feldspathic quartz sandstone; III—Lithic quartz sandstone; IV—Arkose; V—Lithic arkose; VI—Feldspathic lithic sandstone; VII—Lithic sandstone

砂级,少量为小于0.25 mm的细砂级,磨圆程度较差,呈次棱角—次圆状,矿物分选较好。

4.1.2 填隙物特征

在岩矿鉴定中,填隙物主要是由黏土、碳酸盐和少量细碎屑杂基组成(张鹏飞等,2018)。塔然高勒含矿目的层砂岩填隙物总体含量在8%~15%,其填隙物主要为绢云母和胶结物,含有少量碳酸盐胶结物(图6a),少量细粉砂质填隙物和碎屑颗粒黏土化产物,部分砂岩可见少量暗色黄铁矿(王思力等,2018)。其中绢云母呈鳞片状结构,分布于碎屑物颗粒之间。胶结物可见铁质、硅质胶结物。胶结物还可见黑云母分布于其他碎屑颗粒之间(图6b)。个别胶结物磨片过程中丢失。

4.1.3 结构特征

砂岩型铀矿的预富集与岩性的孔隙度息息相关,孔隙度能使流体在其中存储和渗滤。流体作用发生的同时也会不断影响岩石中所产生的蚀变矿物。塔然高勒直罗组下段碎屑颗粒磨圆度较差,多以次棱角—次圆状为主。镜下薄片鉴定中,塔然高勒碎屑颗粒多分布在0.20~2.50 mm,含矿目的层中

表1 鄂尔多斯盆地塔然高勒地区砂岩碎屑颗粒含量及成熟度指数统计(%)

Table 1 Statistics of sandstone clastic grain content and maturity index in Tarangaole area, Ordos Basin(%)

序号	采样编号	岩性	钻孔—深度/m	石英(Q)		长石(F)	岩屑(L)	岩屑+ 多晶石英	石英 /(长石+岩屑)
				单晶	多晶				
1	UZK8-15	灰色含砾粗砂岩	UZK8-473.20	30	11	35	8	19	1.05
2	UZK8-27	浅灰色中砂岩	UZK8-666.60	32	13	25	11	24	0.80
3	UK23-09	灰色粗砂岩	UZK23-660.70	43	10	35	16	26	0.96
4	UZK23-14	灰色中砂岩	UZK23-470.90	29	14	40	17	31	1.33
5	UZK29-06	灰白色粗砂岩	UZK29-474.00	30	10	35	15	25	1.25
6	UZK29-19	灰白色泥质粉砂岩	UZK29-475.70	31	15	38	21	36	1.28
7	UZK30-17	灰色中砂岩	UZK30-612.50	15	5	67	18	23	4.25
8	UZK30-18	浅灰色中砂岩	UZK30-655.80	19	6	62	8	14	2.80
9	UZK31-02	灰色细砂岩	UZK31-657.50	15	5	65	11	16	3.80
10	UZK33-12	灰色粗砂岩	UZK33-475.40	35	13	37	10	23	0.98
11	UZK33-14	灰绿色中砂岩	UZK33-565.00	18	7	61	16	23	3.08
12	UZK33-29	灰色粗砂岩	UZK33-645.20	30	5	55	14	19	1.97
13	UZK33-30	灰黑色粗砂岩	UZK33-520.00	45	10	33	13	23	0.84
14	UZK34-07	浅灰色中砂岩	UZK34-685.00	37	11	30	9	20	0.81
15	UZK36-02	灰色粗砂岩	UZK36-468.00	22	8	51	11	19	2.07
16	UZK36-05	浅灰色粗砂岩	UZK36-433.50	35	15	30	12	27	0.84
17	UZK37-10	浅灰色含砾粗砂岩	UZK37-495.20	43	7	35	8	15	0.86
18	UZK37-11	灰色中砂岩	UZK37-474.50	45	10	37	10	20	0.85
19	UZK38-03	灰色粗砂岩	UZK38-655.10	42	8	35	12	20	0.94
20	UZK39-03	浅灰色中砂岩	UZK39-620.30	32	13	40	8	21	1.07
21	UZK40-02	浅灰色含砾粗砂岩	UZK40-644.50	39	11	37	16	27	1.06

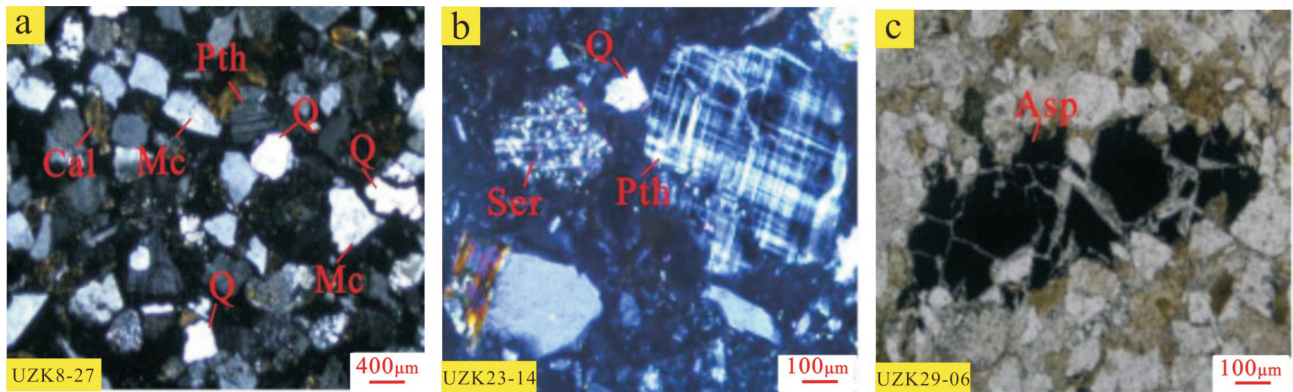


图5 塔然高勒含矿目的层砂岩成分镜下显微照片

a—中粗粒砂状结构；b—斜长石绢云母化；c—破碎的不透明矿物具有收缩间裂痕，为碎屑颗粒之间的沥青；Q—石英；Pth—条纹长石；Mc—微斜长石；Ser—绢云母化；Asp—沥青

Fig.5 Micrographs of sandstone components in Tarangaole ore-bearing bed

a—Medium coarse sand structure；b—Plagioclase sericitization；c—Broken opaque minerals with shrinkage cracks, which are asphalt between clastic particles；Q—Quartz；Pth—Perthite；Mc—Microcline；Ser—Sericitization；Asp—Asphalt

砂岩结构主要以中粒砂状结构、粗粒砂状结构为主(图7a、b), 次为细粒砂状结构(图7c)。中粒砂状结构及粗粒砂状结构岩性疏松, 主要成分以长石及石英为主。岩矿鉴定中主要以碳酸盐胶结为主, 中粒砂状结构及粗粒砂状结构中还可可见少量的黑云母。细粒砂状结构岩性较为疏松, 可见少量的岩屑。含矿目的层中还可可见少量的杂粒砂状结构(图7e), 主要岩性为中砂岩及细砂岩。其中杂粒砂状结构中, 成分主要以微斜长石及少量的岩屑为主, 胶结物主要为碳酸盐化。含矿目的层薄片中还可见少量的泥质结构与粉粒砂状结构共存(图7f), 岩性多为泥

质粉砂岩, 镜下鉴定中该类砂岩可见少量的伊利石化、绢云母化及黑云母化。以上砂岩碎屑结构中, 颗粒接触均呈点接触, 少见缝合线接触, 胶结类型以孔隙式胶结为主, 碎屑颗粒分选中等, 反映了砂岩总体结构成熟度较低、近物源快速沉积的特点。

4.2 成岩作用

沉积物沉积后会固结成岩, 在固结成岩的过程中, 会随着深埋环境条件下不断地发生物理、化学的变化。在物理、化学变化的同时, 成岩作用也会对岩石形成不同的影响。塔然高勒含矿目的层中主要成岩作用包括压实作用、胶结作用、溶蚀作用。

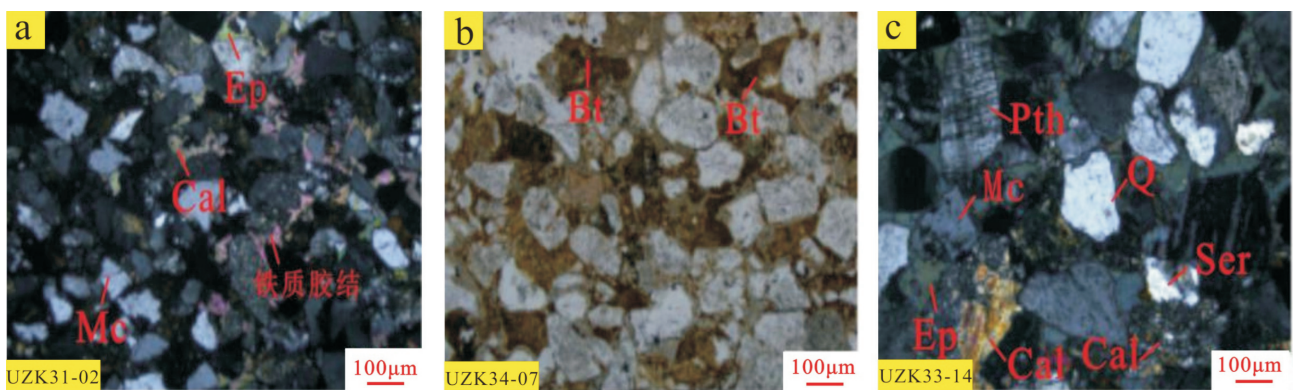


图6 塔然高勒含矿目的层砂岩填隙物镜下显微照片

a—细砂岩中见碳酸盐胶结物及铁泥质胶结物；b—分布于其他碎屑颗粒之间的黑云母, 起胶结作用；c—粗砂岩中见绿帘石化、绢云母化、碳酸盐胶结物；Ep—绿帘石化；Cal—碳酸盐化；Mc—微斜长石；Bt—黑云母；Ser—绢云母化；Q—石英

Fig.6 Micrographs of sandstone interstitial matter in Tarangaole ore-bearing bed

a—Carbonate cement and iron argillaceous cement are found in fine sandstone；b—Biotite distributed between other clastic particles plays the role of cementation；c—Epidotization, sericitization and carbonate cement are found in coarse sandstone；Ep—Epidotization；Cal—Carbonation；Mc—Microcline；Bt—Biotite；Ser—Sericitization；Q—Quartz

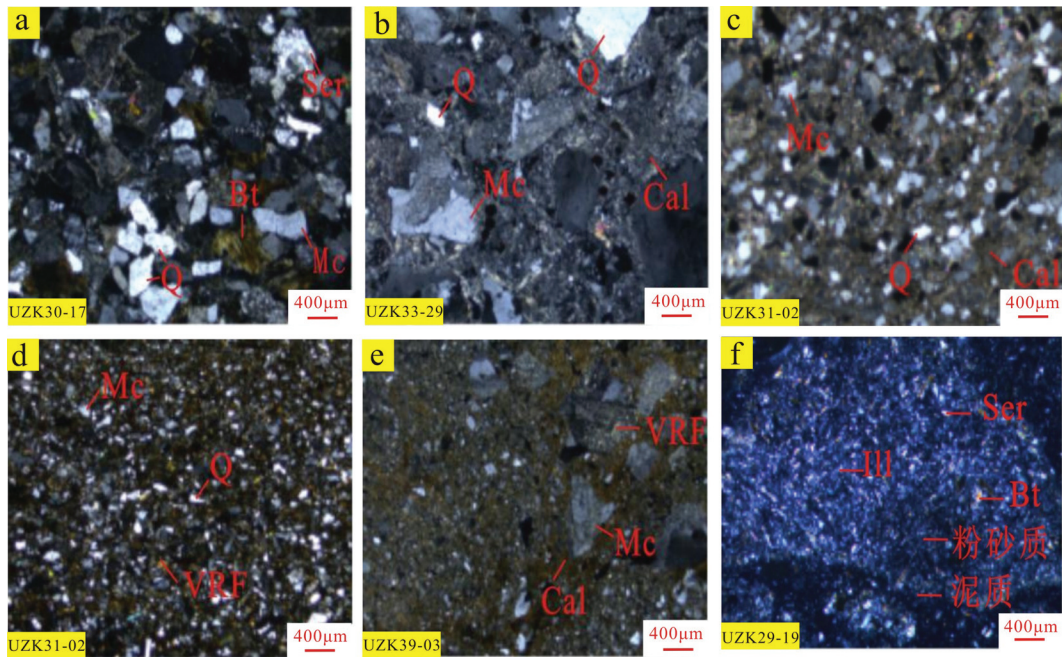


图7 塔然高勒含矿目的层砂岩结构镜下显微照片

a—中粒砂状结构;b—粗粒砂状结构;c—细粒砂状结构;d—细粒砂状结构;e—杂粒砂状结构;f—泥质粉砂岩中的绢云母化、黑云母、伊利石化,形成杂粒砂状结构;Q—石英;Bt—黑云母;Ser—绢云母化;Mc—微斜长石;Cal—碳酸盐化;VRF—火山岩碎屑;Ill—伊利石化

Fig.7 Micrographs of sandstone structure in Tarangaole ore-bearing bed

a—Medium grain sand structure; b—Coarse-grained sand structure; c—Fine-grained sand structure; d—Fine-grained sand structure; e—Miscellaneous grain sand structure; f—Sericitization, biotite and illitization in argillaceous siltstone, forming mixed grain sand structure; Q—Quartz; Bt—Biotite; Ser—Sericitization; Mc—Microcline; Cal—Carbonation; VRF—Volcanic clastic; Ill—Illitization

4.2.1 压实作用

压实作用是沉积岩形成的基本条件,岩石会随着不同的压实作用,形成不同形态的蚀变矿物。经过显微镜镜下鉴定,塔然高勒含矿目的层砂岩经历了一定的机械压实作用,主要可见如下现象:(1)少部分砂岩中可见黑云母等塑性岩屑沿长轴方向弯曲变形(图8a),甚至部分呈定向排列,形成了一定的压实定向组构(图5a);另外在少部分砂岩中,可见破碎的不透明矿物具有收缩间裂痕,经岩矿鉴定,为碎屑颗粒之间的沥青。(2)研究区大部分长石、石英、碎屑颗粒发生了错断位移,少量石英及云母具波状消光,这些现象都说明了该研究区岩石经历了一定的压实作用。

4.2.2 胶结作用

胶结作用能把矿物的颗粒黏结起来变成固结的岩石,沉积岩不断的受物理化学、生物化学的沉淀作用,形成的胶结作用也不尽相同。同时,一定的胶结物也反映了沉积作用的变化及特征。经野外岩矿鉴定,塔然高勒含矿目的层胶结作用主要以

泥质胶结为主,少量砂岩中可见黑云母、浸染状的黄铁矿胶结。室内岩矿鉴定中,主要以碳酸盐胶结为主,碳酸盐胶结多呈透镜状产出,薄片大量的碳酸盐化沿裂隙充填(图6a),充填过程中胶结了大量的颗粒碎屑。含矿目的层黏土矿物主要为伊利石化(图7f),未见伊—蒙混层和绿—蒙混层(王思力等,2018),钙质胶结以少量方解石为主。

4.2.3 溶蚀作用

沉积岩容易受到含氧含矿流体的影响,含氧含矿流体加速了岩石的机械溶蚀作用,同时溶蚀作用也改变了储集层的渗透性。含矿目的层中被溶蚀的矿物主要有石英、长石、岩屑及方解石。矿物被溶蚀后颗粒表面形成溶蚀孔隙或在颗粒边缘形成港湾状结构。而碳酸盐胶结物被流体溶蚀后,多形成碳酸盐化,形成碳酸盐化后的胶结物充填了被溶蚀的孔隙(图8b)。塔然高勒含矿目的层中,溶蚀后的裂隙中可见少量的有机质矿物及不透明矿物(图8c)。溶蚀作用的产生不仅为铀矿的存储及富集提供了条件,也为铀矿的迁移提供了运移通道。

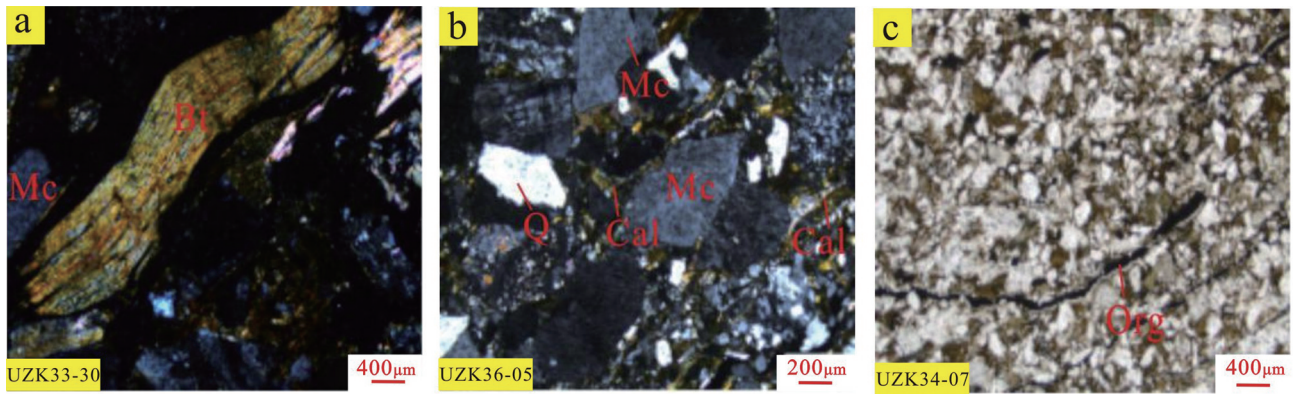


图8塔然高勒含矿目的层砂岩溶蚀作用镜下显微照片

a—白云母的扭折现象;b—受流体作用影响,形成的碳酸盐胶结物;c—裂隙中分布的不透明矿物;Q—石英;Mc—微斜长石;Bt—黑云母;Cal—碳酸盐化;Org—炭屑

Fig.8 Micrographs of dissolution sandstone in Tarangaole ore-bearing bed

a—Biotite kink phenomenon; b—Carbonate cement formed by fluid action; c—Opaque minerals distributed in fractures; Q—Quartz; Mc—Microcline; Bt—Biotite; Cal—Carbonation; Org—Carbon chips

4.3 成岩作用与铀成矿关系

塔然高勒含矿目的层砂岩主要以长石岩屑砂岩为主,次为岩屑长石砂岩。直罗组下段在成岩过程中明显发育压实、胶结及溶蚀作用。压实及胶结作用使原生空隙逐步变小,孔隙的逐步变小不利于铀矿的富集。而后期含矿含氧水的不断渗入,使砂岩不间断的发生溶蚀作用。在溶蚀作用形成的过

程中,砂岩中的矿物不断的形成次生孔隙。次生孔隙的形成完善了岩石孔隙度和孔隙间的连通性。完善后的岩石孔隙度及孔隙间的连通性为铀矿的运移和沉积提供了良好的储集环境,使沥青铀矿及铀石很好地赋存于溶蚀坑内或胶结物中。通过镜下薄片等分析手段发现铀矿多与黄铁矿及有机质矿物共同分布,表明黄铁矿及有机质矿物为铀矿物

表2 鄂尔多斯盆地塔然高勒地区铀矿物电子探针分析结果(%)

Table 2 Results of electron microprobe analysis of uranium minerals in Tarangaole area, Ordos Basin (%)

点号	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	TiO ₂	FeO	V ₂ O ₅	UO ₂	ThO ₂	PbO	K ₂ O	MnO	Total	铀矿类型
UZK5-22-3	0.27	0.33	0.60	9.01	0.23	1.21	—	1.93	0.07	82.80	—	0.10	0.55	0.05	97.15	沥青铀矿
UZK5-22-4	0.35	0.22	0.79	8.67	0.30	1.04	—	0.32	0.10	84.46	0.01	0.13	0.03	—	96.41	沥青铀矿
UZK5-22-5	0.32	0.23	0.42	8.42	1.71	1.03	0.08	0.35	0.07	83.11	—	0.02	0.12	0.07	95.94	沥青铀矿
UZK5-22-6	0.43	0.26	0.49	7.86	1.97	1.91	0.09	0.41	0.08	82.67	—	0.02	0.14	0.15	96.47	沥青铀矿
UZK22-5-1	0.27	0.06	0.39	10.03	1.73	0.08	—	0.13	0.11	85.46	—	0.09	0.21	0.07	98.64	沥青铀矿
UZK22-5-5	0.31	0.08	0.26	9.78	1.03	0.10	—	0.16	0.13	83.17	—	0.10	0.25	0.20	95.56	沥青铀矿
UZK6-12-3	0.11	—	0.43	16.52	1.35	0.01	—	0.24	0.08	78.48	—	—	0.12	0.07	97.40	铀石
UZK6-12-5	0.13	—	0.52	21.15	1.63	0.01	—	0.28	0.09	70.79	—	—	0.17	0.08	94.85	铀石
UZK6-12-6	0.44	—	0.36	16.04	0.14	0.11	0.01	0.41	0.01	77.94	0.46	0.05	0.15	0.10	96.22	铀石
UZK8-18-5	0.55	—	0.45	18.30	0.18	0.14	0.02	0.41	0.02	76.01	0.57	0.06	0.19	0.12	97.00	铀石
UZK8-18-7	0.13	0.57	0.48	17.89	0.75	0.07	—	0.78	—	70.81	—	0.05	0.12	0.06	91.70	铀石
UZK8-18-8	0.15	0.68	0.58	16.73	0.90	0.08	—	0.94	—	74.72	—	0.06	0.14	0.07	95.05	铀石
UZK8-18-9	0.54	0.25	0.75	15.80	2.28	0.04	0.03	0.62	—	73.74	—	0.06	0.18	0.11	94.39	铀石
UZK16-15-1	0.12	0.10	0.57	18.97	0.62	0.07	0.13	0.26	0.35	75.27	1.76	—	0.23	—	98.44	铀石
UZK16-15-2	0.38	—	0.54	20.62	0.38	0.18	1.30	0.64	0.15	70.60	—	0.08	0.23	—	95.11	铀石
UZK16-15-5	0.45	—	0.38	17.73	0.31	0.03	—	—	0.17	77.54	—	0.01	0.26	—	96.89	铀石
UZK26-19-1	0.04	0.01	0.54	1.28	2.03	3.15	35.24	0.07	0.17	39.09	—	0.01	0.21	—	81.83	钛铀矿
UZK26-19-4	0.05	0.01	0.69	1.75	2.57	2.31	38.32	0.08	0.22	35.24	0.00	0.01	0.27	—	81.53	钛铀矿
UZK21-11-1	0.17	—	1.56	9.10	0.64	0.02	12.23	0.06	0.04	56.23	—	0.07	0.10	—	80.21	含钛铀矿
UZK21-11-4	0.14	0.16	1.97	10.02	1.70	—	13.02	0.34	0.05	53.61	—	—	0.51	—	81.52	含钛铀矿

注:测试单位为西安地质调查中心实验测试中心,所用仪器为日本电子公司的JXA-8100型电子探针,所用电压为15.0 kV,探针束流100 nA,束斑直径为1 µm,“—”表示未测出。

的形成提供了还原剂(吴柏林等,2016)。新生黏土矿物在铀矿富集时表现出吸附作用,使铀以吸附态的形式富集沉淀(黄广文等,2017)。塔然高勒含矿目的层中发育一系列后生蚀变现象,常见有碳酸盐化、伊利石化、绿泥石化、钛铁矿化、绢云母化及黑云母化等。通过以上矿物的发现,表明目的层砂体多疏松多孔,连通性、渗透性好。各黏土矿物在一定的物理化学条件下发生相互转变,进一步改变赋矿砂体的地球化学环境,为铀成矿及后期改造提供了非常优越的流体通道(王思力等,2018)。

5 铀矿物岩石学特征

5.1 电子探针定量分析

铀矿床的形成需要砂岩提供一定的运移通道,良好的运移通道有利于铀矿的富集及运移。塔然

高勒砂岩型铀矿主要以沥青铀矿、铀石及少量的钛铀矿、含钛铀矿为主。沥青铀矿 UO_2 含量 82.67%~85.46%, 平均值 83.61%; SiO_2 含量 7.86%~10.03%, 平均值为 8.96%; CaO 含量 0.08%~1.91%, 平均值为 0.89%(表2)。沥青铀矿总体表现为 UO_2 含量较高, SiO_2 与 CaO 含量偏低。铀石的 UO_2 含量 70.60%~78.48%, 平均值为 74.59%; SiO_2 含量 15.80%~21.15%, 平均值为 17.97%; CaO 含量 0.01%~0.18%, 平均值为 0.08%。塔然高勒含矿目的层中铀石相对沥青铀矿总体上表现为 UO_2 含量较低, SiO_2 含量有所升高, CaO 含量相对下降。塔然高勒含矿目的层中还可见少量的钛铀矿及含钛铀矿。钛铀矿是铀与钛的复杂氧化物矿物, 目的层中钛铀矿的 UO_2 含量 35.24%~39.09%, 平均值为 37.16%; SiO_2 含量 1.28%~1.75%, 平均值为 1.52%; CaO 含量 2.31%~

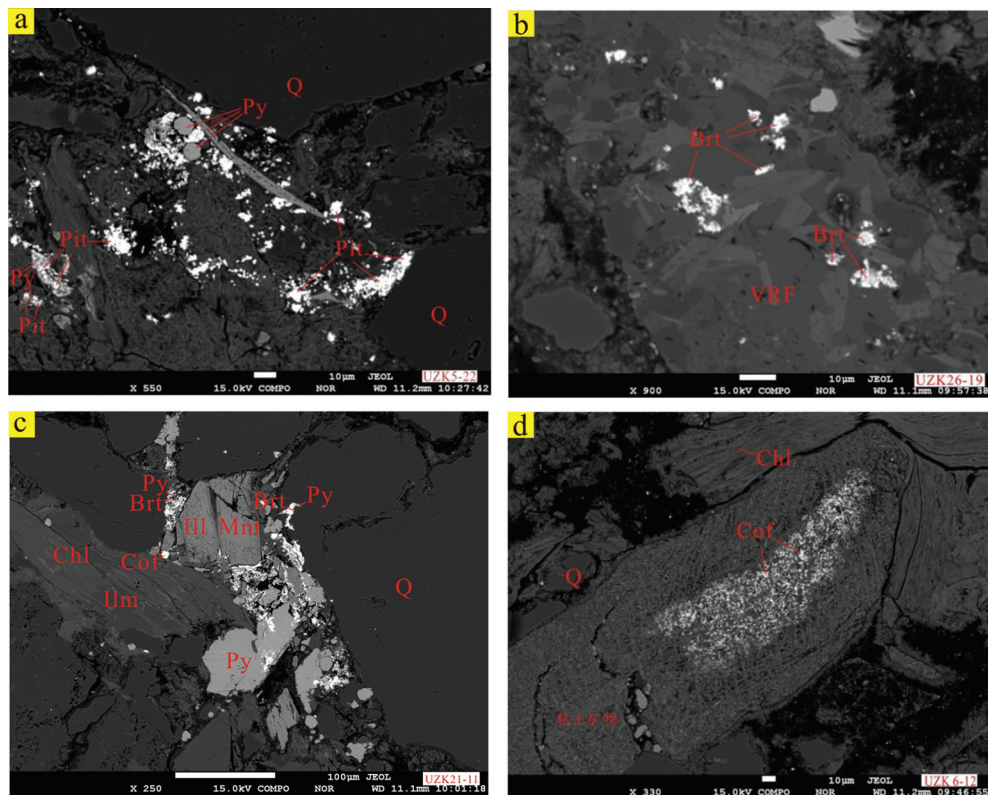


图9 塔然高勒含矿目的层铀矿物镜下特征

a—沥青铀矿与黄铁矿共生;b—火山岩碎屑裂隙中见星散状钛铀矿;c—黄铁矿中见少量含钛铀矿,钛铁矿边缘部见少量钛铀矿;d—黏土矿物中见星点状铀石;Q—石英;Py—黄铁矿;Pit—沥青铀矿;Brt—钛铀矿;VRF—火山岩碎屑;Ill, Mnt—伊利石化及蒙脱石化;Chl—绿泥石化;Cof—铀石;Ilm—钛铁矿

Fig.9 Microscopical characteristics of uranium minerals in Tarangaole ore-bearing bed

a—Pitchblende is associated with pyrite; b—Scattered uraninite is found in clastic fracture of volcanic rock; c—A small amount of uraninite is found in pyrite, and a small amount of ilmenite is found at the edge of ilmenite; d—Star like uraninite is found in clay minerals; Q—Quartz; Py—Pyrite; Pit—Pitchblende; Brt—Brannerite; VRF—Volcanic clastic; Ill, Mnt—Illitization and montmorillification; Chl—Chloritization; Cof—Coffinite; Ilm—Ilmenite

3.15%, 平均值为2.73%; TiO_2 含量35.24%~38.32%, 平均值为36.78%。目的层中的铀矿相对沥青铀矿总体上表现为 UO_2 含量较低, TiO_2 含量偏高, SiO_2 含量相对下降, CaO 含量趋于稳定。含铀矿的 UO_2 含量介于53.61%~56.23%, 平均值为54.92%; SiO_2 含量介于9.10%~10.02%, 平均值为9.56%; CaO 含量较低; TiO_2 含量介于12.23%~13.02%, 平均值为12.63%。含铀矿相对沥青铀矿总体上表现为 UO_2 含量较低, TiO_2 含量相对于铀矿含量偏低, SiO_2 含量相对沥青铀矿较为稳定, CaO 含量较低(祁家明等, 2014)。

5.2 铀矿物的分布形态

通过电子探针分析及显微镜下观察, 塔然高勒含矿目的层铀矿物赋存形式多样, 依据矿物形态、分布位置、矿物伴生等特征, 可将塔然高勒含矿目的层铀矿物进行分类:

(1) 沥青铀矿呈他形晶不规则粒状、鲕粒状、小团块状沿黄铁矿及碳屑边缘分布, 表明黄铁矿及有机质矿物为铀矿的形成提供了还原、沉淀环境(图9a)。

(2) 在背散射图片上, 铀矿呈不规则星点状沿火山岩屑周边及裂隙分布, 还可见铀矿呈星散状沿黄铁矿及钛铁矿边缘分布(图9b、c)。由此可知, 重矿物受成岩作用影响, 在砂岩裂隙中先形成, 后期吸附铀矿物在其周围沉淀成矿。同时, 黏土矿物及重矿物受含铀含氧水的影响, 不断释放出与铀矿相关的元素含量。黏土矿物及重矿物释放出的元素含量与含铀含氧水发生化学反应, 在砂岩孔隙及裂隙周围形成铀矿物, 表明铀矿物的运移赋存与黏土矿物及重矿物关系较为密切。

(3) 在背散射图像中, 少量铀石呈粉末状及星散状分布在黏土矿物、石英碎屑周围, 表明在成岩作用过程中, 黏土矿物及石英受到压实作用及溶蚀作用的影响, 逐渐产生了孔隙及裂隙, 后期铀矿物随着含铀含氧水的不断渗入, 充填了先期形成的孔隙及裂隙, 形成了粉末状及星散状的铀石(图9d)。

6 结 论

通过显微镜下鉴定、电子探针等分析测试手段研究塔然高勒中侏罗统直罗组下段砂岩岩石学特征及铀矿物的存在形式, 得出以下结论:

(1) 塔然高勒中侏罗统直罗组下段砂岩以长石

岩屑砂岩和岩屑长石砂岩为主, 成分成熟度和结构成熟度较低, 具有近物源沉积的特点。塔然高勒含矿目的层砂岩结构主要以中粒砂状结构、粗粒砂状结构为主, 细粒砂状结构及杂粒砂状结构为辅。

(2) 塔然高勒地区矿石电子探针分析结果表明, 该地区铀矿物主要以沥青铀矿、铀石及少量的钛铀矿、含钛铀矿为主, 铀矿物多与黄铁矿及有机质矿物密切共生, 表明黄铁矿及有机质矿物为铀矿物的形成提供了还原剂。

(3) 塔然高勒铀矿物主要呈粒状、鲕粒状、小团块状沿黄铁矿、钛铁矿、黏土矿物边缘分布在填隙物中。观察含矿目的层砂岩中的蚀变现象及蚀变矿物特征, 表明各黏土矿物及重矿物在一定的物理化学条件下发生了相互转变, 地球化学环境的改变造成了黏土矿物及重矿物间的相互转化, 进一步改变了赋矿砂体的地球化学环境。使铀矿物在碎屑颗粒溶蚀坑内、胶结物中沉淀成矿, 形成了粒状、鲕粒状、小团块状、粉末状及星散状的铀矿物。

致谢: 感谢审稿专家及责任编辑对该论文提出宝贵的修改意见。

References

- Chen Daisheng, Wang Ruiying, Li Shengxiang, Zhang Kefang. 1996. Metallogenic mechanism and model of sandstone type uranium deposits in Yili Basin [J]. *Journal of East China Geological Institute*, 19(4): 321–331 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Yinhang, Zhang Tianfu, Zeng Wei, Hu Peng, Liu Xing, Yang Jun, Qu Kai, Wang Shaoyi, Cheng Xianyu, Ao Cong, Jin Ruoshi, Miao Peisen. 2020. The driving force of the abnormal enrichment of sandstone type uranium in Mesozoic Cenozoic basins in northern China [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(4): 590–606 (in Chinese with English abstract).
- Folk R L. 1968. *Petrology of Sedimentary Rocks*[M]. Austin Texas: Hemphills.
- Huang Guangwen, Pan Jiayong, Zhang Zhanfeng, Huang Guangnan, Zhang Tao, Liao Zhiquan, Du Houfa. 2017. Study on the petrological characteristics of ore bearing sandstone and the distribution of uranium minerals in Mengqigu uranium deposit by using electron probe [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 36 (2): 196–207 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Hong, Zhang Zhanfeng, Liu Mingyan. 2011. The relationship between the structure of a deposit in the southern margin of the Yili Basin and uranium mineralization[J]. *Xinjiang Geology*, 29(3): 327–331(in Chinese with English abstract).

- Jin Ruoshi, Cheng Yinhang, Li Jianguo, Sima Xianzhang, Miao Peisen, Wang Shaoyi, Ao Cong, Li Hongliang, Li Yanfeng, Zhang Tianfu. 2017. Constraints of coupled production of red black rock series in Late Mesozoic continental basins in northern China on the metallogenic environment of sandstone type uranium deposits [J]. *Geology in China*, 44 (2): 205–223(in Chinese with English abstract).
- Kang Yong, Wang Bing. 2010. Mineralization of Mengqiguer uranium deposit in the southern margin of Yili Basin by leakage recharge[J]. *Xinjiang Geology*, 28 33(3): 316–318 (in Chinese with English abstract).
- Li Shengxiang, Han Xiaozhong, Cai Yuqi, Zheng Enjiu, Wang Baoqun. 2006. The sedimentary system of the Middle Lower Jurassic Shuixigou Group in the western segment of the southern margin of the Yili Basin and its control over uranium mineralization [J]. *Geology in China*, 33(3): 582–590(in Chinese with English abstract).
- Liu Ran. 2018. Characteristics of Natural Alkali and Soda Stone of the Permian Fengcheng Formation in the Wu Erhe Area of Junggar Basin and their Indications for the Paleoenvironment[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1–71(in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaoxue, Yu Renan, Cao Huifeng, Zhu Qiang, Wang Shanbo, Yang Jun. 2018. Metallogenic conditions of sandstone type uranium deposits in coal bearing areas in the southeast margin of Ordos Basin [J]. *Coal Geology & Exploration*, 46 (6): 26–32(in Chinese with English abstract).
- Liu Zhengbang. 2010. Analysis of uranium mineralization conditions in Baobaogou section of Husiliang area [J]. *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 29 (S1): 92–97(in Chinese with English abstract).
- Liu Zhongren. 2018. Metagenetic Alteration Characteristics of Daying Uranium Deposit and its Guiding Significance for Subsequent Exploration [D]. Changchun: Jilin University, 1–75(in Chinese with English abstract).
- Qi Jiaming, Huang Guolong, Zhu Ba, Fu Shuncheng, Xu You, Ye Songxin. 2014. Study on characteristics of accessory minerals in altered granite of Mianhuakeng uranium deposit in northern Guangdong [J]. *Acta Geologica Sinica*, 88 (9): 1691–1704(in Chinese with English abstract).
- Qiu Yubo, Yi Haisheng, Wang Guo, Zhang Zhanfeng, Liu Junping, Jiang Hong, Luo Xinggang, Du Mo, Zhang Lei. 2014. Sedimentary characteristics of the upper member of the Middle Jurassic Xishanyao Formation in Honghaigou area of the Yili Basin and its relationship with uranium mineralization [J]. *Journal of Palaeogeography*, 16 (4): 537–547(in Chinese with English abstract).
- Tu Ying, Ren Zhiyong, Li Shuguang. 2016. Study on the geological conditions of uranium mineralization in Ordos area [J]. *Sichuan Nonferrous Metals*, (4): 43–46 (in Chinese with English abstract).
- Wang Bing, Kang Yong, Zhang Daxu. 2009. Relationship between hydrogeochemical characteristics and uranium mineralization in Mengqiguer area[J]. *Xinjiang Geology*, 27 (4): 364–367(in Chinese with English abstract).
- Wang Bing, Kang Yong, Zhang Daxu. 2015. Preliminary study on the genesis of large rich ore bodies in Mengqiguer uranium deposit[J]. *Xinjiang Geology*, 33 (3): 358–361(in Chinese with English abstract).
- Wang Juntang, Wang Chengwei, Feng Shirong. 2008. The relationship between basin mountain tectonic evolution and fluid evolution of Yili basin and sandstone type uranium mineralization[J]. *Uranium Geology*, 24(1): 38–42(in Chinese with English abstract).
- Wang Sili, Nie Fengjun, Yan Zhaobin, He Naishuo, Zhang Yuanyuan, Zhang Pengfei. 2018. Petrology of the target bed and the existing form of uranium in the Nalinggou uranium deposit of Ordos Basin [J]. *Geology in China*, 45(3): 573–590(in Chinese with English abstract).
- Wang Yanguo, Liu Peng, Nie Fengjun, Zhang Jin, Chen Hu. 2017. Application of gravity and magnetic exploration methods in sandstone type uranium deposits [J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 40 (1): 42–46(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhengbang. 2002. Present situation and prospect of geological development of in situ leachable sandstone type uranium deposits abroad[J]. *Uranium Geology*, 18(1): 9–21(in Chinese with English abstract).
- Wu Bolin, Zhang Wanying, Song Zisheng, Cun Xiaoni, Sun Li, Luo Jingjing, Li Yanqing, Cheng Xianghu, Sun Bin. 2016. Geological and geochemical characteristics of uranium minerals in sandstone type uranium deposits in the northern Ordos Basin and their genetic significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(12): 3393–3407(in Chinese with English abstract).
- Wu Cuilian, Liu Zhichao, Ma Jia, Tang Baobin. 2015. Study on the occurrence state of uranium in Huayangchuan polymetallic deposit [J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 34 (1): 30–34(in Chinese with English abstract).
- Wu Weitao, Gao Xianzhi, Liu Xingzhou, Li Li, Zhang Dongwei, Liu Bao. 2014. Formation and distribution of bedrock reservoirs [J]. *Geological Science and Technology Information*, 33(1): 106–113 (in Chinese with English abstract).
- Xiu Xiaoqian, Liu Hongxu, Zhang Yuyan, Suo Shixin. 2015. Study on ore-forming fluid of Mengqiguer uranium deposit in Xin Jiang [J]. *Mineral Deposits*, 34(3): 488–496 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jindai. 2003. Some consideration on current uranium geological work [J]. *Uranium Geology*, 19(6): 321–325 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Long, Chen Zhenyu, Tian Zejin, Huang Guolong. 2016. Application of electron probe dating method to the uranium mineral age study of the Changjiang intrusion in northern

- Guangdong [J]. Rock and Mineral Analysis, 35(1): 98–107(in Chinese with English abstract).
- Zhang Pengfei, Nie Fengjun, Zhang Chengyong, Zhang Hujun, Dong Yadong, Zhang Xin. 2018. Sandstone characteristics and metallogenetic significance of uranium deposits in Lang Ka Yili Basin area [J]. Science Technology and Engineering, 18(9): 29–38 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qiang. 2017. Geochemical Characteristics and Genesis of Wuliji Aobao Fluorite Deposit in the Southern Section of the Great Hinggan Mountains [D]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology, 1–69(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhanfeng, Jiang Hong, Wang Maomao. 2010. Metallogenic driving factors of Mengqiguer uranium deposit and their significance in prospecting practice in Yili Basin[J]. Mineral Deposits, 29 (Supp.): 165–166(in Chinese with English abstract).
- Zhu Qiang, Yu Renan, Li Jianguo, Sima Xianzhang, Si Qinghong, Li Guangyao, Wen Sibao, Liu Xiaoxue, Wang Shanbo. 2018. Control of sandstone type uranium deposits by reducing media in Taran Gaole area, northeastern Ordos Basin [J]. Coal Geology & Exploration, 46 (6): 11–18(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈戴生, 王瑞英, 李胜祥, 张克芳. 1996. 伊犁盆地砂岩型铀矿成矿机制及成矿模式[J]. 华东地质学院学报, 19(4): 321–331.
- 程银行, 张天福, 曾威, 胡鹏, 刘行, 杨君, 曲凯, 王少轶, 程先钰, 奥琮, 金若时, 苗培森. 2020. 中国北方中生代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.
- 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.
- 蒋宏, 张占峰, 刘铭艳. 2011. 伊犁盆地南缘某矿床构造与铀成矿关系[J]. 新疆地质, 29(3): 327–331.
- 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矿成矿环境的制约[J]. 中国地质, 44(2): 205–223.
- 康勇, 王冰. 2010. 伊犁盆地南缘蒙古古尔铀矿床越流补给成矿作用[J]. 新疆地质, 28(3): 316–318.
- 李胜祥, 韩效忠, 蔡煜琦, 郑恩玖, 王保群. 2006. 伊犁盆地南缘西段中下侏罗统水西沟群沉积体系及其对铀成矿的控制作用[J]. 中国地质, 33(3): 582–590.
- 刘冉. 2018. 准噶尔盆地乌尔禾地区二叠系风城组天然碱与苏打石特征及其对古环境的指示[D]. 成都: 成都理工大学, 1–71.
- 刘晓雪, 俞初安, 曹惠锋, 朱强, 王善博, 杨君. 2018. 鄂尔多斯盆地东南缘含煤区砂岩型铀矿成矿条件[J]. 煤田地质与勘探, 46(6): 26–32.
- 刘正邦. 2010. 呼斯梁地区宝贝沟地段铀成矿条件分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 29(S1): 92–97.
- 刘忠仁. 2018. 大营铀矿床后生蚀变特征及其对后续勘查的指导意义[D]. 长春: 吉林大学, 1–75.
- 祁家明, 黄国龙, 朱捌, 伏顺成, 许幼, 叶松鑫. 2014. 粤北棉花坑铀矿床蚀变花岗岩副矿物特征研究[J]. 地质学报, 88(9): 1691–1704.
- 邱余波, 伊海生, 王果, 张占峰, 刘俊平, 蒋宏, 罗星刚, 杜默, 张磊. 2014. 伊犁盆地洪海沟地区中侏罗统西山窑组上段沉积特征及其与铀成矿的关系[J]. 古地理学报, 16(4): 537–547.
- 涂颖, 任志勇, 李曙光. 2016. 鄂尔多斯地区铀矿成矿地质条件研究[J]. 四川有色金属, (4): 43–46.
- 王冰, 康勇, 张大绪. 2009. 蒙古古尔地区水文地球化学特征与铀成矿关系[J]. 新疆地质, 27(4): 364–367.
- 王冰, 康勇, 张大绪. 2015. 蒙古古尔铀矿床富大矿体成因初探[J]. 新疆地质, 33(3): 358–361.
- 王军堂, 王成渭, 冯世荣. 2008. 伊犁盆地盆—山构造演化及流体演化与砂岩型铀成矿的关系[J]. 铀矿地质, 24(1): 38–42.
- 王思力, 聂逢君, 严兆彬, 何乃烁, 张媛媛, 张鹏飞. 2018. 鄂尔多斯盆地纳岭沟铀矿床目的层岩石学及铀存在形式[J]. 中国地质, 45(3): 573–590.
- 王彦国, 刘鹏, 聂逢君, 张瑾, 陈虎. 2017. 重磁勘探方法在砂岩型铀矿中的应用[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 40(1): 42–46.
- 王正邦. 2002. 国外地浸砂岩型铀矿地质发展现状与展望[J]. 铀矿地质, 18(1): 9–21.
- 吴柏林, 张婉莹, 宋子升, 寸小妮, 孙莉, 罗晶晶, 李艳青, 程相虎, 孙斌. 2016. 鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿铀矿物地质地球化学特征及其成因意义[J]. 地质学报, 90(12): 3393–3407.
- 吴伟涛, 高先志, 刘兴周, 李理, 张东伟, 刘宝. 2014. 基岩油气藏的形成与分布[J]. 地质科技情报, 33(1): 106–113.
- 武翠莲, 刘志超, 马嘉, 唐宝彬. 2015. 华阳川多金属矿床中铀的赋存状态研究[J]. 铀矿冶, 34(1): 30–34.
- 修晓茜, 刘红旭, 张玉燕, 所世鑫. 2015. 新疆蒙古古尔铀矿床成矿流体研究[J]. 矿床地质, 34(3): 488–496.
- 张金带. 2003. 关于当前铀矿地质工作的几点思考[J]. 铀矿地质, 19(6): 321–325.
- 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.
- 张鹏飞, 聂逢君, 张成勇, 张虎军, 董亚栋, 张鑫. 2018. 伊犁盆地郎卡地区铀矿目的层砂岩特征及成矿意义[J]. 科学技术与工程, 18(9): 29–38.
- 张强. 2017. 大兴安岭南段乌力吉敖包萤石矿床地球化学特征与成因探讨[D]. 成都: 成都理工大学, 1–69.
- 张占峰, 蒋宏, 王毛毛. 2010. 蒙古古尔铀矿床成矿驱动因素及其在伊犁盆地找矿实践中的意义[J]. 矿床地质, 9(增刊): 165–166.
- 朱强, 俞初安, 李建国, 司马献章, 司庆红, 李光耀, 文思博, 刘晓雪, 王善博. 2018. 鄂尔多斯盆地东北部塔然高勒地区还原介质对砂岩型铀矿的控制[J]. 煤田地质与勘探, 46(6): 11–18.