

DOI: 10.16108/j.issn1006-7493.2019069

引用格式: 赵岳, 李轲岩, 徐强, 范晶晶, 丁蓉, 霍超. 2020. 松辽盆地东南缘下白垩统沙河子组铀矿化特征及成矿潜力[J]. 高校地质学报, 26 (3): 294-302

松辽盆地东南缘下白垩统沙河子组铀矿化特征及成矿潜力

赵岳¹, 李轲岩¹, 徐强^{1*}, 范晶晶², 丁蓉³, 霍超¹

1. 中国煤炭地质总局勘查研究总院, 北京100039;
2. 中国石油勘探开发研究院, 北京100083;
3. 中石油煤层气有限责任公司, 北京100028

摘要: 依据钻孔岩心、测井曲线及样品测试数据, 分析了松辽盆地东南缘下白垩统沙河子组沉积相及沉积体系、铀矿化特征, 并从铀源、构造、沉积、古气候及岩石地球化学类型等方面入手, 分析了铀矿成矿条件, 在此基础上, 评价了盆地东南缘下白垩统铀成矿潜力。研究认为, 含矿目的层沙河子组上段沉积环境主要为扇三角洲前缘水下分流河道及分流河道间微相, 铀矿化主要分布在扇三角洲水下分流河道微相环境或水下分流河道微相与分流河道间微相接触界面附近。含矿目的层岩石类型主要为长石石英砂岩、石英长石砂岩, 次要为岩屑长石砂岩。铀矿化层岩石类型为砂岩及含泥砂岩, 厚度平均0.30 m, 品位平均0.0259%, 平米铀量平均0.0775 kg/m², 铀镭平衡系数平均0.99, 铀矿化层形态呈板状。研究区铀源丰富、构造条件适中、岩性—岩相组合较有利、古气候适宜、含矿层岩石还原能力及吸附能力较强, 砂岩型铀矿成矿潜力较大。

关键词: 松辽盆地东南缘; 下白垩统; 铀矿化特征; 成矿条件; 成矿潜力

中图分类号: P542 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7493 (2020) 03-294-09

Uranium Mineralization Characteristics and Metallogenic Potential of the Lower Cretaceous Shahezi Formation, Southeastern Songliao Basin

ZHAO Yue¹, LI Keyan¹, XU Qiang^{1*}, FAN Jingjing², Ding Rong³, HUO Chao¹

1. General Prospecting Institute China National Administration of Coal Geology, Beijing 100039, China;
2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China;
3. Petrochina Coalbed Methane Company Limited, Beijing 100028, China

Abstract: Based on the borehole core, logging curve and sample test and analytical data, the sedimentary facies, sedimentary system and uranium mineralization characteristics of the Lower Cretaceous Shahezi Formation in the southeastern margin of the Songliao Basin are analyzed. From the aspects of uranium source, structure, sedimentation, paleoclimate, and rock geochemistry, the uranium ore-forming conditions are analyzed. In addition, the potential of the Lower Cretaceous uranium mineralization in the southeastern margin of the basin was evaluated. The results show that the sedimentary environment of the upper part of Shahezi, i.e., the ore-bearing target layer, is mainly the micro-facies between the subaqueous distributary channel and the distributary channel in the fan delta front. The uranium mineralization was mainly developed in the fan delta subaqueous distributary channels or near the interface between subaqueous distributary channels and subaqueous interdistributary channel microfacies. The uranium mineralization rock types are sandstone and mudstone, with an average thickness of 0.30 m, an average grade of 0.0259%, an average content of 0.0775 kg/m² of

收稿日期: 2019-09-19; 修回日期: 2019-11-17

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (12120115012101) 资助

作者简介: 赵岳, 女, 1987年生, 博士, 研究方向为矿产普查与勘探; E-mail: 303444675@qq.com

*通讯作者: 徐强, 男, 1988年生, 博士, 主要从事沉积矿产勘查和研究; E-mail: 454123526@qq.com

uranium, an average 0.99 radium balance coefficient, and a plate shape of the uranium mineralization layer. The study area is rich in uranium resources, moderate in structural conditions, favorable lithology suitable in paleoclimate, strong in reducing capacity and adsorption capacity of ore-bearing rocks, and large in mineralization potential of sandstone-type uranium deposits. This study provides a basis for enriching and expanding new areas of uranium prospecting in the basin.

Key words: Southeastern Songliao Basin; Lower Cretaceous; uranium mineralization characteristics; metallogenic conditions; metallogenic potential

Corresponding author: XU Qiang, Ph. D.; E-mail: 454123526@qq.com

松辽盆地是中国北方陆相盆地中砂岩型铀矿主要富集盆地之一。近十几年的铀矿勘查实践显示了极大的铀矿勘查潜力(程纪星等, 2000; 陈晓林等, 2007; 于文斌等, 2006; 罗毅等, 2012), 并在盆地南部上白垩统发现钱家店超大型砂岩型铀矿(张振强, 2006; 荣辉, 2016; 夏毓亮, 2010; 罗毅等, 2007)。前人在铀成矿地质条件(构造样式及构造演化, 沉积相、地层结构、砂岩展布等沉积特征, 古气候条件, 后生蚀变及铀矿化特征), 控矿要素及成矿模式等方面开展了卓有成效的研究(于文斌等, 2006, 2008; 荣辉, 2016; 夏飞勇等, 2019; 蔡煜琦和李胜祥, 2008; 焦养泉等, 2018; 陈方鸿等, 2005; 陈晓林等, 2008; 荣辉, 2016; Bonnetti et al., 2017), 揭示了盆地上白垩统铀矿赋存规律及成矿机制。但在盆地早白垩世断陷期很少见铀矿化显示, 也缺乏有针对性的勘探及研究工作, 这一定程度上制约了对盆地铀矿资源潜力的认识。

2015年, 笔者依据“煤铀兼探”找矿思路, 通过对松辽盆地东南隆起区梨树地区煤、油等勘查资料的“二次开发”, 圈定了砂岩型铀成矿找矿远景区, 实施了验证钻孔, 并在下白垩统煤系地层中发现铀矿化显示, 找矿效果显著。本研究在前人研究的基础上, 通过岩心、薄片观察描述, 测井曲线和样品测试分析, 深入分析了目的层铀矿化特征, 并从铀源条件、构造、岩性岩相特征、古气候条件等几个方面分析了铀矿成矿条件, 在此基础上, 评价了盆地下白垩统沙河子组铀成矿潜力, 以期丰富和拓展盆地铀矿找矿新领域提供依据。

1 成矿地质背景

研究区位于松辽盆地东南隆起区梨树断陷的东南部, 构造区划上属于梨树断陷的一部分(图1)。梨树断陷呈北东向分布于松辽盆地东南隆起区, 可

细分为4个次级构造单元。中生代以来, 梨树断陷经历了多期次复杂的构造演化, 形成西断东超、西厚东薄的单断式断陷盆地(图1c)。纵向上, 断拗叠置, 下部断陷层沉积下白垩统地层, 发育断阶式断裂系统。上部拗陷层充填中晚白垩系地层, 构造活动减弱。研究区位于半地堑构造的缓坡带。

梨树断陷基底由古生代地层和古生代—中生代花岗岩组成, 岩性主要为中深变质岩、浅变质岩和同期花岗岩, 铀含量(3.9×10^{-6} ~ 8.7×10^{-6})普遍较高(于文斌等, 2006)。沉积盖层主体为上侏罗统、白垩系、新生界, 其中, 下白垩统是石油、煤及铀矿等矿产的主要富集层。研究区白垩系自下而上划分为沙河子组、泉头组, 地层岩性岩相特征及空间展布受构造形态和断裂的控制。沙河子组为盆地强烈裂陷期的产物, 泉头组则为断拗转换及整体拗陷期产物。

沙河子组发育扇三角洲相与河流相砂砾岩、湖相灰色泥岩夹煤层建造。自下而上划分为砂砾岩段、含煤段及砂泥岩段。砂砾岩段厚度约30~250 m, 由灰—灰白色砾岩、砂砾岩、含砾粗砂岩及凝灰质碎屑岩组成。含煤段厚约100~250 m, 由灰色—灰黑色泥岩、粉砂岩和煤层互层组成。砂泥岩段厚150~440 m, 底部为灰黑色泥岩, 中部主要为灰黑色厚层泥岩及粉砂岩夹薄层砾岩, 上部以灰色—灰白色砾岩、砂岩为主, 夹粉砂岩及薄煤层, 具正旋回结构, 该段中、上部多为后期抬升剥蚀, 与上覆泉头组不整合接触。泉头组以河流沉积相为主, 上部岩性以灰绿色细砂岩、灰白色粗砂岩为主, 夹薄层灰绿色砾岩, 下部以紫红色砾岩为主, 夹薄层灰绿色细砂岩、泥岩、灰白色粗砂岩。

目前, 在盆地西南隆起区开鲁拗陷钱家店已发现大型或超大型的砂岩型铀矿床, 铀矿成矿潜力较大。另外在研究区以往煤田勘探钻孔中发现放射性异常显示, 可作为良好的铀矿找矿标志(金若时等, 2014, 2016; 赵岳等, 2018; 图1a)。

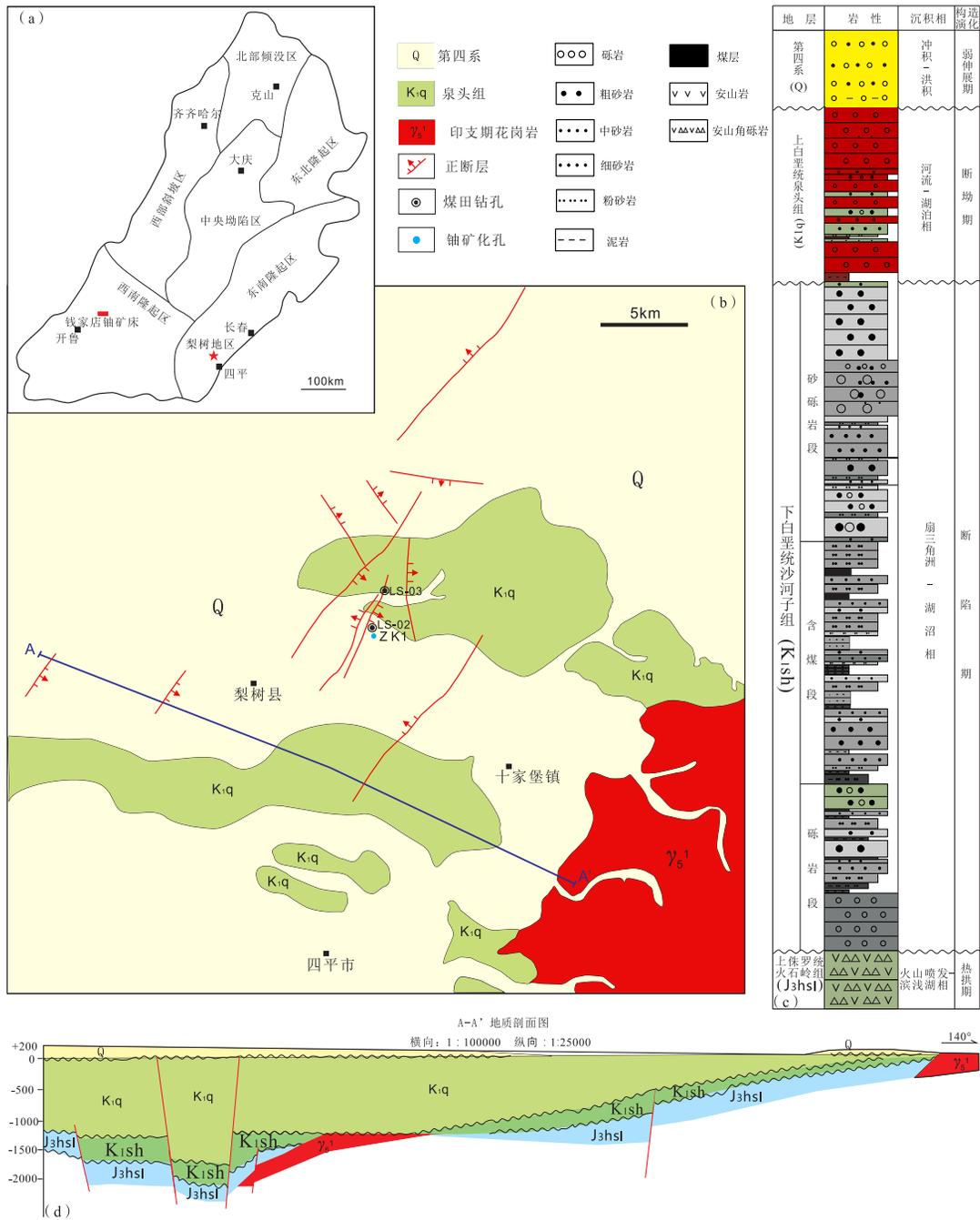


图1 研究区地质图

Fig. 1 Geological map of the study area

2 岩性特征及沉积相

根据岩相及测井曲线特征分析,可在研究区沙河子组上段识别出扇三角洲沉积相类型,主要发育扇三角洲前缘亚相。扇三角洲前缘是三角洲砂体发育的主要部分,存在于浅水区,位于正常浪基面之下,岩性变化大,识别出水下分流河道、水下分流河道间沉积微相。水下分流河道微相岩

性主要是含砾砂岩、砂岩,分选较差,磨圆中等至差,常发育交错层理、波状层理。水下分流河道间微相岩性主要是泥岩、粉砂岩,及砂岩粉砂岩互层,位于水下分流河道的两侧,属于低能环境(图2)。铀矿化主要分布在扇三角洲水下分流河道微相环境,或水下分流河道微相与分流河道间微相接触界面附近。

通过对含矿目的层砂岩显微镜下观察发现,

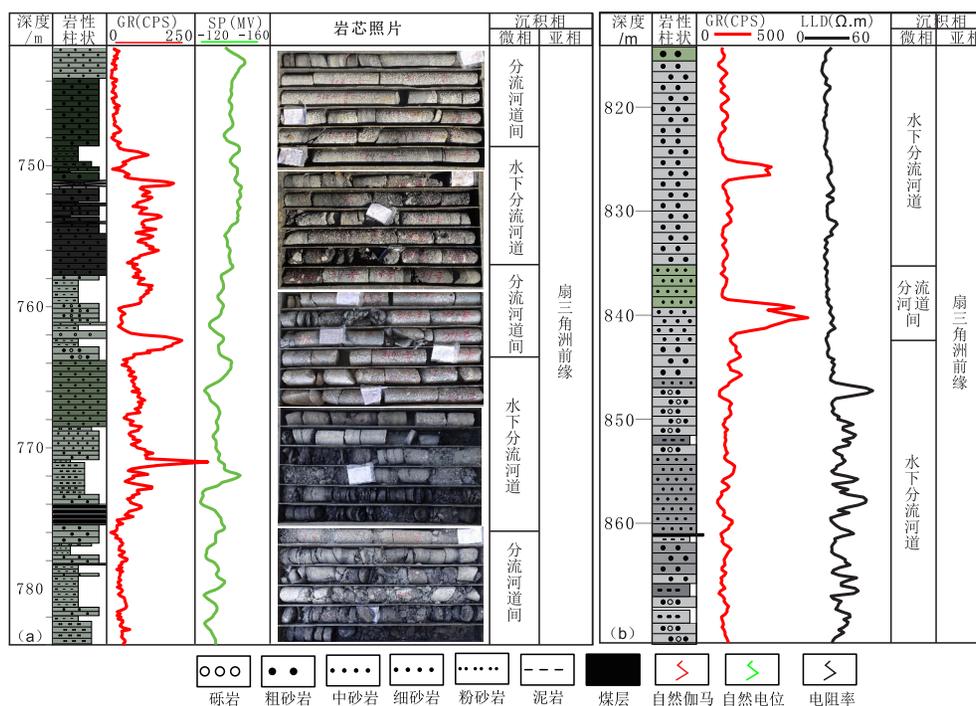


图2 研究区沙河子组上段ZK1、LS-3井沉积特征 (a: ZK1; b: LS-3)

Fig. 2 Sedimentary characteristics of the ZK1 and LS-3 wells in the upper section of the Shahezi Formation in the study area

含矿目的层砂岩显微结构显示类型有长石石英粗砂岩、长石石英砂岩、含砾石英长石砂岩、石英长石砂岩 (图3)。砂岩碎屑颗粒主要为石英、长石、云母、岩屑和少量重矿物。石英含量介于20%~45%，平均28%，颗粒总体以棱角状、次棱角状为主，磨圆度较差，个别石英有拉长现象，定向排列。长石含量通常大于石英，含量介于15%~65%，平均42.5%，可分为碱性长石和斜长石 (图3b)。碱性长石主要包括微斜长石和条纹长石。颗粒呈次棱角状、分选磨圆较差，反映花岗岩为主的母岩近源搬运的特征。目的层砂岩中岩屑组分含量介于10%~65%，平均25%，岩屑成分主要为花岗岩、流纹岩 (图3b)。碎屑岩中重矿物和云母含量较少，质量分数一般小于1%，重矿物主要包括黄铁矿、磁铁矿等。灰色还原砂岩中见炭化植物碎屑、微块状炭屑。

通过对研究区含矿目的层沙河子组上段砂岩进行镜下观察和碎屑颗粒的分析统计 (表1)，并将结果进行投图分类，采用 Folk (1968) 的砂岩分类方法，在 (Q-F-L) 三元图上进行投图 (图4)。结果显示梨树地区砂岩类型主要以长石砂岩和长石岩屑砂岩为主，岩屑砂岩次之，个别样品基质含量较高，为长石岩屑杂砂岩及岩屑杂砂岩。

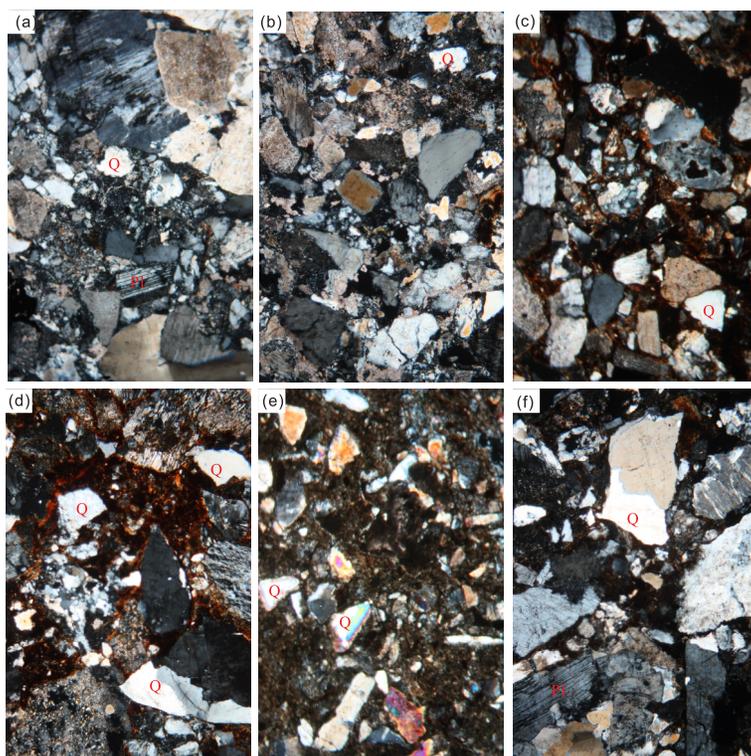
3 铀矿化特征

研究区沙河子组铀矿化主要分布在上部砂砾岩段，岩性主要为石英长石砂岩和长石石英砂岩 (图5)，石英含量一般为30%~40%，呈棱角状、次棱角状，磨圆度中等，分选差。长石含量介于30%~60%，包括斜长石、微斜长石和条纹长石，条纹长石呈微条纹构造，卡氏双晶，棱角状、磨圆度差，成熟度低。以孔隙式胶结为主，泥质是主要的胶结物类型。

矿化层中厚度变化范围为0.10~0.50 m，平均值0.30 m；品位变化范围为0.0095%~0.0373%，平均0.0259%；平米铀量变化范围为0.03~0.10 kg/m²，平均0.0775 kg/m²。铀矿化层厚度、品位的变化均不大。

U-Ra 平衡特征反映铀的迁移或富集状况 (舒米林等, 1990)。本次共采集铀镭样品20个，应用偏度、峰度法对这些样品进行分布类型检验，均服从对数正态分布，说明有一定的代表性，能够说明研究区内铀、镭的变化、分布情况。参照铀镭平衡系数测量规范 (EJ/T 1094-1999)，计算得到研究区铀镭平衡系数平均值为0.99，表现为平衡略偏铀状态 (表2)。

通过统计分析K_p与U含量的关系，发现相关



(a) 含砾长石英砂岩, 石英 (Q), 花岗岩岩屑 (R), 纺锤状, 泥质胶结, ZK1, 746.40 m, 5×10 (+); (b) 长石英砂岩, 长石 (F_{sp}), 显微条纹长石, 流纹岩岩屑次棱角状, 花岗岩岩屑, 次棱角状, ZK1, 770.69 m, 5×10 (+); (c) 细砂岩, 石英较松散, ZK1, 772 m, 5×10 (+); (d) 石英长石砂岩, ZK1, 753.5 m, 5×10 (+); (e) 凝灰质砂岩, 胶结物为凝灰质, ZK1, 857.20 m, 5×10 (+); (f) 长石英砂岩, 胶结物主要为铁质、泥质, ZK1, 751 m, 5×10 (+)

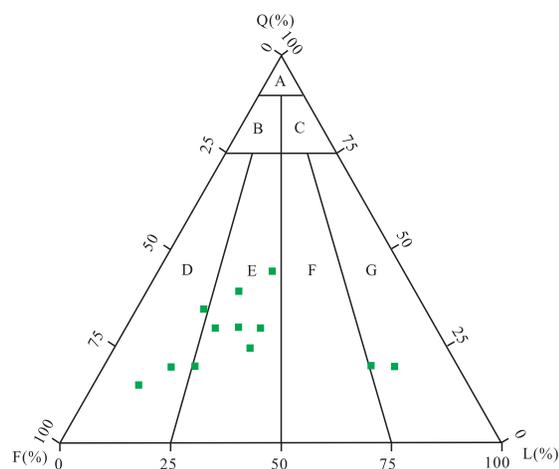
图3 研究区含矿目的层砂岩显微结构特征

Fig. 3 Microstructure characteristics of sandstone in the ore-bearing target layer in the study area

表1 研究区沙河子组上段砂岩成分含量表

Table 1 Sandstone composition content of the upper section of Shahezi Formation in the study area

样号	石英/%	长石/%	岩屑/%
YK4	45	30	25
YK6	30	40	30
YK7	20	60	20
YK8	30	50	20
YK9	20	60	20
YK10	20	65	15
YK11	25	35	30
YK13	20	60	20
YK14	40	40	20
YK15	20	20	60
YK17	30	30	25
YK18	40	40	20
YK19	20	15	65
YK20	35	50	15



A: 石英砂岩; B: 长石英砂岩; C: 岩屑石英砂岩; D: 长石砂岩; E: 岩屑长石砂岩; F: 长石岩屑砂岩; G: 岩屑砂岩

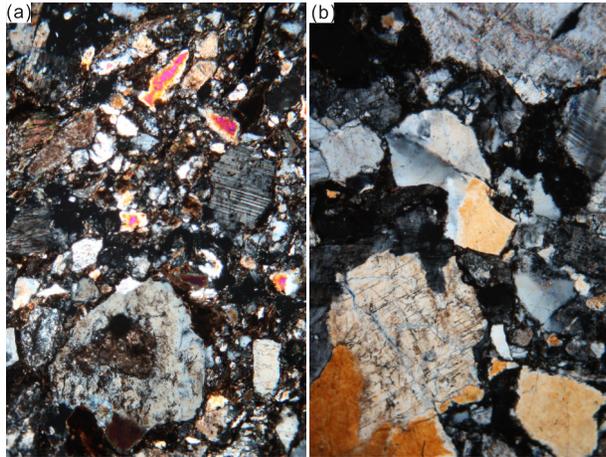
图4 研究区沙河子组上段砂岩分类

Fig. 4 The sandstone types of the target layers in the study area

系数为0.0025 (图6), 二者相关性小。

砂岩型铀矿层的矿体形态受成矿类型及岩相特征的控制, 研究区沙河子组铀矿化发育在沙河子组顶部砂砾岩段, 富矿体沉积环境为冲积扇、

扇三角洲相, 岩性主要为成熟度较低的砂砾及泥岩夹层, 富含碳化植物碎屑等有机质。铀矿化主要赋存在沙河子组和上部泉头组不整合面附近,



(a) 长石英砂岩, ZK1井, 751.98 m; (b) 石英长石砂岩, ZK1井, 754.59 m

图5 研究区矿化层岩石显微结构特征

Fig. 5 Microstructure characteristics of mineralized layer rocks in the study area

表2 研究区铀镭平衡系数结算结果表

Table 2 Results of uranium radium balance coefficient in the study area

样品编号	岩性	$Q_{Ra}/(\times 10^{-11})$	$Q_u/(\times 10^{-6})$	K_p
ZK1-H2	粗砂岩	1.51	43.21	1.03
ZK1-H3	粉砂质泥岩	3.24	96.1	0.99
ZK1-H4	粗砂岩	3.24	96.74	0.99
ZK1-H5	泥质粉砂岩	3.58	105	1.00
ZK1-H8	细砂岩	2.76	78.68	1.03
ZK1-H9	粉砂质泥岩	1.02	30.09	1.00
ZK1-H11	含砾粗砂岩	2.28	71.7	0.94
ZK1-H12	粉砂质泥岩	2.82	81.12	1.02
ZK1-H13	含砾粗砂岩	1.32	40.94	0.95
ZK1-H14	粗砂岩	3.43	105	0.96
ZK1-H17	含砾粗砂岩	5.71	170	0.99
ZK1-H18	含砾粗砂岩	2.51	72.63	1.02
ZK1-H19	粉砂岩	1.42	44.12	0.95

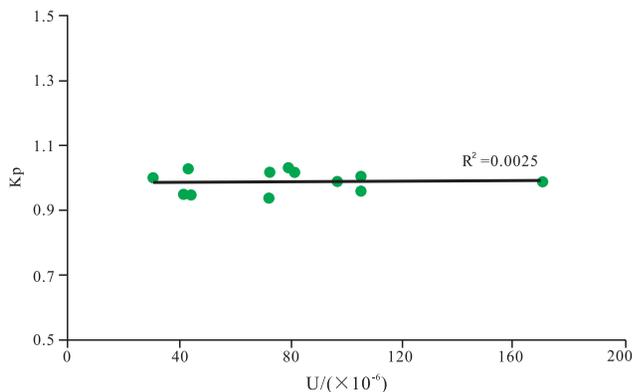


图6 U-Ra平衡系数和U含量的关系

Fig. 6 Relationship between U-Ra balance coefficient and U content

岩石颜色从上至下由红色突变为灰色、灰黑色, 矿化层形态呈板状(图7), 表明铀矿化与古潜水氧化作用有关。

4 铀成矿地质条件分析

4.1 铀源条件

研究区东南部蚀源区主要由加里东期、海西期和燕山期花岗岩及酸性火山岩组成, 铀含量 $3.9 \times 10^{-6} \sim 9.5 \times 10^{-6}$, 白垩系铀含量普遍较高, 铀含量平均 3.68×10^{-6} , 铀源充足。

4.2 构造条件

研究区位于梨树半地堑式断陷宽缓且平坦的缓坡带, 构造抬升适中, 为冲积扇、短程辫状河、三角洲等有利相带的发育提供了适宜的构造条件, 利于形成稳定的厚层高渗透性砂层。高渗透性砂层可作为含铀含氧水运移的良好通道。下白垩统沙河子组沉积后, 地层抬升剥蚀, 与上覆地层存在较长沉积间断, 这有利于含铀含氧水垂直下渗, 遇到强还原障时, 富集成矿。

4.3 岩性—岩相特征

含矿目的层下白垩统沙河子组上段发育冲积扇、扇三角洲沉积体系, 以富砾岩、含砾粗砂岩、中—粗砂岩的正粒序为主。含矿岩石粒度较粗, 普遍含砾, 以含砾泥岩、含砂砾岩、含砾砂岩为主, 砂体厚度大, 结构疏松, 成熟度低, 富含有机质、炭屑等还原剂, 岩石渗透率较好, 含铀含氧的地表水或地下水在沿上述透水性较好的砂岩渗透运移, 将透水层中的还原组分氧化, 水中的铀在氧化还原界面处沉淀富集成矿。

4.4 古气候

早白垩世末期, 古气候发生转变, 导致沉积建造由灰黑色向红杂色转变是砂岩型铀矿成矿的关键。研究区下白垩统沙河子组沉积时期, 古气候以潮湿气候为主, 沉积的含矿层中富含有机质、硫化物等还原介质。泉头组沉积时期, 孢粉组合面貌及沉积建造反映古气候由潮湿转变为半干旱、干旱性质(黄清华等, 1999; 李胜祥等, 2002; 表3), 发育红色碎屑岩建造。干旱气候条件下, 植被不发育, 有利于含铀含氧水呈垂向和横向渗入。

4.5 岩石原生地球化学类型与后生蚀变特征

研究区下白垩统沙河子组岩石总体为灰—深

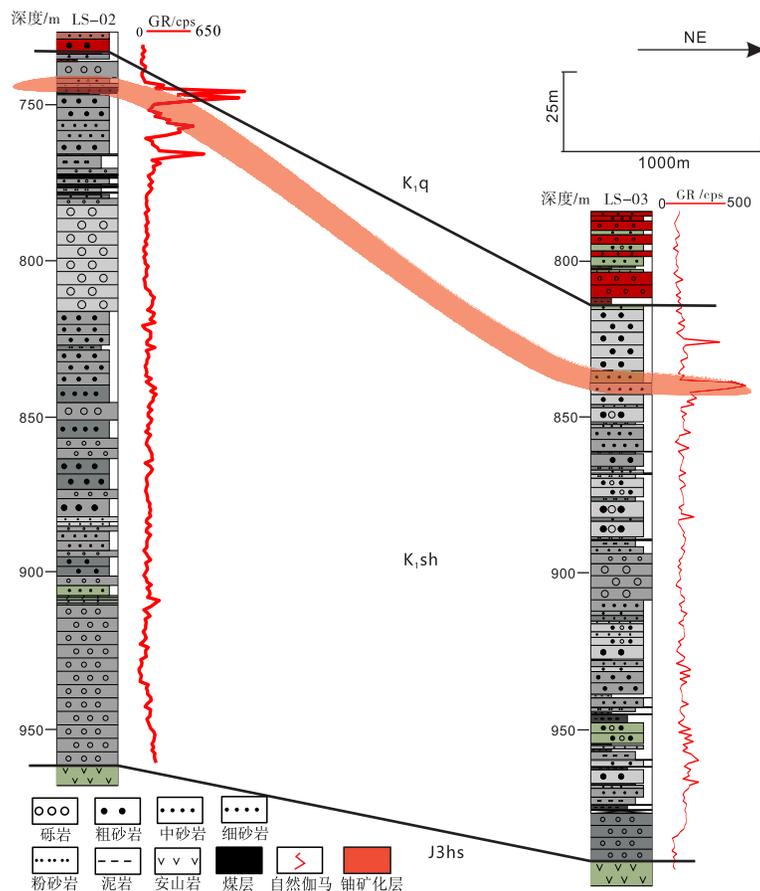


图7 研究区铀矿化层形态

Fig. 7 Urea mineralization layer morphology in the study area

表3 白垩纪地层对应古气候类型分类表

Table 3 Cretaceous stratigraphy corresponding paleoclimate types

层位	典型岩心照片	古气候特征		
		孢粉特征	干湿程度	气候类型
泉头组	 ZK1井, 660~669 m	孢粉组合以松粉和克拉梭粉为主, 属针阔叶混交林, 草丛	半干旱—半湿润	亚热带半干旱气候
沙河子组	 ZK1井, 769~775 m	裸子类植物花粉为主, 孢子含量较少, 属灌草丛、针叶林	半湿润	温带气候

注: 数据来源于黄清华等, 1999.

灰色原生地球化学类型, 反映还原环境, 可见炭屑及薄煤线, 岩石还原能力强 (图8); 含矿层顶部与下白垩统泉头组不整合接触, 泉头组主要以灰白的、红褐色、砖红色等次生氧化色为主, 反

映氧化环境 (图9)。

铁氧化物含量的变化是后生蚀变重要的地化指标。在下白垩统沙河子组中, 矿化层 Fe_2O_3 降低、 FeO 增高, 同时 $C_{有}$ 、 Eh 增高 (图9), 表明该



图8 ZK1下白垩统泉头组底部岩心照片
Fig. 8 Photographs of the bottom core of the Cretaceous Quantou Formation under ZK1

类灰黑色、灰色岩石处于原生地球化学环境，还原能力强，是后生铀成矿的优质岩石类型。

综合分析研究区成矿地质背景、找矿目的层沉积特征、古气候、岩石原生地球化学类型及区内已发现铀矿化特征，发现本区铀源丰富、位于

构造缓坡带，构造条件适中，岩性—岩相组合有利，含矿层分布广泛且岩石中还原剂和吸附剂充足，含矿段处于古气候条件从温湿向干旱转换带，古气候条件适宜，加之以往的煤炭勘查及本次铀矿勘查中发现稳定的放射性异常，表明研究区具有砂岩型铀矿成矿潜力，铀矿化主要分布在构造缓坡带靠近蚀源区一侧，平面上常呈板状展布。这为松辽盆地东南隆起区新层系铀矿找矿提供了重要的找矿方向。

5 结论

(1) 基于松辽盆地东南缘铀矿勘查实践，综合分析下白垩统沙河子组含矿目的层沉积演化特征，发现沙河子上段沉积环境主要为扇三角洲前缘水下分流河道及分流河道间微相，岩石类型主要为长石石英砂岩、石英长石砂岩，次要为岩屑长石砂岩。铀矿化主要发育在扇三角洲水下分流河道微相环境，或水下分流河道微相与分流河道间微相接触界面附近。

(2) 沙河子组上段铀矿化层岩石类型主要为砂岩及含泥砂岩，厚度平均 0.30 m，品位平均

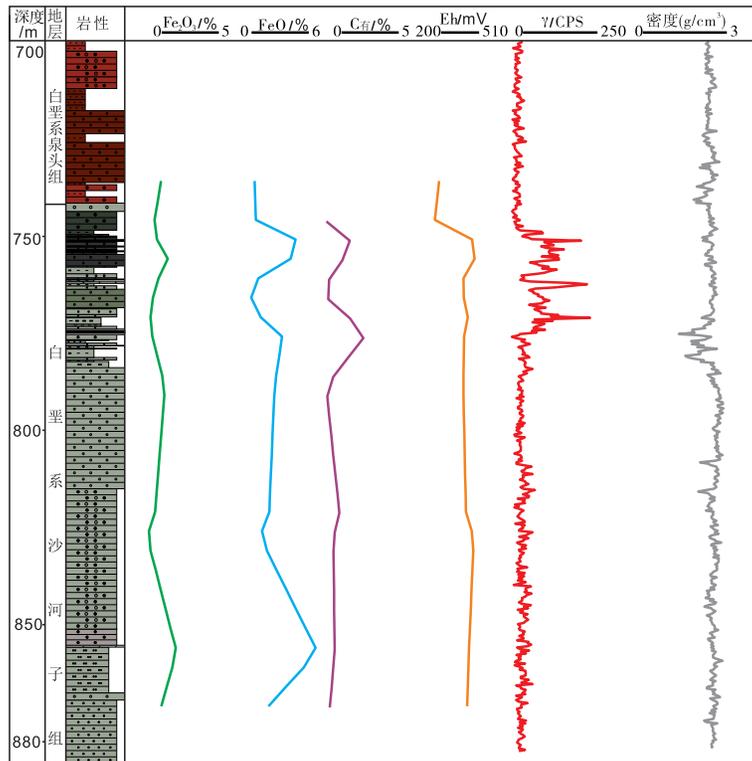


图9 研究区含矿层地球化学类型环境指标图
Fig. 9 Environmental indicators of the geochemical type of the ore-bearing strata in the study area

0.0259%，平米铀量平均0.0775 kg/m²，镭平衡系数平均0.99，铀矿化层形态呈板状。

(3) 研究区东南部蚀源区岩石铀含量高，位于宽缓而平坦的缓坡带，构造抬升适中，发育高渗透性砂岩，岩性—岩相组合有利，古气候演化由湿润向干旱转换，含矿层为灰—深灰色原生地球化学类型，表明具有良好的砂岩型铀矿成矿潜力。

参考文献 (References):

舒米林 M B, 等. 1992. 地浸铀矿勘探 [M]. 北京: 核工业地质局.

蔡煜琦, 李胜祥. 2008. 钱家店铀矿床含矿地层——姚家组沉积环境分析[J]. 铀矿地质, 24(2): 66-72.

陈方鸿, 张明瑜, 林畅松. 2005. 开鲁盆地钱家店凹陷含铀岩系姚家组沉积环境及其富铀意义[J]. 沉积与特提斯地质, 25(3): 74-79.

程纪星, 侯惠群, 姜义生. 2000. 松辽盆地可地浸砂岩型铀矿床成矿条件的探讨[J]. 地质论评, 46(S1): 101-105.

陈晓林, 方锡珩, 郭庆银, 等. 2008. 对松辽盆地钱家店凹陷铀成矿作用的重新认识[J]. 地质学报, 82(4): 553-561.

陈晓林, 向伟东, 李田港, 等. 2007. 松辽盆地钱家店铀矿床含矿层位的岩相特征及其与铀成矿的关系[J]. 铀矿地质, (6): 335-341+355.

黄清华, 郑玉龙, 杨明杰, 等. 1999. 松辽盆地白垩纪古气候研究[J]. 微生物学报, (1): 99-107.

焦养泉, 吴立群, 荣辉. 2018. 砂岩型铀矿的双重还原介质模型及其联合控矿机理: 兼论大营和钱家店铀矿床[J]. 地球科学, 43(2): 459-474.

金若时, 黄澎涛, 苗培森, 等. 2014. 准噶尔盆地东缘侏罗系砂岩型铀矿成矿条件与找矿方向[J]. 地质通报, 33(2/3): 359-369.

金若时, 杨君, 奥琼, 等. 2016. 准噶尔盆地侏罗纪含铀岩系的层序划分与对比[J]. 地质学报, 90(12): 3293-3309.

李胜祥. 2002. 松辽盆地地质演化史与砂岩型铀矿找矿方向研究[D]. 北京: 核工业北京地质研究院.

罗毅, 何中波, 马汉峰, 等. 2012. 松辽盆地钱家店砂岩型铀矿成矿地质特征[J]. 矿床地质, 31(2): 391-400.

罗毅, 马汉峰, 夏毓亮, 等. 2007. 松辽盆地钱家店铀矿床成矿作用特征及成矿模式[J]. 铀矿地质, 23(4): 193-200.

荣辉. 2016. 松辽盆地南部钱家店铀矿床后生蚀变作用及其对铀成矿的约束[J]. 地球科学, 41(1): 153-166.

夏飞勇, 焦养泉, 荣辉, 等. 2019. 松辽盆地南部钱家店铀矿床姚家组砂岩地球化学特征及地质意义[J]. 地球科学, 44(12): 4235-4251.

夏毓亮, 郑纪伟, 李子颖, 等. 2010. 松辽盆地钱家店铀矿床成矿特征和成矿模式[J]. 矿床地质, 29(s1): 154-155.

于文斌, 董清水, 周连永, 等. 2008. 松辽盆地南部断裂反转构造对砂岩型铀矿成矿的作用[J]. 铀矿地质, 24(4): 195-200.

于文斌, 董清水, 邹吉斌, 等. 2006. 松辽盆地东南缘地浸砂岩型铀矿成矿条件分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 36(4): 543-548+562.

张振强. 2006. 松辽盆地南部上白垩统地浸砂岩型铀矿成矿条件研究[D]. 沈阳: 东北大学.

赵岳, 邵龙义, 徐强, 等. 2018. 二连盆地乌兰察布坳陷南缘含铀岩系层序地层与铀成矿规律[J]. 矿业科学学报, 3(4): 323-334.

Bonnetti C, Liu X D, Yan Z B, et al. 2017. Coupled uranium mineralisation and bacterial sulphate reduction for the genesis of the Baxingtu sandstone-hosted U deposit, SW Songliao Basin, NE China [J]. Ore Geology Reviews, 82: 108-129.

Folk R L. 1968. Petrology of Sedimentary Rocks [M]. Hempill's: Austin.