doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.01.02

引用格式:单芝波.开鲁盆地钱家店地区姚家组还原剂特征及铀成矿作用[J].中国地质调查,2023,10(1):20-27(Shan Z B. Characteristics of reducing agent and uranium mineralization of Yaojia Formation in Qianjiadian area of Kailu Basin [J]. Geological Survey of China,2023,10(1):20-27.)

开鲁盆地钱家店地区姚家组还原剂特征及 铀成矿作用

单芝波

(辽河油田勘探开发研究院,辽宁盘锦 124010)

摘要:在开鲁盆地钱家店地区发现超大型铀矿床,为了界定储层还原剂对铀成矿作用的影响,通过岩心、镜下观察 及相关测试技术的应用,进行了还原剂特征研究。结果表明:研究区铀储层内部的还原剂主要以有机质 – 碳化植 物碎屑、烃类、黄铁矿等形式为主。其中,有机质中常见的黄铁矿可以为铀成矿提供大量优质的还原剂;矿化砂岩 中甲烷含量及烃类总量较其他类型的砂岩高,并且随着铀的富集,气烃/重烃的比值明显升高,表明铀的富集与烃类 也具有密切关系;铀储层内部常见的黄铁矿类型包括莓球状黄铁矿、胶状黄铁矿、自形和它形黄铁矿,其作为还原 剂以多种形式与铀共存。矿化层位的砂岩中,总有机碳(total organic carbon, TOC)含量与 S_{2} 含量普遍较高,而 Fe₂O₃/FeO 值则明显偏低;与此相反,在非矿化层位的砂岩中,TOC 含量与 S_{2} 含量普遍较低,而Fe₂O₃/FeO 值较高, 表明铀矿化与 TOC、 S_{2} 含量具有一定的正相关关系,而与 Fe₂O₃/FeO 值呈负相关。对铀储层内部还原剂特征的深入研 究,反映出还原剂对铀成矿作用的制约机理具有重要意义,为砂岩型铀矿的勘查预测提供理论指导。

关键词:钱家店地区;铀矿床;还原剂;成矿;松辽盆地

中图分类号: P59 文献标志码: A 文章编号: 2095 - 8706(2023)01 - 0020 - 08

0 引言

沉积盆地中砂岩型铀矿的形成和发育,需要铀 储层内部有足够的还原剂,它是制约岩石地球化学 障(氧化-还原界面)形成的重要因素,而岩石地球 化学障则控制了铀成矿的空间形态与位置。因此, 对铀储层内部还原剂特征的研究就显得尤为重要。 对还原介质的准确评价和研究是找矿的重要标志 之一。在含铀岩系中,铀储层内部的还原介质对层 间氧化带的制约关系是直接的,还原介质偏少则氧 化带长驱直入可以使径流区全部氧化不能成矿; 还原介质偏多则难以形成区域层间氧化带,致使溶 解铀(U⁶⁺)难以带入铀储层也不利于成矿。因此, 在进行砂岩型铀矿勘查评价预测中,需要深入研究 铀储层内部还原介质的基本特征,通过深入探索其 对铀成矿的制约机理,阐明还原介质作为找矿标志 的基本原理,最终达到对铀成矿准确预测的目的。

前人对钱家店铀矿床的成矿地质条件、矿床地 质特征、成矿规律已做了较深入的研究,取得了重 要成果^[1-5]。发现区内铀矿化受层位、岩相古地 理、岩性和构造、油气、层间氧化带等多重因素控 制^[6-11],经历了同生沉积(预富集)、后生改造叠加 两个铀成矿阶段。本文在详细观察钻孔岩心中的 重要地质现象、系统观测重点地段剖面的基础上, 系统收集或采集蚀变岩、矿石等各类岩石样品,开 展研究区铀储层内部还原剂的界定及其基本特征 的描述,总结了还原剂在不同地球化学类型砂岩中 的分布规律,揭示出铀矿化与还原剂的密切关系, 从而为铀成矿的准确预测提供帮助。

收稿日期: 2021-11-29;修订日期: 2023-01-13。

基金项目:中国石油天然气集团公司科学研究与技术开发"砂岩型铀矿等油区伴生资源勘探评价与高效开发技术研究(编号: 2021DJ5301)"项目资助。

作者简介:单芝波(1988一),男,工程师,主要从事铀矿地质勘探研究工作。Email: shanzhibo1988@163.com

1 研究区地质概况

松辽盆地是我国东北最大的沉积盆地,是在前中生代海西褶皱带基础上发展起来的中新生代 沉积盆地。开鲁坳陷(盆地)位于松辽盆地西南 部(图1),总面积约3.1×10⁴km²。近年来,从石 油地质勘查角度出发,强调早白垩世以来断陷群 的发育特征,单独划出开鲁盆地。开鲁拗陷(盆 地)可进一步划分出若干个以 NE—NNE 向为主 的次级凹陷。钱Ⅲ块铀矿床位于钱家店凹陷北 段。钱家店凹陷是开鲁坳陷(盆地)东北部的次 级负向构造单元,呈 NNE—NE 向狭窄条带状展 布,长约 100 km,宽约 9~20 km,面积1 280 km²。 矿区地层自下而上依次为青山口组(K₂q)、姚家 组(K₂y)、嫩江组(K₂n)及第四系(Q)。姚家组 为本区主要含矿层位,岩性以浅灰、灰色细粒砂 岩为主,少量中细粒砂岩及粉砂岩、泥岩。砂岩 属于长石砂岩类,分选中等,次圆状,砂岩为厚层 状。砂岩中夹有多层灰色泥岩或紫红色泥岩层 (或透镜体),而在含矿地段多见有灰色泥岩薄 层(或透镜体)。



图 1 研究区位置(a)及开鲁盆地构造简图(b)^[12] Fig. 1 Study area location (a) and tectonic sketch of the Kailu Basin (b)^[12]

2 还原剂类型

还原剂与铀矿化关系密切,岩心、显微镜、扫描 电镜观察以及相关测试资料分析表明,钱家店地区 铀储层内部还原剂主要以有机质 – 碳化植物碎屑、 烃类及黄铁矿等形式出现。其主要作用是将含氧 含铀水中的 U⁶⁺还原为 U⁴⁺,从而沉淀富集成矿,但 其与铀矿化的关系不仅限于此,还包括迁移作用 (络合作用)、吸附作用。

2.1 有机质

研究区中出现的有机质主要为碳化植物碎屑 以及烃类。碳化植物碎屑在岩心及显微镜、扫描电 镜下均有观察到,并可以清楚地看到有机质的胞 腔,表明铀储层内部的确存在碳化植物碎屑 (图2(a),(b))。通过镜下观察以及显微组分统 计,有机质中常见的显微组分为镜质组、惰质组和 黄铁矿,未见壳质组,并且在镜下很难看到细胞结 构。各样品中上述3种组分分布稳定且没有明显 差异,其中镜质组含量最高,平均含量约为91%,惰 质组含量约为4%,黄铁矿含量约为5%。

镜质组主要由均质镜质体(图2(c))与基质镜 质体组成,在一些均质镜质体上发育着明显的原生 孔隙与后生孔隙。原生孔隙发育常呈定向性排列 (图2(d)),可能是定向性的细胞结构被破坏后形 成的孔隙;后生孔隙对均质镜质体具有强烈的破 坏作用。这些孔隙常被无机矿物如黄铁矿等所充 填。而均质镜质体之间常见有基质镜质体的分布, 并且在基质镜质体中常见有破碎的半丝质体,这一 点可通过光性的差别来进行区分。对含矿段和非 含矿段样品进行显微镜下观察,镜下显微特征相 似,镜质组都主要由均质镜质体与基质镜质体组 成,均质镜质体表面发育明显的原生、次生孔隙,并 被黄铁矿等无机矿物所充填。与非含矿段相比,含 矿段孔隙中充填黄铁矿的量明显减少。非含矿段 样品中惰质组主要为半结构丝质体与半丝质体 (图2(e)),偶见粗粒体,但与黄铁矿难以区分且含 量极少。含矿段样品中有明显的半丝质体和具有 一定细胞结构的丝质体(图2(f))。观察到的惰质 组分布在镜质体之上,光性较镜质体亮,伴随有明 显的凸起。与非含矿相比,含矿段样品的惰质组含 量没有明显的变化,但保存的更好,更容易辨识。





(d)均质镜质体,反射光

(e)非含矿段中的半丝质体,反射光 图 2 铀储层内部有机质显微特征

(f)含矿段中的半丝质体,反射光

Fig. 2 Microscopic characteristics of organic matter in uranium reservoir

2.2 黄铁矿

黄铁矿是沉积岩中最常见的几种矿物之一,一 般被认为是富含有机质缺氧—贫氧还原沉积环境 的特征矿物,但不排除其他成因(如来自源区的碎 屑类黄铁矿)。研究区铀储层内部黄铁矿较为常 见,其形态各异(图3(a))。沉积岩中的黄铁矿根 据其微观形态,可分为自形、莓球状、块状(胶状)、 它形和裂隙充填等。

研究区莓球状黄铁矿主要是在同生阶段—早 成岩阶段形成的,形状为球状或似球状,少数呈椭 圆状,为集合体或者单个球粒形态(图3(b), (c));内部不是实密均一的黄铁矿固体,而是由 许多离散的微晶黄铁矿颗粒组成,颗粒的排列可 以是规则的,也可以是不规则的;组成莓球状黄 铁矿的微晶黄铁矿颗粒是均一等大的,为立方体 结构或者五角十二面体结构。胶状黄铁矿也被称 为块状黄铁矿,显著特点是其不规则的外形;局 部充填砂岩碎屑空隙,难以分清各个黄铁矿的颗 粒分界(图3(d))。它形黄铁矿的晶体形状不规 则。与矿物颗粒接触关系复杂,可不接触,亦可在 矿物颗粒边缘(图3(e)),根据其形态位置的不 同,成因也有不同。自形黄铁矿有着规则的外形, 切面多为三角形、五角形等(图3(f)),分布于碎 屑颗粒之间,是成岩早期的产物。



(a)灰色砂岩中的黄铁矿结核

(b) 莓球状黄铁矿, 反射光

(c) 莓球状黄铁矿, 扫描电镜



(d)胶状黄铁矿,反射光

(e)它形黄铁矿,反射光 图 3 铀储层内部各种类型黄铁矿特征 (f)自形黄铁矿,反射光

Fig. 3 Characteristics of pyrite in various types of uranium reservoir

2.3 烃类

铀储层中的烃类也可以作为重要的还原剂。 一般认为,岩石中酸解烃的存在是油气渗漏的结 果,也是衡量岩石还原能力的一项指标^[13]。由 表1含量及参数分析可知,矿化砂岩中甲烷含量 及烃类总量较其他类砂岩高。并且随着铀的富 集,气烃/重烃的比值明显升高,说明铀的富集与 烃类具有密切关系。

表 1 铀储层内部砂岩 U 与酸解烃类含量及参数

Tab.1 Content and parameter table of U and acid hydrolyzed hydrocarbons in sandstone of uranium reservoir

14. Jul	样品	w(U)/				$w_{\rm B}/(\mu l \cdot kg)$	⁻¹)			
石性	数/个	10 -6	$\mathrm{nC}_5\mathrm{H}_{12}$	CH_4	$C_2 H_6$	C_3H_8	$\mathrm{iC_4H_{10}}$	nC_4H_{10}	$\mathrm{iC}_5\mathrm{H}_{12}$	
红色氧化砂岩	2	12.05	107.34	17.47	6.72	0.55	2.88	1.33	1.50	
灰色矿化砂岩	20	461.73	533.87	91.49	47.94	1.76	7.50	3.99	2.37	
原生灰色砂岩	28	18.13	415.51	102.81	56.17	1.97	10.75	5.12	3.31	
岩性	样品									
	数/个	$\mathrm{C}_{2}\mathrm{H}_{4}$	C_3H_6	烯类量	气态烃	重烃	烃总量	□元/里定		
红色氧化砂岩	2	17.91	8.48	26.38	132.08	5.71	137.78	25		
灰色矿化砂岩	20	27.37	15.03	42.40	675.07	13.85	688.92	53		
原生灰色砂岩	28	33.38	15.85	49.23	576.46	19.18	595.64	29		

3 还原剂丰度与地球化学特征

铀储层内部存在还原剂,且与铀矿化的关系密 切,但还原剂在其中并不是均匀分布的。对铀储层 内部不同类型砂岩中的还原剂丰度及其地球化学 特征的研究,有助于探讨还原剂在铀储层内部非均 匀分布的原因,对于深层次追踪还原剂与铀矿化的 关系具有重要意义。

岩石中有机碳含量是衡量还原能力的重要指

标,一般认为总有机碳(total organic carbon, TOC) 含量≥0.1%时,岩石就具备比较好的还原能 力^[13]。由图4(a),(b)可知,原生灰色砂岩中TOC 含量最高,为0.18%,高于灰色矿化砂岩的0.16%, 红色氧化砂岩与黄色氧化砂岩中TOC含量低且接 近,分别为0.10%、0.11%,造成该现象的原因可能 是层间氧化带作用所致,红色和黄色砂岩中有机碳 在强氧化条件下转变为有机酸随铀共同迁移,导致 含量降低;而原生灰色砂岩处于还原环境,有机碳 保存最好,含量最高;灰色矿化砂岩位于氧化还原 过渡带,有机碳含量居于两者之间。由图 4(c), (d)可知全硫(S_{\pm})在不同类型砂岩中的含量明显 不同。矿化砂岩中的 S_{\pm} 含量最高,为0.15%,而 原生灰色砂岩的含量仅为0.03%,红色及黄色氧化 砂岩中 S_{\pm} 含量最低,均值都为0.01%。铀与黄铁 矿的共生有可能是导致矿化砂岩中 S_{\pm} 含量偏高的 原因。此外,铀的含量变化与 S_{\pm} 的变化趋势一致, 在一定程度上也体现了黄铁矿对铀成矿的贡献。 对比不同类型砂岩 Fe_2O_3/FeO 值(图4(e),(f)), 可以看出红色氧化砂岩中 Fe_2O_3/FeO 值最高,达 4.66;其次为黄色氧化砂岩,比值为3.89(表 2); 这两类砂岩 Fe_2O_3/FeO 值较高是因为氧化作用使 $Fe^{2+}转变为 Fe^{3+}$,导致 Fe_2O_3 含量升高;原生灰色 砂岩的 Fe_2O_3/FeO 值为1.37,代表弱还原环境;灰 色矿化砂岩中 Fe_2O_3/FeO 值最低,为1.05,原因可 能是受还原蚀变作用的影响, Fe^{3+} 被还原为 Fe^{2+} 。



Fig. 4 Content comparison of various reducing agents in sandstone and the content change line diagram

表 2 铀储层内部不同类型砂岩地球化学特征

Tab. 2	Geochemical	characteristics	of	sandstones	with	different	types	in	uranium	reservo	əir
1 av. 2	Geochemicai	character istics	UI	sanustones	WILLII	uniterent	types	ш	ui amum	I CSCI VI	л

岩性	U		TOC		Fe 氧化物					S_{\pm}		
	$w_{\rm B}/10^{-6}$	样品数/个	$w_{\rm B}/\%$	样品数/个	$w(\operatorname{Fe}_2\operatorname{O}_3)/\%$	$w({ m FeO})/\%$	$\rm Fe_2O_3/FeO$	样品数/个	$w_{\rm B}/\%$	样品数/个		
红色氧化砂岩	2.73	6	0.10	28	2.32	0.65	4.66	37	0.01	29		
黄色氧化砂岩	4.37	10	0.11	34	1.82	0.69	3.89	50	0.01	34		
灰白色砂岩	66.05	61	0.13	67	1.03	0.85	1.61	97	0.10	80		
灰色矿化砂岩	341.81	40	0.16	18	1.11	1.62	1.05	39	0.15	22		
原生灰色砂岩	10.51	28	0.18	8	1.14	1.08	1.37	29	0.03	27		

4 铀成矿作用

泉头组一嫩江组沉积时期,盆地演化转入裂后 热沉降阶段。到姚家组沉积时期,盆地内开始出现 大面积的河流相沉积,相继的嫩江组为滨湖、浅湖 相沉积,这时期为盆地发育的全盛时期。这为在姚 家组沉积期形成大规模的铀储层奠定了基础。从 地形地貌、水系、重矿物和砂体分散体系等的分析 可知,在姚家组沉积期,由于古地形坡降大,水系具 有较强的侵蚀能力,加上周边造山带(尤其是燕山 造山带)的影响,为碎屑铀和溶解铀在潜在铀储层 中的预富集提供了良好的条件。裂后热沉降阶段 为大型潜在铀储层的形成奠定了基础^[14-15]。

嫩江组沉积末期,松辽盆地发生区域性大规模 的反转构造运动,盆地整体抬升遭受剥蚀。松南地 区抬升剥蚀幅度较大,特别是东南隆起区上白垩统 遭剥蚀严重; 使东南部地层发生掀斜作用, 泉头组--姚家组自盆缘至盆内呈退缩叠瓦状排列,并依次出 露于地表,暴露并遭受剥蚀,有利于地表含氧含铀水 的渗入,形成区域层间氧化带;此外在西南隆起区形 成舍伯吐和架玛吐两个隆起带,并形成架玛吐和杨 大城子构造天窗。嫩江组沉积末期构造反转之后, 姚家组遭受抬升剥蚀,出露地表,自主要的燕山物源 区形成的含氧含铀水渗入姚家组中,上下青山口组 和嫩江组大套泥岩发育形成的区域隔水层,使含氧 含铀水沿着姚家组持续运移,在遇到富含还原剂的 地球化学环境下富集成矿:构造运动形成的构造天 窗可能会成为区域泄水通道。嫩江组沉积末期构造 反转形成了完整的补-径-排成矿流体系统[16]。

古近纪一始新世,受喜山运动的影响,松辽盆 地全面抬升,遭受剥蚀作用,缺失古新世一始新世 沉积。这一时期晚白垩世地层接受后生改造作用 强烈,是砂岩型铀矿的主要成矿时期,铀成矿年龄 为(40±3) Ma^[17-18]。

新近纪盆地全面上升,沉积中心明显西移20~ 30 km,新近系大安组和泰康组分布于盆地西部地区,盆地东南部隆升剥蚀再未接受沉积。第四系是 在侵蚀夷平的基础上沉积的一套风积、冲积、洪积 而成的松散堆积。地下水从第四系沉积物中向架 玛吐附近构造天窗补给,对钱家店铀矿造成了一定 的改造作用。新近世一第四纪沉积物的堆积破坏 了原有的成矿流体系统^[19-20]。

5 结论

(1)研究区铀储层内部的还原剂主要以有机 质-碳化植物碎屑、烃类、黄铁矿等形式出现。其 中,有机质中常见的显微组分为镜质组、惰质组和 黄铁矿,可以为铀成矿提供大量优质的还原剂。

(2) 矿化砂岩中甲烷含量及烃类总量较其他 类砂岩高,并且随着铀的富集,气烃/重烃的比值明 显升高,表明铀的富集与烃类也具有密切关系。

(3)铀储层内部常见黄铁矿类型包括莓球状 黄铁矿、胶状黄铁矿、自形和它形黄铁矿,其作为还 原剂以多种形式与铀共存。

(4) 矿化层位的砂岩中, TOC 与 S_{2} 含量普遍 较高, 而 Fe₂O₃/FeO 值则明显偏低; 与此相反, 在 非矿化层位的砂岩中, TOC 与 S_{2} 含量普遍较低, 而 Fe₂O₃/FeO 值较高, 表明铀矿化与 TOC 、 S_{2} 含 量具有一定的正相关关系, 而与 Fe₂O₃/FeO 则呈 负相关。

参考文献(References):

- [1] 陈晓林,向伟东,李田港,等. 松辽盆地 QID 铀矿床层间氧化带的展布特征及其与沉积相、铀成矿的关系[J]. 世界核科学地质,2006,23(3):137-144.
 Chen X L, Xiang W D, Li T G, et al. Distribution characteristics of interlayer oxidation zone and its relationship with sedimentary facies and uranium mineralization in QJD uranium deposit, Songliao Basin, NE China [J]. World Nucl Geosci, 2006, 23(3):137-144.
- [2] 陈晓林,向伟东,李田港,等. 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,2007, 23(6):335-341,355.

Chen X L,Xiang W D,Li T G, et al. Lithofacies characteristics of ore – hosting horizon and its relationship to uranium mineralization in Qianjiadian uranium deposit, Songliao basin [J]. Uranium Geol,2007,23(6):335 – 341,355.

[3] 蔡煜琦,李胜祥. 钱家店铀矿床含矿地层——姚家组沉积环境分析[J]. 铀矿地质,2008,24(2):66-72.
 Cai Y Q,Li S X. Sedimentary environment analysis of Yaojia For-

mation – the ore – hosting stratum of Qianjiadian uranium deposit[J]. Uranium Geol,2008,24(2):66 – 72.

[4] 焦养泉,吴立群,荣辉.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, 2018,43(2):459-474.

Jiao Y Q, Wu L Q, Rong H. Model of inner and outer reductive media within uranium reservoir sandstone of sandstone – type uranium deposits and its ore – controlling mechanism: Case studies in Daying and Qianjiadian Uranium Deposits [J]. Earth Sci, 2018, 43(2):459–474.

[5] 胡林,徐琳,肖进,等. 西藏冈底斯中段错杰地区花岗斑岩年 代学、地球化学特征及其找矿意义[J]. 中国地质调查,2021, 8(5):53-63.

Hu L, Xu L, Xiao J, et al. Chronology, geochemical characteristics and prospecting significance of the granite porphyry in Cuojie area of Middle Gangdise in Tibet[J]. Geol Surv China, 2021, 8(5): 53-63.

[6] 高玉友,禹宝利,于文斌,等.松辽盆地西南部钱家店-架玛 吐地区姚家组铀成矿条件及控矿因素分析[J].世界核地质 科学,2008,25(3):150-156.

Gao Y Y, Yu B L, Yu W B, et al. Analysis on uranium metallogenic conditions and ore – controlling factors of Qianjiadian – Jiamatu area, Southwest of Songliao Basin [J]. World Nucl Geosci, 2008, 25(3):150–156.

[7] 林锦荣,田华,董文明,等. 松辽盆地东南部铀矿找矿目的层 原生地球化学类型与后生蚀变作用[J]. 铀矿地质,2009, 25(4):202-207.

Lin J R, Tian H, Dong W M, et al. Original geochemical types and epigenetic alteration of rocks in prospecting target stratum for uranium deposit in the southeast of Songliao basin [J]. Uranium Geol, 2009, 25(4):202 – 207.

- [8] 庞雅庆,陈晓林,方锡珩,等. 松辽盆地钱家店铀矿床层间氧化与铀成矿作用[J]. 铀矿地质,2010,26(1):9-16,23.
 Pang Y Q, Chen X L, Fang X H, et al. Discussion on the interlayer oxidation and uranium metallogenesis in Qianjiadian uranium deposit, Songliao Basin[J]. Uranium Geol,2010,26(1):9-16,23.
- [9] 李林强. 钱家店铀矿床红色泥砾砂岩岩石学特征及矿化成因分析[J]. 铀矿地质,2014,30(5):271-275.
 Li L Q. Petrological characteristic and mineralization analysis of red muddy Gravelled Sandston in Qianjiadian uranium deposit[J]. Uranium Geol,2014,30(5):271-275.
- [10] 李建国,金若时,张博,等. 松辽盆地西南部上白垩统姚家组 原生黏土矿物组合特征及其找铀意义[J]. 地球学报,2018, 39(3):295-305.

Li J G, Jin R S, Zhang B, et al. Characteristics of primary clay minerals in the upper Cretaceous Yaojia formation of Southwest Songliao basin and their significance [J]. Acta Geosci Sin, 2018, 39(3):295-305.

[11] 薛洪富,曾道国,向明坤,等.黔西北峨眉山玄武岩顶部Fe-Al 岩系特征及其三稀元素富集特点[J].中国地质调查,2021, 8(5):25-34.

Xue H F, Zeng D G, Xiang M K, et al. Characteristics of Fe - Al

rock series on the top of Emeishan basalt in northwestern Guizhou province and enrichment characteristics of its three rare elements[J]. Geol Surv China, 2021, 8(5):25-34.

- [12] 聂逢君,严兆彬,夏菲,等.内蒙古开鲁盆地砂岩型铀矿热流体作用[J].地质通报,2017,36(10):1850-1866.
 Nie FJ,Yan Z B,Xia F, et al. Hot fluid flows in the sandstone type uranium deposit in the Kailu Basin[J]. Geol Bull China, 2017,36(10):1850-1866.
- [13] 李宏涛,吴世祥,蔡春芳,等.油气相关砂岩型铀矿的形成过 程:以钱家店铀矿床为例[J].地球化学,2008,37(6):523-532.

Li H T,Wu S X,Cai C F,et al. Forming processes of petroleum – related sandstone – type uranium ore:example from Qianjiadian uranium deposit[J]. Geochimica,2008,37(6):523 – 532.

- [14] 郑纪伟. 开鲁盆地钱家店铀矿床成矿地质条件及勘探潜力分析[J]. 铀矿地质,2010,26(4):193-200,207.
 Zheng J W. Geological setting and exploration potential of Qianjiadian uranium deposit in Kailu basin[J]. Uranium Geol, 2010, 26(4):193-200,207.
- [15] 单芝波. 松辽盆地钱家店地区姚家组赋矿砂岩的组成、地球化 学特征及其构造背景[J]. 地质科学,2019,54(2):472-490. Shan Z B. Detrital modal, geochemical characteristics and tectonic setting of the Yaojia Formation ore - bearing sandstones in Qianjiadian area, Songliao Basin [J]. Chin J Geol, 2019, 54(2): 472-490.
- [16] 陈方鸿,张明瑜,林畅松.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,2005, 25(3):74-79.
 Chen FH,Zhang MY,Lin CS. Sedimentary environments and u-

ranium enrichment in the Yaojia Formation, Qianjiadian depression, Kailu Basin, Nei Mongol [J]. Sediment Geol Tethyan Geol, 2005,25(3):74-79.

- [17] 罗毅,马汉峰,夏毓亮,等. 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,2007,23(4):193-200.
 Luo Y, Ma H F, Xia Y L, et al. Geologic characteristics and metallogenic model of Qianjiadian uranium deposit in Songliao Basin[J]. Uranium Geol,2007,23(4):193-200.
- [18] 夏毓亮,郑纪伟,李子颖,等. 松辽盆地钱家店铀矿床成矿特 征和成矿模式[J]. 矿床地质,2010,29(S1):154-155. Xia Y L,Zheng J W,Li Z Y, et al. Metallogenic characteristics and metallogenic model of the Qianjiadian uranium deposit, Songliao Basin[J]. Mineral Deposits,2010,29(S1):154-155.
- [19] 李胜祥. 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,2002:114-115.
 Li S X. Geological Evolution of Songliao Basin and Prospecting Direction for Sandstone Type Uranium Deposits[D]. Beijing: Beijing Institute of Geology for Nuclear Industry,2002:114-115.
- [20] 罗毅,何中波,马汉峰,等. 松辽盆地钱家店砂岩型铀矿成矿 地质特征[J]. 矿床地质,2012,31(2):391-400.
 Luo Y, He Z B, Ma H F, et al. Metallogenic characteristics of Qianjiadian sandstone uranium deposit in Songliao basin[J]. Mineral Deposits,2012,31(2):391-400.

Characteristics of reducing agent and uranium mineralization of Yaojia Formation in Qianjiadian area of Kailu Basin

SHAN Zhibo

(Liaohe Oilfield Exploration and Development Research Institute, Liaoning Panjin 124010, China)

Abstract: A super - large uranium deposit was discovered in Qianjiadian area of Kailu Basin. In order to define the influence of reservoir reducing agent on uranium mineralization, the authors defined the characteristics of reducing agent through the application of core, microscopic observation and related testing techniques. The results show that reducing agent in uranium reservoir in the study area is mainly in the form of organic – carbonized plant debris, hydrocarbons and pyrite. The pyrite in organic matter can provide a lot of high – quality reducing agent for uranium mineralization. The methane content and total amount of hydrocarbons in the mineralized sandstone are higher than those in other types of sandstone, and the ratio of gas hydrocarbon to heavy hydrocarbon increase obviously with uranium enrichment, indicating that uranium enrichment is also closely related to hydrocarbons. The common pyrite types in uranium reservoirs include raspberry pyrite, colloidal pyrite, idiomorphic pyrite and alloomorphic pyrite, which coexist with uranium in various forms as reducing agents. The TOC content and S content are generally higher, while Fe_2O_3/FeO ratio is obviously lower in sandstone with mineralized horizon. On the contrary, TOC content and S content are generally lower in the non - mineralized sandstone, while Fe₂O₃/FeO ratio is higher, indicating that uranium mineralization is positively correlated with TOC content and total S content, and is negatively correlated with Fe_2O_3/FeO . Therefore, the reducing agent is of great significance on restricting mechanism of uranium mineralization by the in – depth study on the characteristics of reducing agent in uranium reservoir, which provides theoretical guidance for the exploration and prediction of sandstone type uranium deposits.

Keywords: Qianjiadian area; uranium deposit; reducing agent; mineralization; Songliao Basin

(责任编辑:常艳)