DOI:10.19948/j.12-1471/P.2022.04.02

松辽盆地北部三肇凹陷四方台组含铀砂岩 岩石学、矿物学特征及其地质意义

陈路路^{1,2,3,4,7},李名^{5*},汤超¹,贺静⁶,陈印¹,赵华雷¹,唐力⁵ (1.中国地质调查局天津地质调查中心,天津 300170; 2.东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 南昌 330013; 3.中国地质调查局铀矿地质重点实验室,天津300170; 4.华北地质科技创新中心,天津 300170; 5.中国石油华北油田公司,河北 任丘 062552; 6.长庆油田分公司勘探开发研究院,西安710018; 7.中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室,武汉 430074)

摘 要:研究区位于松辽盆地北部三肇凹陷西南缘,含矿层位为上白垩统四方台组下段。通过铸体薄片岩矿鉴定、电 子探针、X衍射及扫描电镜等综合测试与分析,进一步细化了含矿目的层的岩石矿物学特征,并探讨了研究区物源及 铀赋存形式。结果表明研究区含铀砂岩类型主要为长石岩屑砂岩,岩屑主要为以喷发岩、隐晶岩为主的火成岩屑和 以石英岩、板岩、高变岩为主变质岩屑,另有少量沉积岩屑以及凝灰岩岩屑。碎屑组分表明物源主要来自张广才岭 及盆地东南部一带的太古-元古宙变质岩系、中生代火山岩及花岗岩。电子探针及背散射图像表明该区铀矿物以铀 石为主,少量沥青铀矿。研究区除铀矿化外,矿物蚀变包括黄铁矿化、碳酸盐化、钛铁矿蚀变、黑云母蚀变以及黏土 化等,其中早期黄铁矿与铀共生关系较密切。矿物蚀变序列大致反映了含矿层经历了氧化到还原、弱酸到偏碱性的 环境演化,而该区砂岩型铀矿是早期沉积预富集基础上叠加改造的结果。

关键词:松辽盆地;三肇凹陷;四方台组;岩石矿物学;砂岩型铀矿

中图分类号: P619.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 2097-0188(2022)04-0010-11

近年来,前人在松辽盆地开展了一系列砂岩型 铀矿研究与找矿工作,并取得了重要突破,主要成果 和认识为以钱家店为代表的盆地南部铀矿床,而北 部理论研究和找矿成果较为滞后^[1-8]。新一轮铀矿找 矿工作中,天津地质调查中心针对油田资料的二次 开发和钻孔原位验证,在大庆长垣南端及周边地区 发现了多处铀矿化区,并圈地了工业铀矿体^[9-11]。铀 矿层主要位于上白垩统四方台组下段,相关研究报 道主要围绕层序地层、矿体展布、沉积相、沉积环境、 岩石学、铀矿物及物源等方面进行初步讨论^[12-23]。尤 其是岩石矿物学方面,前人碎屑组分统计以整个四 方台组为研究对象,石英、长石、岩屑端元的种类没 有进一步细分,但矿石及围岩统计数量分析较少^[14]。 另外铀矿物以及期次研究方面不够深入。本次研究

在前期岩石学、铀矿物研究的基础上,通过铸体薄片 岩矿鉴定、电子探针、扫描电镜、X衍射等手段,进一 步细化大庆长垣南端四方台组含矿目的层位的岩石 矿物学特征,对研究区矿物蚀变特征、物源、铀赋存 形式等方面进行了探讨分析,以期对松辽盆地北部 的砂岩型铀矿的成矿作用及找矿勘查提供理论 支撑。

1区域地质概况

松辽盆地是我国北方砂岩型铀矿的重要产铀盆 地,面积达26×104 km²。盆地的北部被大兴安岭、小 兴安岭和张广才岭所夹持,出露中新生代的火山岩 和海西期、燕山期的花岗岩以及少量变质岩。自晚 侏罗世以来,松辽盆地经历了"基底--断陷--坳陷-反

收稿日期:2021-01-12

资助项目:国家自然科学基金项目(92162212);构造与油气资源教育部重点实验室开放基金(TPR-2022-22)、东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室开放基金项目(2020NRE10)、国家重点研发计划(2018YFC0604200)、中国地质调查 局项目(DD20190119、DD20221678)、中国石油华北油田科技项目(HBYT-L-2022-JS-180)以及国际地球科学计 划(IGCP-675)。

作者简介:陈路路(1987-),男,硕士,工程师,主要从事沉积与铀矿地质学研究工作,E-mail:luluchen1987@yeah.net; *通讯作者:李名(1984-),男,硕士,高工,主要从事油气勘探、铀矿勘查及地热开发利用工作,E-mail:wty_lm@petrchina. com.cn。

转"四个构造阶段,形成了北部倾没区、西部斜坡 区、东北隆起区、东南隆起区、中央坳陷区和西南隆 起区六个构造单元^[7,12](图1)。三肇凹陷是松辽盆 地中央坳陷区的二级负向构造单元,其西侧与大庆 长垣相接,东侧与朝阳沟阶地相临,是盆地内的重 要的生油、储油单元。三肇凹陷所经历的构造演化 阶段受盆地整体发育过程的控制,主要包括:火石 岭组至登娄库组沉积时期的断陷阶段、泉头组至嫩 江组沉积时期的坳陷阶段及四方台组至明水组沉 积时期的构造反转阶段^[19]。

第4期

研究区位于三肇凹陷西南缘,区内钻探揭露地 层有第四系、新近系泰康组、上白垩统明水组、四方 台组、嫩江组部分地层。泰康组和明水组发育一套 粗碎屑河流相沉积,砂体厚度大,颜色以灰色、绿灰 色为主,夹杂色泥岩。四方台组为研究区主要含矿 目的层,发育一套杂色河流相及河湖三角洲相沉 积。依据野外钻孔地质编录,按沉积旋回将四方台

组划分为三段。上段发育曲流河相砂质沉 积,中段为以细碎屑为主的湖泊-沼泽相沉 积,下段为发育曲流河河道粗碎屑沉积。下 段以灰色、绿灰色的细砂岩、中砂岩为主,夹 薄层泥岩、粉砂岩,底部见石英砾和泥砾,可 见冲刷不整合面(图2)。嫩江组上部为一套 湖相的细碎屑沉积,岩性主要为深灰色、灰 色、绿灰色泥岩、粉砂质泥岩夹红色、红棕色 泥岩或杂斑,是较好的隔水层¹¹。

2样品采集与研究方法

研究对象是三肇凹陷地区四方台组铀矿 石及围岩,选取了6个工业铀矿孔(MX02、 MX06、11D35-1、11D35-3、11D35-5、5D901-3),磨制探针片共11件、铸体薄片7件。在薄 片岩矿鉴定的基础上,利用电子探针、背散射 图像、X衍射、扫描电镜等手段分析其岩石 学、矿物学特征,探讨了该地区砂岩型铀矿的 物源、铀赋存共生关系以及铀富集规律。

电子探针及扫描电镜分析测试均在中国 地质调查局天津地质调查中心铀矿重点实验 室完成,电子探针所用仪器为日本岛津公司 的EPMA-1600型电子探针,加速电压20 kV, 束流1×10⁸ A,束斑直径为1 μm,出射角40°, 分析方式为波谱分析。扫描电镜所用仪器为









表1 研究区含铀砂岩样品米集清里
Table 1 The detailed list of uranium-bearing
sandstone samples in the study area

序号	样品编号	岩性描述	深度/m	是否含矿
1	MX02-K1	灰色粉砂岩	182.0	是
2	MX02-TZ1	灰色粉砂岩	182.5	是
3	11D35-3-K1	浅黄色含砾中砂岩	228.2	否
4	11D35-3-К2	灰色细砂岩	230.0	是
5	11D35-5-K1	浅灰色细砂岩	234.7~236.6	否
6	11D35-5-K2	灰色中砂岩	237.6	是
7	11D35-5-K3	灰色砂砾岩,部分 含泥砾	330.0	否
8	5D901-3-K1	灰色中细砂岩	401.0	否
9	5D901-3-K2	灰色中粗砂岩	398.9	是
10	11D35-1-229	灰色粉砂岩	229.0	是
11	11D35-1-232	灰色细砂岩	232.0	是
12	11D35-1-237	灰色细砂岩	237.0	是
13	11D35-1-240	灰色细砂岩	240.0	是
14	ZKMX06-ST1	含矿灰色细砂岩	223.5	是
15	ZKMX06-ST2	含矿灰色细砂岩	222.5	是
16	ZKMX06-ST3	含矿灰色细砂岩	221.5	是

日本电子公司的 SS550 型扫描电镜,加速电压 15 kV,束斑10 nm,工作距离为5~10 mm。X粉晶衍射 分析由核工业北京地质研究院分析测试中心完成, 仪器型号为 Panalytical X'Pert PRO型X射线衍射 仪,电压,电流,X射线靶为Cu靶,测量角度为5°~ 70°。

3岩石学特征

为进一步研究四方台组含铀砂岩的岩石学、矿

物学特征,针对铸体薄片,开展镜下鉴定工作。本次 通过颗粒计数器对7件样品(包括矿石及围岩)中的 碎屑组分进行系统分类计数统计(表2),最后在Folk (1968)三角分类图投点如图3所示,可以看出样品投 点主要落于砂岩分类图的\II区,即长石岩屑砂岩中, 与之前面积估法结论基本一致^[14]。

表2 研究区四方台组含铀砂岩岩石矿物碎屑组分统计表/%
Table 2 The statistics data of detrital component for
uranium-bearing sandstone samples in the study area

长日始日		5D901	5D901	11D35	11D35	11D35	11D35	11D35		
74	·叩/姍 丂	-3-k1	-3-K2	-3-K1	-3-K2	-5-K1	-5-K2	-5-K3		
石英	石英	29.0	25.8	24.0	27.3	24.5	26.5	24.5		
类	燧石	3.5	4.2	3.2	1.0	2.0	2.7	2.0		
4	甲长石	5.8	5.3	9.0	5.0	9.0	4.2 6.0			
1	科长石	17.8	12.0	14.5	21.5	13.5	14.0	11.0		
小市	侵入岩	0.2	1.0	/	/	/	/	0.2		
<u>火</u> 瓜 	喷发岩	5.5	11.2	9.2	11.0	9.0	11.5	8.0		
石川	隐晶岩	13.2	15.7	7.0	8.0	7.0	11.0	7.3		
变质 岩屑	高变岩	4.5	4.2	4.8	2.3	4.2	3.7	1.7		
	石英岩	5.0	8.5	7.7	4.2	7.8	4.5	6.5		
	片 岩	0.8	/	1.8	0.3	0.2	/	/		
	千枚岩	/	/	0.8	/	0.5	/	/		
	板岩	5.5	4.5	5.5	6.3	8.5	9.5	5.7		
沉积	砂岩	0.7	2.8	2.8	1.7	0.5	4.5	1.3		
岩屑	泥 岩	/	/	/	0.2	0.8	1.0	/		
甘山	云母	0.7	/	0.2	1.2	1.3	0.8	0.3		
央他	凝灰岩屑	/	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	/		
	水云母	7.0	3.5	3.8	8.0	5.7	4.3	2.7		
1 파 파라	绿泥石膜	/	/	1.0	/	3.2	/	/		
 場际	凝灰质	0.3	/	/	1.0	1.0	/	/		
初	方解石	/	/	3.5	/	/	/	22.8		
	硅质	0.5	0.3	0.2	/	0.3	0.8	/		



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;Ⅲ.岩屑砂岩

四方台组目的层砂岩中岩石矿物碎屑主要以石 英、长石、岩屑为主,其中石英类总含量约占岩石的 32.5%~38.5%, 其中单晶石英含量为 24.0%~ 29.0%,燧石含量为1.0%~4.2%,变质石英岩含量为 4.2%~8.5%,后两者为多晶石英。长石含量为 17.0%~26.5%,斜长石明显较多,其中斜长石为 11.0%~21.5%, 钾长石含量为4.2%~9.0%, 可见条 纹长石、微斜长石等。包含石英岩在内的岩屑总含 量为30.7%~48.9%,其中岩屑以火成岩屑和变质岩 屑为主,平均含量分别为19.4%和17.1%,沉积岩屑、 凝灰岩岩屑仅分别为2.3%、0.7%。镜下火成岩岩屑 中可看到火山喷发岩、隐晶岩等岩屑,少量花岗质侵 入岩,可见斑状结构、隐晶结构以及安山结构,斑晶 多为长石和石英。变质岩岩屑中以石英岩、板岩、高 级变质岩为主,偶见片岩、千枚岩等岩屑。沉积岩屑 为源区剥蚀的砂岩和泥岩,以砂岩为主。

主要粒径范围0.15~0.5 mm,部分样品中粒径 最大达2.5 mm。大部分碎屑颗粒分选中等,以次棱 角居多,以细粒、细-中粒为主,少量不等粒结构。砂 岩以颗粒支撑、孔隙式胶结为主。

另外,砂岩填隙物中主要为水云母、凝灰质、方 解石、粘土膜、其他硅质物等。

4主要矿物蚀变

4.1 铀矿化

电子探针及背散射图像分析结果表明,研究区 含铀砂岩中铀以吸附铀和铀矿物为主,其中铀矿物 主要为铀石,以及少量沥青铀矿等。

(1)因铀石中含有少量H₂O,使表中化学成分总量 为90.89%~99.93%,如表3所示。其中UO₂含量约 为51.58%~78.08%(平均67.32%左右),SiO₂含量约 为13.36%~19.09%(平均17.44%),以及CaO含量约 为1.66%~7.65%,P₂O₅约为0.19%~3.35%,TiO₂约 为0.21%~2.86%,FeO约为0.11%~4.49%、Y₂O₃约 为0.04%~1.12%,还含有少量MnO₂、Na₂O、K₂O、 Al₂O₃等。其主要赋存于粒间孔隙中,与黄铁矿、钛铁 矿、有机质、粘土矿物等共生(图4-a、b、c、d、e)。另外 可见一些铀石呈粒状产于石英、长石、岩屑等碎屑颗



图4 研究区含铀砂岩中铀矿物主要赋存形式 Fig.4 The main forms of uranium minerals in uraniferous sandstone of the study area

铀矿物种类	沥青铀矿	铀石	沥青铀矿	铀石	沥青铀矿	铀石	沥青铀矿	沥青铀矿	铀石	铀石	铀石	沥青铀矿	沥青铀矿	铀石	沥青铀矿	铀石	沥青铀矿	铀石														
Total	99.240	96.095	99.275	97.487	99.083	93.121	95.658	96.903	97.672	99.929	97.648	96.142	97.397	90.889	92.627	97.743	96.971	92.389	96.082	99.488	99.107	99.472	98.072	97.518	98.429	99.225	96.725	98.371	97.314	98.117	96.995	
Nd.O.	c /	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0.238	0.093	0.226	0.188	0.212	0.084	0.022	0.216	0.015	0.064	/	0.027	0.224	/	0.181	0.051	0.226	
Ce, O,	c _	~	/	/	~	/	/	~	~	/	/	/	/	/	0.429	0.356	0.397	0.150	0.321	0.066	0.004	0.334	0.093	0.207	0.096	/	0.245	0.030	0.300	0.013	0.344	
La,O,	c _	~	/	/	~	/	/	~	~	/	/	/	/	/	0.072	0.076	0.168	0.045	0.110	/	/	0.124	~	0.022	0.036	/	0.060	/	0.100	/	0.143	
BaO	\	0.023	~	/	/	0.050	/	0.083	/	0.006	/	0.064	0.006	0.403	/	/	/	/	/	/	/	/	~	~	~	/	/	~	/	/	/	
ZrO,	0.021	0.009	0.102	0.034	0.054	0.061	0.401	0.230	0.402	0.955	1.082	0.866	0.520	4.138	/	/	_	_	_	/	_	_	/	/	/	/	_	/	/	/	/	
Y,0,	c /	0.048	/	0.036	0.037	0.113	1.028	0.929	1.094	0.342	1.121	0.899	1.076	1.031	~	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
P.O.	0.165	0.247	0.125	0.187	0.238	0.869	3.028	2.875	2.087	3.207	2.790	3.017	3.345	1.097	/	/	_	_	_	/	_	/	/	/	/	/	_	/	/	/	\	
SiO	7.659	14.818	5.654	13.361	3.806	17.783	17.647	18.911	18.903	18.762	18.099	17.666	19.091	16.840	18.602	19.524	19.505	14.640	19.534	12.749	5.578	18.604	14.392	17.343	5.740	5.413	19.890	6.507	18.223	4.019	19.413	测限。
CaO	2.888	1.655	3.023	2.221	3.441	1.916	4.899	5.107	4.926	3.914	5.769	6.678	3.453	7.649	2.126	1.979	2.207	1.385	2.191	1.068	1.464	1.861	2.375	1.413	1.882	1.854	1.934	1.450	1.788	1.629	2.011	仪器检
MgO	0.004	0.035	0.008	0.055	/	0.026	0.014	0.038	0.009	/	0.018	0.017	0.041	0.042	/	0.007	/	0.026	0.026	0.013	/	0.042	0.004	0.002	/	/	0.096	/	0.007	/	/	或低于
K.O	0.133	0.130	0.156	0.152	0.136	0.116	0.134	0.133	0.141	0.133	0.117	0.187	0.186	0.319	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	~	未测出
FeO	0.289	0.110	0.386	0.123	0.395	0.160	0.227	0.140	0.184	0.814	1.142	0.255	1.008	4.486	0.063	0.029	0.061	0.193	0.071	0.262	0.379	0.101	0.019	0.017	0.215	0.210	0.272	0.099	0.007	0.210	0.028	示该项
MnO	1.449	0.296	1.578	0.423	1.827	0.27	0.073	0.111	0.083	0.035	0.078	0.078	0.069	0.317	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	2. "/"表
TiO	0.159	2.864	0.420	1.658	0.362	1.330	0.281	0.311	0.211	0.358	0.247	0.257	0.352	0.250	0.326	0.272	0.367	0.349	0.450	2.560	0.103	0.741	2.509	1.230	0.169	0.214	0.454	0.218	1.466	0.289	0.292	据[13];
UO,	85.659	74.520	87.098	78.083	88.247	69.061	66.282	66.474	67.989	69.878	65.558	64.492	66.575	51.579	69.329	73.892	72.641	74.256	71.752	75.339	90.709	75.705	77.714	75.920	89.607	90.998	71.475	89.453	73.880	91.377	72.850	测试数
ThO	0.027	/	/	/	/	0.017	/	/	/	/	/	/	/	0.302	/	0.039	/	/	/	/	/	/	0.005	0.012	0.048	/	0.033	/	/	/	/	017)的
PbO	0.107	_	0.182	/	0.123	/	/	/	0.121	0.025	0.004	0.097	_	/	/	0.159	_	_	_	6.595	0.282	/	0.004	0.020	0.110	0.029	_	0.024	0.085	0.057	0.019	超等(2
Al ₂ O ₂	0.591	1.306	0.495	1.153	0.298	1.349	1.436	1.508	1.471	1.490	1.479	1.508	1.656	2.175	1.350	1.306	1.366	1.075	1.415	0.669	0.485	1.412	0.813	1.238	0.441	0.412	1.893	0.555	1.277	0.168	1.483	17 为汤
Na,O	0.090	0.034	0.048	_	0.119	~	0.211	0.052	0.049	0.009	0.144	0.061	0.020	0.260	0.092	0.011	0.032	0.081	~	0.083	0.081	0.332	0.129	0.030	0.087	0.068	0.148	0.035	/	0.304	0.186	1.C1-C
测点号	23-1-1	23-1-2	23-1-3	23-1-4	23-2-1	23-2-2	25-2-2	25-2-3	25-2-4	25-3-1	25-7-1	25-7-3	25-9-4	39-7-1	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	::

粒中间(图4-f)。

(2)该地区较少见的铀矿物类型——沥青铀矿, 成分上UO₂含量约为85.66%~88.25%,SiO₂含量约 为3.81%~7.66%,还有含量为2.89%~3.44%的 CaO,1.45%~1.83%的MnO₂,另外P₂O₅、TiO₂、FeO、 Y₂O₃含量较少。背散射图像显示该沥青铀矿与铀石 密切共生,大部被包裹,分散于核部,表现为颜色相 对更亮,呈残留状(图4-a)。

4.2黄铁矿化

研究区含铀砂岩中黄铁矿比较细小,岩心及手标 本尺度上不易观察,电子显微镜反射光下呈分散细粒 状(图5-a),但在电子探针背散射及扫描电镜下可以看 到大部分呈草莓状或立方体状集合体产出,充填于颗 粒间孔隙中(图5-b、c、d)。扫描电镜下立方体状黄铁 矿集合体晶形完整、大小不一,最大4 µm。草莓状黄 铁矿的颗粒相对较小且均一,不足1 µm。在矿石样品





a.灰色中砂岩,大量细小粒状黄铁矿充填粒间孔隙,反射光;b.铀石岩立方体状黄铁矿集合体 边缘生长,背散射;c.铀石与草莓状黄铁矿共生,并充填孔隙,背散射;d,e.铀石与大量草梅状 黄铁矿共生;f.方解石充填粒间孔隙,铸体薄片单偏光;g.铀赋存于长石等碎屑颗粒的空洞 中,后期方解石胶结,背散射;h.钛铁矿弱蚀变,周缘黄铁矿围绕生长,背散射;i.钛铁矿蚀变 强烈,呈网格状残留,见次生黄铁矿TiO₂;j.黑云母疏松膨胀变形,解理缝发育黄铁矿,偶见闪 锌矿;k.碎屑颗粒间大量粘土矿物充填,扫描电镜;l.碎屑颗粒表面被蜂窝状蒙皂石包裹,扫 描电镜。 中集合体状黄铁矿是与铀 共生的重要蚀变矿物,多 为成岩-成矿前自生矿物。 铀石在集合体状黄铁矿边 缘生长,完全包裹的铀石 最大直径达160μm。草莓 状黄铁矿的粒间孔隙也见 被铀石充填胶结现象(图 5-c)。另外也发现少量后 生脉状、与铀密切共生的 黄铁矿(图5-e)。

4.3碳酸盐化

研究区含铀砂岩整体 较为疏松,碳酸盐化较不 强,仅个别样品11D35-5-K3方解石含量较高。镜 下观察碳酸盐矿物以亮晶 方解石为主,泥晶方解石 不易观察。铸体薄片及电 子探针背散射图像显示亮 晶方解石颗粒大,分布于 粒间孔隙中,局部呈连晶 状,交代了部分基质,为后 期蚀变矿物(图5-f,g)。

4.4钛铁矿蚀变

研究区钛铁矿存在一定 蚀变,电子探针图像显示 黄铁矿沿其边缘生长(图 5-h),个别钛铁矿蚀变强 烈形成TiO₂和残留钛铁矿 格架(图 5-i)。另外电子 探针显示少部分铀以吸附 等形式赋存于蚀变钛铁矿 中(图4-e)。

4.5黑云母蚀变

研究区黑云母蚀变主要表现为吸水膨胀,因压 实作用而扭曲变形。一些铁质等元素析出,还原环 境下在黑云母解理缝及其周边形成粒状黄铁矿(图5j),偶见其他矿物,如闪锌矿等。该蚀变现象在鄂尔 多斯盆地东北缘较为普遍,但在该区的黑云母解理 缝中未见铀矿物。

4.6 黏土化

粘土质(泥质)胶结是研究区含铀砂岩的主要胶 结类型。X粉晶衍射结果表明研究区含铀砂岩中粘 土矿物平均含量为19.13%,黏土矿物主要为蒙皂石、 伊蒙混层或绿蒙混层为主,约占84%~97%,其次为 伊利石约占3%~19%,而绿泥石、高岭石含量极少, 不超过2%。另外,扫描电镜下可见大量黏土矿物充 填粒间孔隙,碎屑颗粒表面被蜂窝状蒙皂石包裹(如 图 5-k、1)。蒙皂石具有较高的体表比,对铀的吸附较 为有利(表4)。

表4 研究区含铀砂岩粘土矿物X粉晶衍射分析数据 Table 4 The X diffraction data of clay mineral for uranium-bearing sandstone samples in the study area

样品号	S	I/S	It	Kao	С	C/S
MX02-YS4	95	/	5	/	/	/
MX02-YS5	97	/	3	/	/	/
11D35-1-229	23	60	15	2	/	85
11D35-1-232	95	/	5	/	/	/
11D35-1-237	92	/	8	/	/	/
11D35-1-240	19	60	19	2	/	83
ZKMX06-ST1	17	70	12	/	1	89
ZKMX06-ST2	75	9	15	/	1	88
ZKMX06-ST3	69	12	18	/	1	73

注:S.蒙皂石;I/S.伊蒙混层;It.伊利石;Kao.高岭石;C. 绿泥石;C/S.绿蒙混层

5讨论

5.1物源分析

砂岩碎屑成分可以判断所属不同大地构造区域 及其蚀源区性质的^[2428]。研究区岩屑含量为30.7%~ 48.9%,其中以火成岩屑和变质岩屑为主,少量沉积 岩屑和凝灰岩岩屑。变质岩屑可见石英岩、板岩、片 岩、千枚岩、高级变质岩岩屑;火成岩屑可见火山喷 发岩、隐晶岩、花岗质侵入岩岩屑等。另外燧石含量 为1.0%~4.2%,表明有来自周缘海相沉积^[29]。斜长 石含量明显比钾长石多,反映了源区中酸性岩浆岩 相对发育的信息显示。结合陈路路等^[14]碎屑成分构 造三角投图分析,本次投图发现样点主要集中于再 旋回造山区和切割弧区内(图6),说明母岩区经历了 从俯冲缝合到造山的复杂过程,其构造环境为伴有 火山喷发的碰撞告山带褶皱告山作用。而岩浆弧区 则代表了源区存在大量的岩浆活动,形成了火山岩 和侵入岩,与碎屑组分反映较为一致,这表明了赋铀 目的层砂岩成分混杂,来源并非单一。肖鹏等[17] (2018)在研究松辽盆地北部大庆长垣南段四方台组 物源体系时,碎屑锆石年龄中存在80~105 Ma、175 ~240 Ma 和1.8 Ga 三组峰值区间数据,通过年龄数 据比对认为物源主要来自张广才岭、吉黑东部及盆 地东南部地区。张广才岭造山带实际上是佳木斯地 块与松嫩地块之间的一个俯冲-碰撞造山带,除发育 太古宙-元古宙古老变质岩外,还受古太平洋板块分 支的牡丹江洋西向松嫩地块俯冲影响,发生大规模 的褶皱造山运动,并伴随有强烈的岩浆侵入和火山 喷发活动,形成大面积的海西期、印支期和燕山期花 岗岩以及侏罗纪-白垩纪的火山岩出露,并长期处于 隆升剥蚀状态[5,14,30-32]。研究表明张广才岭及盆地东 南地区有较连续的伽玛偏高场和航放异常密集带, 岩性主要为粗粒花岗岩、黑云母花岗岩、闪长岩、流 纹岩等杂岩体。前人研究[33-35]发现海西期和燕山期 花岗岩以及燕山期和印支期杂岩体铀含量和迁出率 均较高,反映了该区具有较好的铀源条件。

5.2 铀石与沥青铀矿

本研究发现有少量沥青铀矿存在。背散射图像显示大颗粒铀矿物中沥青铀矿与铀石密切共生,大部被包裹,分散于核部,残留状(图4-a)。因矿物反射率差异,表现为沥青铀矿颜色相对更亮^[36-37]。汤超等(2017)曾报道过该地区这一现象,发现沥青铀矿与铀石两者之间具有一定的界线^[13]。笔者也曾在鄂尔多斯盆地纳岭沟地区发现该蚀变现象^[37-38],认为是原铀矿物的蚀变残留。本次研究沥青铀矿电子探针成分上UO₂含量约85.66%~88.25%,SiO₂含量约3.81%~7.66%,还有2.89%~3.44%的CaO,1.45%~1.83%的MnO₂。与铀石成分相比,除UO₂含量明显降低外,MnO₂、P₂O₅、Al₂O₃、FeO、Y₂O₃含量也有一定量的变化,表明该蚀变为不同成分成矿流体改造成因。

5.3 铀与其他共生蚀变矿物

5.3.1 黄铁矿与铀

前文讲到矿石中发现充填于颗粒间孔隙中的呈





草莓状或立方体状集合体产出的黄铁矿,为成岩-成 矿前自生矿物。铀石集合体围绕黄铁矿边缘生长, 或充填草莓状黄铁矿的粒间孔隙。另外与铀密切共 生的脉状、胶状黄铁矿较为少见,颗粒细小,与铀的 分布界线模糊,为后生成因。部分学者研究认为黄 铁矿作为一种还原介质,对流体中的U⁶⁺进行还原沉 淀^[39]。而陈祖伊等^[40](2007)认为铀的富集沉淀是黄 铁矿或流体改造引起的周边成矿环境的改变,如Eh 值降低或pH值降低。当Eh和pH值达到Fe³⁺、U⁶⁺沉 淀的临界点后,黄铁矿先于铀石沉积,最终铀石生长 在黄铁矿边缘。

5.3.2 钛铁矿与铀

本次未发现大颗粒铀矿物生长于蚀变钛铁矿边缘。电子探针及能谱显示弱蚀变钛铁矿边缘含有一定量的铀。整体钛铁矿蚀变程度不高,蚀变程度高的钛铁矿较少见,本次未发现富铀现象。前人研究发现钛铁氧化物与铀关系密切,有学者认为可能是含铀流体交代钛铁矿作用,产物可能是钛铀矿,含钛铀矿物或者含铀钛铁矿也均有提及^[20-21,41]。笔者在研究鄂尔多斯盆地东北部钛铁矿蚀变成因时认为钛铁矿的蚀变始于蚀源区,铀的富集与其蚀变产物密切相关^[38,42]。该地区四方台组区域上处于红层氧化环境,钛铁矿蚀变在沉积成岩前后均有可能发生,在蚀变边缘因某种TiO₂吸附而使微量铀进入裂隙或空隙中,初步认为是与吸附作用有关。

5.3.3 黏土矿物与铀

研究区黏土矿物主要为蒙皂石为主,其次为伊 利石,绿泥石、高岭石含量极少。扫描电镜下蒙皂石 呈蜂窝状包裹在粒间碎屑颗粒表面。电子探针下可见细小铀矿物生长于颗粒粘土膜(图4-d)。蒙皂石具 有较高的体表比,对铀具有较强的吸附能力^[43-44]。

5.3.4 矿物蚀变序列

结合铸体薄片及电子探针背散射图像发现主要 蚀变矿物有黄铁矿、铀矿物、方解石以及粒表粘土膜 等。黄铁矿可分为3类,分别是(1)成岩早期立方体 状、草莓状黄铁矿;(2)成岩中后期钛铁矿、黑云母蚀 变析出铁质形成的它形粒状黄铁矿;(3)成矿期与铀 石密切共生的胶状黄铁矿,其中与铀密切共生的是1 类和3类黄铁矿。钛铁矿和黑云母在蚀变序列中不 清晰,伴随于成岩期,而钛铁矿蚀变是始于源区。粒 表粘土膜属于更早期的矿物,铀吸附在膜表面。亮 晶方解石属于成矿期后产物,充填粒间孔隙并胶结 碎屑颗粒。综上初步认为矿物蚀变序列为粒表粘土 膜>立方体状、草莓状黄铁矿>它形粒状黄铁矿>胶状 黄铁矿>铀石>亮晶方解石,反映了沉积成岩环境。

5.4 铀富集作用

岩石学特征表明来自张广才岭及东南缘等蚀源 区的成矿流体携带丰富的铀源。铀赋存状态研究显 示研究区含铀砂岩中的铀以独立铀矿物和吸附铀为 主,铀矿物(主要为铀石)与黄铁矿密切共生,部分产 于岩石碎屑中,而吸附铀多与粘土矿物、蚀变钛铁矿 吸附有关。区域上四方台组为氧化红层,共生矿物 蚀变序列反映了一个由氧化到还原、酸性到偏碱性 的成岩成矿环境,对铀富集成矿较为有利。结合区 域构造演化以及上述蚀变矿物特征与蚀变序列,认 为在嫩江组末期-四方台组初期,大庆长垣南端开始 隆起,气候由潮湿转变为干旱-半干旱,曲流河发育, 携带张广才岭及东南缘等蚀源区的石英、长石、岩屑 等碎屑颗粒入湖^[9]。剥蚀区淋滤萃取迁移而来的铀 以及含铀碎屑在还原改造环境中预富集,为铀成矿 提供了直接和主要铀源^[45]。在成岩过程中伴随有粒 表粘土膜生长以及草莓状、立方体状黄铁矿的形成。 其后钛铁矿和黑云母蚀变不仅析出铁质,还伴有白 钛石/锐钛矿以及黏土矿物的形成,其较强的吸附性 对铀的富集具有重要作用^[58]。

明水末的构造反转作用使大庆长垣早期沉积的 嫩江组五段、四方台组、明水组一段均遭受剥蚀并形 成构造天窗。此时嫩江组烃源岩大规模排烃,富烃类 还原性气体沿断裂向上运移,并在四方台组与从长垣 构造天窗和东南缘渗入的浅部富氧含铀流体反应,形 成沥青铀矿、铀石,并沿黄铁矿等蚀变矿物生长^[10]。

综上,认为该区早期的原始沉积预富集加上后 期的叠加改造富集成矿,最终形成了松辽盆地大庆 长垣南端三肇凹陷四方台组砂岩型铀矿床。

6结论

(1)岩石碎屑成分复杂,以火成岩屑和变质岩屑 为主,另有少量沉积岩屑以及凝灰岩屑。碎屑组分 表明物源主要来自张广才岭及盆地东南部地区,具 有较好的铀源条件。

(2)研究区的铀矿物以铀石为主,少量沥青铀矿 被铀石包裹于核部。铀石在成分上表征是流体改造 后原铀矿物残留。

(3)目的层矿物蚀变包括铀矿化、黄铁矿化、碳酸盐化、钛铁矿蚀变、黑云母蚀变以及黏土化等,反映了其成岩期曾经历由氧化到还原、酸性到偏碱性的环境。其中,与铀矿物密切共生的矿物主要为早期黄铁矿。

(4)研究区四方台组砂岩型铀矿的富集机制是 早期沉积预富集叠加后期的改造成矿作用。

致谢:中国地质调查局天津地质调查中心的徐增连、 魏佳林、郭虎、曾辉、肖鹏、李艳锋等一起参加了野外 研究工作,并得到了大庆油田有限责任公司等单位 的大力支持,在此致以衷心的感谢!感谢审稿老师 在审稿过程中提出了中肯的宝贵意见!

参考文献:

[1] BONNETTI C, LIU X, ZHAOBIN Y, et al. 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. 2017, 82: 108–129.

- [2] DONG W, LIN J, XIA Y, et al. Alteration characteristics of the sandstone – type uranium deposit in Qianjiadian, Inner Mongolia[C]. Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge/Springer Berlin Heidelberg, 2005, 249–251.
- [3] LI H T, CAI C F, HONG H, et al. Microbial uranium mineralization and hydrocarbon oxidation in the Qianjia- dian deposit[C]. Geochimica et Cosmochimica Acta / Goldschmidt Conference Abstracts, 2007, 570.
- [4] 赵杰,罗梅,刘峰,等. 松辽盆地北部可地浸砂岩型铀矿 形成条件与分布特征[J]. 成都理工学院学报,2002,(02): 137-143.
- [5] 钟延秋.大庆长垣构造演化特征及对砂岩型铀矿成矿的 控制作用[J].东华理工大学学报(自然科学版),2012,35 (4):315-321.
- [6] 封志兵, 聂逢君, 严兆彬, 等. 松辽盆地西部斜坡铀成矿条件及聚铀模式[J]. 大庆石油地质与开发, 2013, 32(4): 36-41.
- [7] 陈路路, 聂逢君, 严兆彬. 松辽盆地西部斜坡带四方台组铀成矿条件分析[J]. 世界核地质科学, 2013, 30(2): 70-78.
- [8]封志兵,聂逢君,严兆彬,等.松辽盆地西部斜坡构造-流体演化特征与铀聚集[J].东华理工大学学报(自然科学版),2014,37(1):13-20.
- [9]汤超,金若时,谷社峰,等.松辽盆地北部四方台组工业铀 矿体的发现及其意义[J].地质调查与研究,2018,41(01): 1-8+32.
- [10] 魏佳林,汤超,徐增连,等.大庆长垣南部四方台组砂岩型 铀矿化特征研究[J].地质调查与研究,2018,41(01):9-17.
- [11] 胡霞,吕建才,胡英,等.利用油气勘探资料勘查铀矿的 几点认识:以松辽盆地北部铀矿勘探为例[J].世界地质, 2019,38(2):405-411.
- [12] 刘华健,金若时,李建国,等.松辽盆地北部含铀岩系沉积物源及铀源分析研究进展[J].地质调查与研究,2017, 40(04):281-289.
- [13] 汤超,魏佳林,肖鹏,等.松辽盆地北部砂岩型铀矿铀的赋 存状态研究[J].矿产与地质,2017,31(06):1009–1016.
- [14] 陈路路,汤超,李建国,等.松辽盆地大庆长垣南端四方 台组含铀砂岩岩石学特征及地质意义[J].地质调查与研 究,2018,41(01):33-39+66.
- [15] 刘华健,金若时,肖鹏,等.松辽盆地北部古恰地区含铀 岩系四方台组粒度特征及其沉积环境指示意义[J].地质 调查与研究,2018,41(01):40-50.
- [16] 万涛,刘招君,胡菲,等.松辽盆地北部上白垩统四方台 组河流相层序沉积特征[J].大庆石油地质与开发,2018, 37(05):1-7.
- [17] 肖鹏,金若时,汤超,等.松辽盆地北部大庆长垣南端上 白垩统四方台组物源体系分析[J].石油实验地质,2018, 40(04):493-501.
- [18] 肖鹏,汤超,魏佳林,等.大庆长垣南端四方台组沉积相 特征及其与铀富集的关系[J].地质调查与研究,2018,41 (01):18-23.
- [19]徐增连,汤超,李建国,等.松辽盆地北部三肇凹陷四方

台组层序地层及其与砂岩型铀矿化的关系[J]. 地质调查与研究,2018,41(01):24-32.

- [20]魏佳林,汤超,金若时,等.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,2019,38(3):375-389.
- [21] 魏佳林,汤超,徐增连,等.松辽盆地北部龙虎泡地区含铀 岩系铀矿物赋存特征[J].矿物学报,2019,39(6):709-725.
- [22] 刘阳,王军礼,李建国,等.松辽盆地北部大庆长垣上白 垩统四方台组精细地层划分及其铀成矿意义[J].地层学 杂志,2020,44(2):181-190.
- [23] 于洋, 王祝文, 宁琴琴, 等. 松辽盆地大庆长垣四方台组 可地浸砂岩铀成矿测井评价[J]. 吉林大学学报:地球科学 版, 2020, 50(3):929–940.
- [24] DICKINSON W R, SUCAEK C A. Plate tectonics and sandstone composition[J]. AAPG bull. 1979. 63(12): 2164–2182.
- [25] DICKINSON W R. Provenance of north American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting[J]. Bull. Geol. Am. 1983. 94:222–235.
- [26] INGERSOL R V, BULARD T F, FORD R L, et al. The effect of grain size on detrital modes: A test of the Gazzi Dickinson point-counting method[J]. Journal of sedimentary Petrology. 1984, 54(2):103–116.
- [27] 陈安清,陈洪德,向芳,等.鄂尔多斯东北部山西组-上 石盒子组砂岩特征及物源分析[J]. 成都理工大学学报 (自然科学版),2007,34(3):305-311.
- [28] 徐文礼,李祥辉,舒珺.西藏仁布县上三叠统朗杰学群物源分析[J].四川地质学报.2009,29(1):8-10.
- [29] 丁悌平,高建飞,田世洪,等.华北中元古代碳酸盐岩中 燧石的δ³⁰Si峰值及其对古海洋环境变化的指示意义[J]. 地质学报.2015,89(S1):294-295.
- [30] 邵济安,李永飞,唐克东.张广才岭造山过程的重构及其 大地构造意义[J].岩石学报.2013,29(09):2959-2970.
- [31] 许文良, 王枫, 裴福萍, 等. 中国东北中生代构造体制与 区域成矿背景: 来自中生代火山岩组合时空变化的制约 [J]. 岩石学报.2013, 29(02): 339-353.
- [32] 敖光. 张广才岭南部侵入岩锆石 U-Pb LA-ICP-MS年代

[J]. 地质与资源, 2016, 25(06): 533-538.

- [33] 于文斌,董清水,邹吉斌,等.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), 2006,(04):543-548+562
- [34] 宫文杰, 张振强, 于文斌, 等. 松辽盆地地浸砂岩型铀成 矿铀源分析[J]. 世界核地质科学, 2010, 27(01): 25-30.
- [35] 赵杰,罗梅,刘峰,等.松辽盆地北部可地浸砂岩型铀矿 形成条件与分布特征[J].成都理工学院学报,2002, (02):137-143.
- [36] 闵茂中,吴燕玉,张文兰,等.铀石-沥青铀矿稠密韵律生 长环带及其成因意义[J].矿物学报,1999,19(1):15-19.
- [37] 陈路路,冯晓曦,司马献章,等.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, 2017,53(04):632-642.
- [38] LULU CHEN, YIN CHEN, XIAOXI FENG, et al. Uranium occurrence state in the Tarangaole area of the Ordos Basin, China: Implications for enrichment and mineralization[J]. Ore Geology Reviews. 2019, 115.
- [39] 刘杰, 聂逢君, 侯树仁, 等. 中新生代盆地砂岩型铀矿床 铀矿物类型及赋存状态[J]. 东华理工大学学报:自然科学 版. 2013, 36(2):107-112.
- [40] 陈祖伊,郭庆银.砂岩型铀矿床硫化物还原富集铀的机制[J].铀矿地质,2007,23(6):321-327.
- [41] 王贵,王强,苗爱生,等.鄂尔多斯盆地纳岭沟铀矿床铀 矿物特征与形成机理[J].矿物学报,2017,(4):461-468.
- [42] 陈路路,陈印,郭虎,等.鄂尔多斯盆地纳岭沟地区含铀 砂岩中含钛类矿物蚀变特征及与铀赋存关系新认识[J]. 中国地质,2018,45(02):408-409.
- [43] 杨殿忠,于漫.吐哈盆地粘土矿物特征及其与铀成矿关系[J].地质找矿论丛,2005,20(3):188-191.
- [44] 赵华雷,陈路路,冯晓曦,等.鄂尔多斯盆地纳岭沟地区 直罗组砂岩粘土矿物特征及初步对比研究[J].高校地质 学报.2018,24(5):627-636.
- [45] 冯晓曦,滕雪明,何友宇.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,2019, 42(02):96-103+108.

Petrology and mineralogy characteristics of the Uranium–bearing Sandstone from Sifantai Formation in Sanzhao Depression of Northern Songliao Basin and their geological implications

CHEN Lu-lu^{1,2,3,4,7}, LI Ming⁵, TANG Chao¹, HE Jing⁶, CHEN Yin¹, ZHAO Hua-lei¹, TANG Li⁵ (1. Tianjin Center, China Geology Survey, Tianjin 300170, China; 2. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment

(East China University of Technology), Nanchang, 330013, China; 3. Key Laboratory of Uranium Geology, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 4. North China Center of Geoscience Innovation, Tianjin 300170, China ;5. PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu 062552, China; 6. Research Institute of Exploration and Development of Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710018, China; 7. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources(China University of Geosciences), Ministry of Education, Wuhan 430074, China)

Abstract: The study area is located in the southwest of Sanzhao Depression in northern Songliao Basin. The sandbody from the lower member of Sifantai Formation in Late Cretaceous is the metallogenic host rock. By

means of the rock-mineral determination of the casting thin sections, the analysis of electron probe, X-diffraction, and scanning electron microscope, the paper has further refined and detailed studied the characteristics of petrology and mineralogy. And it has made some discussion about the provenance of source region and occurrence form of uranium. The results show that the type of uraniferous sandstone is mainly feldspathic litharenite. The debris is mainly igneous debris mainly composed of eruptive rocks and cryptocrystalline rocks, metamorphic debris mainly composed of quartzite, slate and hypermetamorphic rocks, and a small amount of sedimentary debris and tuff debris. Clastic component displays that the provenance of study area is likely to come from the Zhangguangcai mountains and the southwest of Songliao basin, where develop the Archaean-Proterozoic metamorphic series and Mesozoic volcanic rocks and granites. Electron probe analysis and backscatter images show that uranium minerals are mainly coffinite and a small amount of pitchblende. In addition to uranium mineralization, the alteration of minerals mainly includes pyritization, carbonation, ilmenite alteration, biotite alteration and clay alteration in the study area. The main mineral closely associated with uranium is early pyrite. The mineral alteration sequence roughly reflects an oxidized to reductive, acidic to alkaline environment during the sedimentary and diagenetic stages. The sandstone-type uranium deposit in this area is the result of superposition and reformation on the basis of pre-enrichment of early sedimentation. Key words: Songliao Basin; Sanzhao Depression; Sifantai Formation; petrology and mineralogy characteristics;

Key words: Songliao Basin; Sanzhao Depression; Sifantai Formation; petrology and mineralogy characteristics; sandstone-hosted Uranium deposit

Geochemical characteristics of basalts in the northeastern Ordos Basin

CHEN Yin^{1,2,3,6*}, LUO Ning⁴, CHEN Lu-lu^{1,2,3,5,6}, MIAO Pei-sen^{1,2,3}, LI Jian-guo^{2,3},

ZHAO Hua-lei^{1,2,3}, LI Jian-min⁴

(1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin, China 300170, China; 2. North China Center of Geoscience Innovation, Tianjin 300170, China; 3. Key Laboratory of Uranium Geology, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 4. PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu 062552, China; 5. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment (East China University of Technology), Nanchang 330013, China; 6. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources (China University of Geosciences), Ministry of Education, Wuhan 430074, China)

Abstract: The Cretaceous is the significant transition stage for the tectonic evolution of China. As the basin with multiple energy resources, the research on the Cretaceous intrusions in the Ordos Basin has supplied the important evidences for the tectono-thermal evolution of the western part of the North China Craton. In this work, the Hangjinqi Heishitougou basalt in the Early Cretaceous successions and Yulin Daliuta basalt in the Middle Jurassic successions in the northeastern Ordos Basin are taken as the research objects. For these rocks, their geochemical characteristics was analyzed and the regional dynamic background was further discussed. The analysis of major elements shows that the Hangjinqi Heitongshigou basalt belongs to the series of potassium basalt. Yulin Daliuta basalt belongs to the low potassium (Tholeiitic) series. The characteristics of trace and rare earth elements are right-inclined with a low grade fractionation of light REE/ heavy REE. Heidonggou basalt is regarded to come from the enriched mantle without crustal mixing. While, the Daliuta basalt has the characteristics of active continental margin with crustal mixing. Regional dynamic background analysis indicates that the deep residual body under the oblique subduction of the paleo-Pacific plate caused the instability of the deep lithosphere in the eastern margin of the western North China Craton (Ordos) and the Daxing'anling-Taihang Gravity Gradient Belt. The development of basalts in the northeastern and adjacent areas of the Ordos Basin were believed to be the result of these tectono-thermal activities.

Key words: Ordos Basin; basalt; geochemical characteristics; tectono-thermal evolution; Early Cretaceous

20