doi: 10.12029/gc20220117

单芝波,雷安贵,宋柏荣,奥琮,杨松林,韩洪斗. 2022. 松辽盆地钱家店地区姚家组砂岩黏土矿物特征及其与铀矿化的关系[J]. 中国地质, 49(1): 271−283.

Shan Zhibo, Lei Angui, Song Bairong, Ao Cong, Yang Songlin, Han Hongdou. 2022. Features of clay minerals in the Upper Cretaceous Yaojia Formation sandstones of the Qianjiadian Area in the Songliao Basin and its relation to uranium mineralization[J]. Geology in China, 49(1): 271−283 (in Chinese with English abstract).

松辽盆地钱家店地区姚家组砂岩黏土矿物特征及其与铀矿化的关系

单芝波[1],雷安贵[1],宋柏荣[1],奥琮[2],杨松林[1],韩洪斗[1]

(1.辽河油田勘探开发研究院,辽宁 盘锦 124010;2. 中国地质调查局天津地质调查中心,天津 300170)

提要:【研究目的】钱家店铀矿床位于松辽盆地西南部,含铀岩系为上白垩统姚家组。目的层中含有大量的黏土矿物,因此揭示姚家组砂岩黏土矿物特征,对铀的成矿作用探讨至关重要。**【研究方法】**本文通过系统的显微镜下鉴定、扫描电镜、X射线衍射等分析测试手段,对钱家店地区姚家组砂岩黏土矿物的镜下特征、成分及含量进行了系统的观察和研究。**【研究结果】**钱家店地区姚家组砂岩黏土矿物主要为高岭石,其次为伊利石、蒙皂石,少量绿泥石。黏土矿物是沉积岩中铀富集的重要吸附剂,不同种类的黏土矿物对铀的吸附能力存在一定差异。**【结论】**姚家组成矿环境经历了成矿早期的酸性环境和成矿晚期的弱碱性环境,不同的黏土矿物之间在此过程中存在着一系列的相互转化关系。黏土矿物含量变化不仅影响着铀储层物性特征,同时也影响着铀的沉淀富集。在黏土矿物吸附作用下,姚家组砂岩成岩过程中,预富集了大量的铀,为钱家店地区形成特大型铀矿床奠定了坚实物质基础。

关 键 词: 砂岩型铀矿;钱家店地区;黏土矿物;姚家组;松辽盆地;矿产勘查工程

创 新 点: 钱家店地区姚家组砂岩黏土矿物主要为高岭石,其次为伊利石、蒙皂石,少量绿泥石;不同种类的黏土矿物共同作用下,为姚家组预富集了大量的铀。

中图分类号: P619.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000−3657(2022)01−0271−13

Features of clay minerals in the Upper Cretaceous Yaojia Formation sandstones of the Qianjiadian Area in the Songliao Basin and its relation to uranium mineralization

SHAN Zhibo[1], LEI Angui[1], SONG Bairong[1], AO Cong[2], YANG Songlin[1], HAN Hongdou[1]

(1.*Liaohe Oilfield Exploration and Development Research Institute, Panjin* 124010*, Liaoning, China;* 2.*Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin* 300170, *China*)

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

[Objective] The Qianjiadian uranium deposit is located in the southwestern songliao basin and the U −bearing rock series occur in

收稿日期: 2019−10−28;**改回日期:** 2019−12−20

基金项目: 中国石油天然气集团公司科学研究与技术开发项目(2019A−4809(GF))资助。

作者简介: 单芝波,男,1988年生,硕士,工程师,矿物学、岩石学、矿床学专业;E−mail: shanzhibo1988@163.com。

the upper Cretaceous Yaojia Formation. There are a lot of clay minerals in the target strata, so it is very important to reveal the characteristics of clay minerals in sandstone of Yaojia Formation for uranium mineralization.**[Methods]** In this paper, method of microscopic identification, scanning electron microscopy and X−ray diffraction were used to systematically observe and study the microscopic characteristics, composition and content of clay minerals in the Yaojia Formation sandstones of the Qianjiadian area. Then, characteristics of the clay minerals were discussed in detail. **[Results]** The clay minerals are mainly kaolinites, followed by smectites, chlorites and illites. Clay minerals are important adsorbents for uranium enrichment in sedimentary rocks, and the adsorption capacity of different clay minerals to uranium is different. **[Conclusions]** The Yaojia ore− forming environment experienced the acidic environment in the early ore−forming stage and the weakly alkaline environment in the late ore−forming stage. And there are a series of mutual transformation relations between different clay minerals in this process. The change of clay mineral content not only affects the physical properties of uranium reservoir but also influences the enrichment of uranium. Under the action of clay mineral adsorption, a large amount of uranium was pre−enriched in the process of sandstone diagenesis of Yaojia formation, which laid a solid material foundation for the formation of extra−large uranium deposits in Qianjiadian area.

Key words: sandstone− type uranium deposit; Qianjiadian area; clay minerals; Yaojia Formation; Songliao Basin; Mineral exploration engineering

Highlights: The clay minerals are mainly kaolinites, followed by smectites, chlorites and illites of the Qianjiadian area. Under the joint action of different kinds of clay minerals, a large amount of uranium is preenriched in Yaojia Formation.

About the first author: SHAN Zhibo, male, born in 1988, master's degree, engineer, majors in mineralogy, petrology and mineral deposit geology; E−mail: shanzhibo1988@163.com.

Fund support: Supported by Scientific Research and Technology Development Project of China National Petroleum Corporation (No. 2019A−4809(GF)).

1 引 言

开鲁盆地位于松辽盆地西南部，钱家店凹陷属开鲁盆地内的次级负向构造单元，凹陷内姚家组为研究区重要的含铀岩系。近年来随着铀矿勘查程度的深入，在松辽盆地西南缘发现了钱家店特大型砂岩型铀矿床。关于该矿床成岩作用及岩石学特征、地球化学特征、沉积体系、物质来源及成矿模式的研究，前人已做过较多工作（赵忠华等，1998；李胜祥，2002；夏毓亮等，2003；张明瑜等，2005；陈方鸿等，2005；罗毅等，2007；陈晓林等，2007；李宏涛等，2008；林锦荣等，2009；马汉峰，2010；荣辉等，2016；张万亮等，2017；陈路路等，2018；焦养泉等，2018；徐增连等，2018，2019；单芝波，2019；夏飞勇等，2019），并取得了一系列的研究成果。然而，对于黏土矿物特征及其在铀成矿过程中的作用研究较少，李建国等（2018）主要采用岩心光谱扫描手段研究了钱家店地区层间氧化带各个分带的黏土矿物组合类型，对于矿层中黏土矿物详细特征及矿石与围岩的黏土矿物差异性并没有系统的分析。

鉴于此，笔者对盆地西南缘出露的上白垩统进行了系统的剖面测量以及层序地层的划分对比工作，并以姚家组的砂岩为研究对象，立足于含矿层中黏土矿物的研究。通过对砂岩及黏土矿物组合特征分析，研究黏土矿物的成岩演化，进而探讨与铀成矿之间的关系，为成矿预测提供有价值的信息，同时也对进一步指导钱家店地区铀矿勘探具有重要意义。

2 地质背景

钱家店凹陷位于开鲁盆地的东北部，呈北东−南西向带状展布，长约100 km，宽9~20 km，面积1280 km²（图1）。研究区内出露的地层自下而上为白垩统青山口组（K_2qn）、姚家组（K_2y）、嫩江组（K_2n）和第四系（Q），缺失四方台组—古近系。姚家组是本区的主要含矿层位，可分为两段，姚下段以浅灰色细砂岩、浅红色细砂岩为主，夹灰色泥岩、紫红色泥岩，厚60~80 m；姚上段以浅灰色细砂岩、浅灰色含泥砾细砂岩为主，夹紫红色、浅灰色泥质粉砂岩，厚65~90 m。地层单斜产出，倾角为3°~5°，地层厚度在150~230 m，底板埋深为350~450 m。

钱家店铀矿体产于上白垩统姚家组下段，铀矿体与沉积砂体产状一致。矿体产于灰色、浅灰色细砂岩中，在灰色泥岩透镜体或泥岩夹层中常见铀矿

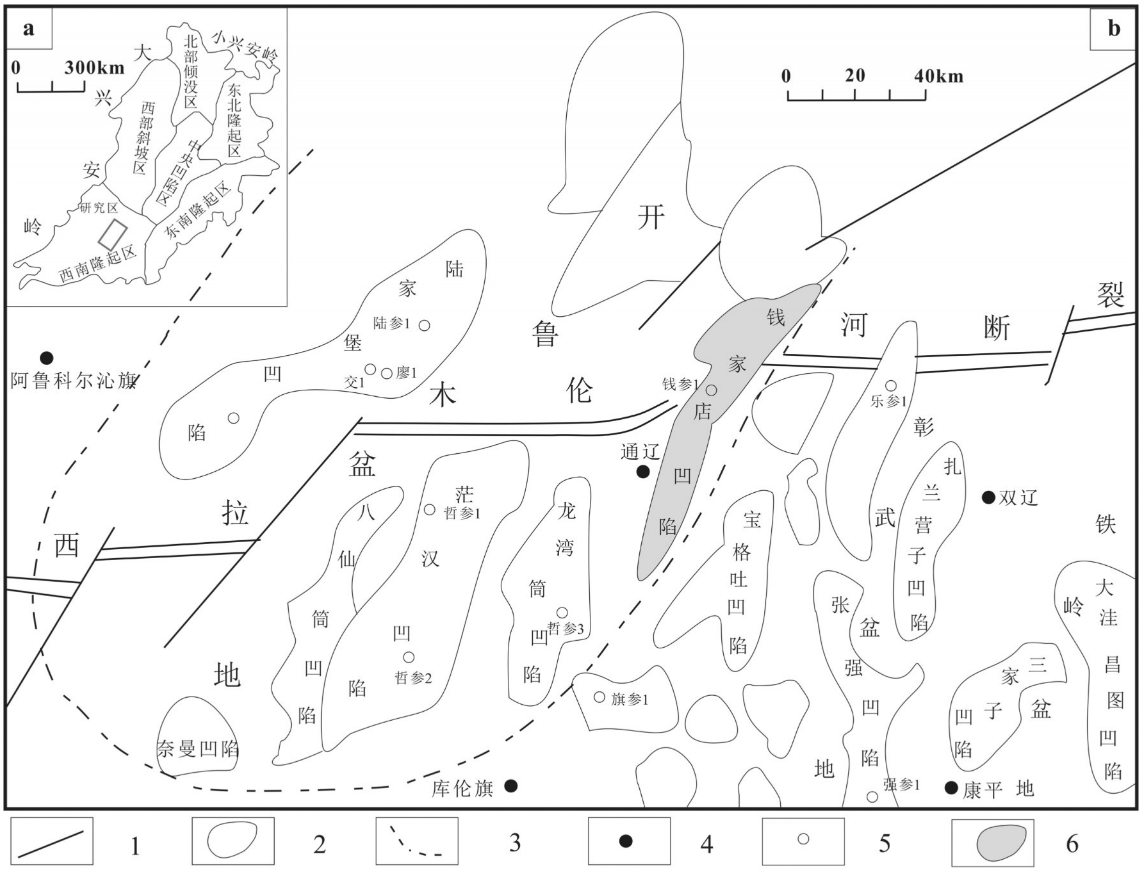

图1 开鲁盆地内部构造单元与断裂分布（据聂逢君等，2017修改）

a—研究区位置简图；b—开鲁盆地构造简图；1—断层；2—凹陷；3—盆地边界；4—地名；5—参数井；6—研究区

Fig.1 The interior units of the Kailu basin and the distribution of faults(after Nie Fengjun et al., 2017)

a−Study area location schematic; b−Tectonic schematic of Kailu basin; 1−Fault; 2−Concave; 3−Basin boundary; 4−Place names; 5−Parameter well; 6−The study area

化甚至富矿化段。矿体在平面上的形态有菱形、近似方形(或方形)、多边形的板状；倾向上形态为板状、透镜状，及板状透镜状的组合。发育辫状河沉积砂体，砂体渗透性较好，厚度大，范围广，分布稳定，是铀成矿砂体发育的有利层位(图2c)。

3　样品采集及测试方法

研究样品均采自松辽盆地西南缘钱家店地区姚家组剖面(图2)。岩性均为灰色中细粒长石岩屑砂岩。对10口井的26件样品测试黏土矿物含量及扫描电镜观测，黏土矿物含量测定及组成鉴定均在核工业北京地质研究院分析测试中心完成，其中黏土矿物含量测定由X射线衍射分析，测试所用仪器型号为Panalytical X’Pert PRO，检测依据为《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物X射线衍射分析方法》(SY/T5163−2010)；黏土矿物组成鉴定在扫描电子显微镜（SEM）下进行，并将具新鲜断面的小块泥岩原岩样品做喷炭导电处理，分析仪器为Quanta 200，实验条件为电压20 kV，束流为1~3 nA。检测方法依据GB/T17361−2013《微束分析、沉积岩中自生黏土矿物鉴定、扫描电子显微镜及能谱仪方法》。

4　姚家组砂岩黏土矿物组成

在野外地质调查和系统的岩心编录的基础上，对钱家店地区姚家组26件砂岩样品分别进行全岩和黏土的XRD分析，并结合宏观和薄片镜下观察、扫描电镜及电子探针分析测试，阐明了钱家店地区姚家组砂岩及其黏土矿物特征。

钱家店地区姚家组砂岩主要为浅灰色中细粒含炭屑长石岩屑砂岩和中细粒含泥砾长石岩屑砂

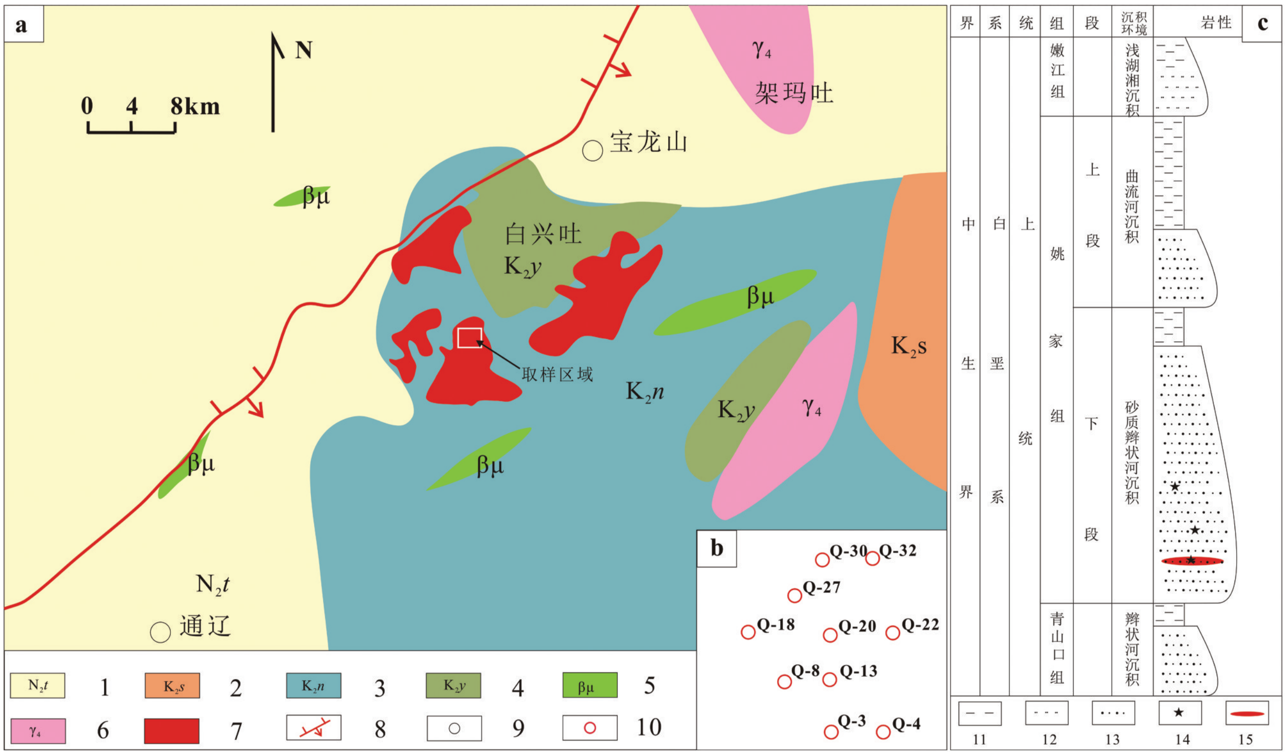

图2 钱家店地区前第四系地质图(a)、主要研究钻孔分布图(b)及地层柱状图(c)
1—泰康组;2—四方台组;3—嫩江组;4—姚家组;5—辉绿岩;6—花岗岩;7—矿区;8—断裂;9—地名;10—钻孔;11—泥岩;12—粉砂岩;13—中细砂岩;14—取样位置;15—铀矿体
Fig. 2 Pre−Quaternary geological map(a), mainly study the borehole distribution map(b) and stratigraphic bar chart(c) of Qianjiadian area
1−Taikang Formation; 2−Sifangtai Formation; 3−Nenjiang Formation; 4−Yaojia Formation; 5−Diabase; 6−Granite; 7−Mining area; 8−Fracture; 9−Place names; 10−Drilling; 11−Mudstone; 12−Siltstone; 13−Medium fine sandstone;14−Sampling position; 15−Uranium ore body

岩。岩石分选性差—中等,碎屑磨圆度中等,为次棱角状—次圆状,碎屑矿物以石英为主,长石次之,岩屑含量较高;岩屑主要为中酸性火成岩,少量的变质岩,岩石成分成熟度较低。以块状构造为主,发育平行(水平)层理、斜层理、波状层理及交错层理。含泥砾砂岩为近源成因,泥砾多为紫红色,少量浅灰色;泥砾粒径变化较大,且磨圆度差,为棱角状—次棱角状,有的未完全固结,具拉长、压扁变形特征。砂岩填隙物以黏土为主,部分含较多的碳酸盐胶结物,铁质和硅质胶结物较少,胶结物形式主要为孔隙式胶结,部分为基底式胶结(图3)。

通过系统的偏光显微镜及扫描电镜观察发现,在钱家店地区姚家组砂岩中共识别出4种黏土矿物:高岭石、伊利石、蒙皂石和绿泥石。

高岭石含量较高,是本区最主要的黏土矿物。在姚家组砂岩中含量为22%~80%(表1),平均值为59.27%,其中含矿砂岩含量为31%~80%,平均值为62.24%;无矿砂岩含量为22%~74%,平均值为53.67%(表2)。在扫描电镜下,高岭石呈书页状、蠕虫状及叶片状,多充填于粒间孔隙中,并富晶间孔隙(图4a、b、c)。该区高岭石的形成主要为钾长石的次生蚀变,是在酸性介质条件下,由酸性流体与含铝矿物反应的产物(殷科等,2012)。

伊利石含量仅次于高岭石。在姚家组砂岩中含量为10%~41%(表1),平均值为20.32%,其中含矿砂岩含量为10%~41%,平均值为20.30%;无矿砂岩含量为14%~32%,平均值为20.37%(表2)。扫描电镜观察,该区绿泥石多位于粒表,也有位于粒间者,单体形貌多为叶片状,聚合体呈蜂窝状(图4d),偶见单体呈栉壳状垂直颗粒表面生长。一般而言,伊利石常形成于富钾的碱性环境(黄思静等,2009)。

蒙皂石含量与伊利石接近,且变化范围较大。在姚家组砂岩中含量为2%~42%(表1),平均值为14.6%,其中含矿砂岩含量为2%~31%,平均值为

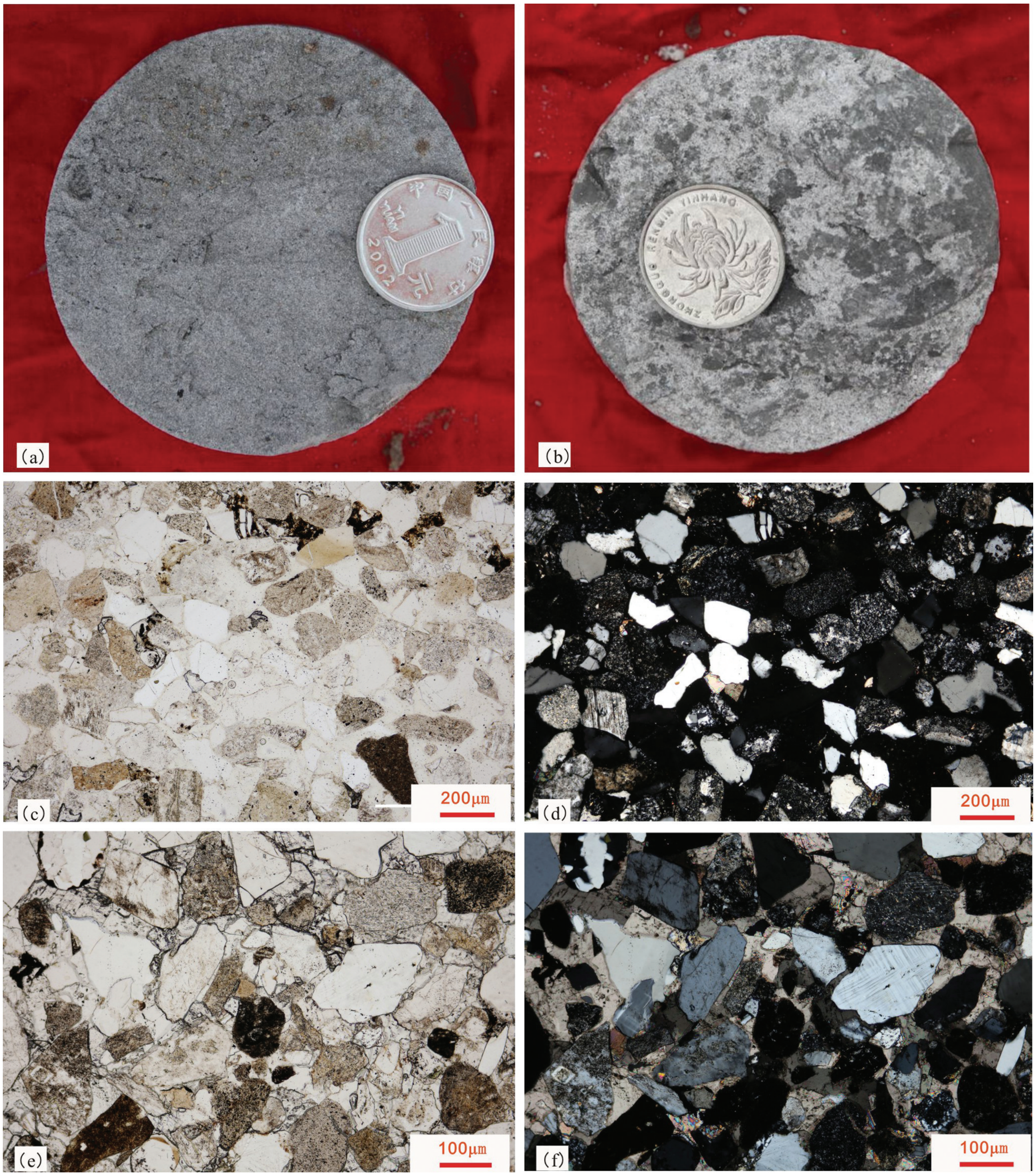

图3 钱家店地区姚家组砂岩宏观和镜下照片
a,b—岩心宏观照片;c,e—单偏光显微照片;d,f—正交偏光显微照片
Fig. 3 Microphotographs showing of sandstone rocks from the Yaojia Formation, Qianjiadian area
a, b−Core macro photograph; c, e−Monopolarized photomicrograph; d, f−Orthogonal polarized photomicrograph

表1钱家店地区姚家组砂岩全岩组分及黏土矿物含量分析结果(%)

Table 1 The whole-rock chemical compositions and clay mineral abundance of sandstone rocks from the Yaojia Formation, Qianjiadian area(%)

钻孔号	样品编号	取样深度	蒙皂石(S)	伊利石(It)	高岭石(Kao)	绿泥石(C)	黏土总量	石英	钾长石	斜长石	方解石	岩性	备注
Q-3	7182	370.5	5	17	72	6	6.3	72.1	7.4	10.8	3.4	深灰色细砂岩	含矿
Q-3	7174	372	9	33	49	9	9.9	60.8	4.2	16	9.1	棕灰色细砂岩	含矿
Q-4	7159	403	4	15	75	6	7.5	72.5	5	11.2	3.8	深灰色细砂岩	含矿
Q-8	7160	382	2	14	78	6	6	76.2	4.6	11	2.2	深灰色细砂岩	含矿
Q-8	7161	383.5	3	12	76	9	8.1	64.2	7.6	11.2	8.9	深灰色细砂岩	含矿
Q-13	7186	355.5	21	26	47	6	11.2	57	7.9	15.4	8.5	灰色细砂岩	含矿
Q-13	7150	359.5	31	22	43	4	9.5	72.2	5.8	10.6	1.9	浅灰色细砂岩	含矿
Q-18	7168	369	27	16	51	6	6.5	69.6	7.8	14	2.1	深灰细砂岩	含矿
Q-20	7196	382	16	30	48	6	7.2	71.9	6.2	13	1.7	灰色细砂岩	含矿
Q-22	7200	381.5	7	22	63	8	8.7	69.4	6.5	13.2	2.2	灰色细砂岩	含矿
Q-22	7149	385	23	41	31	5	10.5	65.9	7.3	14.2	2.1	灰色细砂岩	含矿
Q-27	7190	370	4	17	74	5	9	68.7	5.7	13.7	2.9	灰色细砂岩	含矿
Q-27	7187	376	10	16	69	5	7.5	70.5	7.4	10.7	3.9	棕灰色细砂岩	含矿
Q-30	7189	356	4	15	75	6	8.5	66.1	7.2	14.1	4.1	棕灰色细砂岩	含矿
Q-30	7169	357.5	10	18	67	5	8.6	66.2	6.5	14.5	4.2	棕灰色细砂岩	含矿
Q-32	7170	378.5	13	23	60	4	7.6	65.1	7.3	14.5	5.5	棕灰色细砂岩	含矿
Q-32	7191	380.5	5	10	80	5	8.5	73.6	6.2	9.2	2.5	灰色细砂岩	含矿
Q-3	7157	375.5	30	21	45	4	7.8	65.7	7.7	16.2	2.6	灰色细砂岩	无矿
Q-4	7144	408	42	32	22	4	7.6	56.1	6.3	11	19	浅灰色细砂岩	无矿
Q-8	7146	388	23	21	51	5	7.4	65.4	7.1	16.3	3.8	浅灰色细砂岩	无矿
Q-13	7153	365	18	14	63	5	6	74	6.4	11.6	2	灰色细砂岩	无矿
Q-18	7167	377	15	21	56	8	6.8	71.8	6.2	13	2.2	灰色细砂岩	无矿
Q-20	7184	385.5	14	19	60	7	6.5	71	8.5	13.2	0.8	灰色细砂岩	无矿
Q-22	7147	376.5	25	20	48	7	5	70.7	6.9	12.5	4.9	灰色细砂岩	无矿
Q-22	7151	383.5	12	18	64	6	5.1	71.3	8.5	13	2.1	灰色细砂岩	无矿
Q-32	7194	384	5	17	74	4	7.4	64.8	6.7	17.6	3.5	灰色细砂岩	无矿

11.53%;无矿砂岩含量为5%~42%,平均值为20.40%(表2)。在扫描电镜下,常以集合体形式分布于颗粒之间(图4e)。一般由中酸性岩浆岩岩屑和长石在碱性条件下发生水岩反应形成(赵华雷等,2018)。

绿泥石含量较少。在姚家组砂岩中含量为4%~9%(表1),平均值为5.81%,其中含矿砂岩含量为4%~9%,平均值为5.94%;无矿砂岩含量为4%~8%,平均值为5.56%(表2)。在扫描电镜下,呈现花朵状分布于颗粒表面或晶粒之间(图4f)。一般是在富含铁、镁的碱性介质条件下形成的自生黏土矿物。

5 讨 论

5.1 姚家组砂岩黏土矿物特征

26件X衍射数据按照含矿砂岩和无矿砂岩分类整理归纳(图5),对其成分特征加以分析。结果表明,矿石与非矿石样品的物质组成及黏土矿物种类无明显差别。(1)含矿砂岩与无矿砂岩的石英组

表2 钱家店地区姚家组砂岩全岩X-衍射分析及黏土相对含量分析统计(%)

Table 2 Statistics of X-ray diffraction analysis and relative clay abundance of sandstone rocks from the Yaojia Formation, Qianjiadian area (%)

岩性	黏土总量	石英	钾长石	斜长石	方解石	蒙皂石(S)	伊利石(It)	高岭石(Kao)	绿泥石(C)
含矿砂岩	8.30	68.35	6.51	12.78	4.06	11.53	20.30	62.24	5.94
无矿砂岩	6.62	67.87	7.14	13.82	4.54	20.40	20.37	53.67	5.56

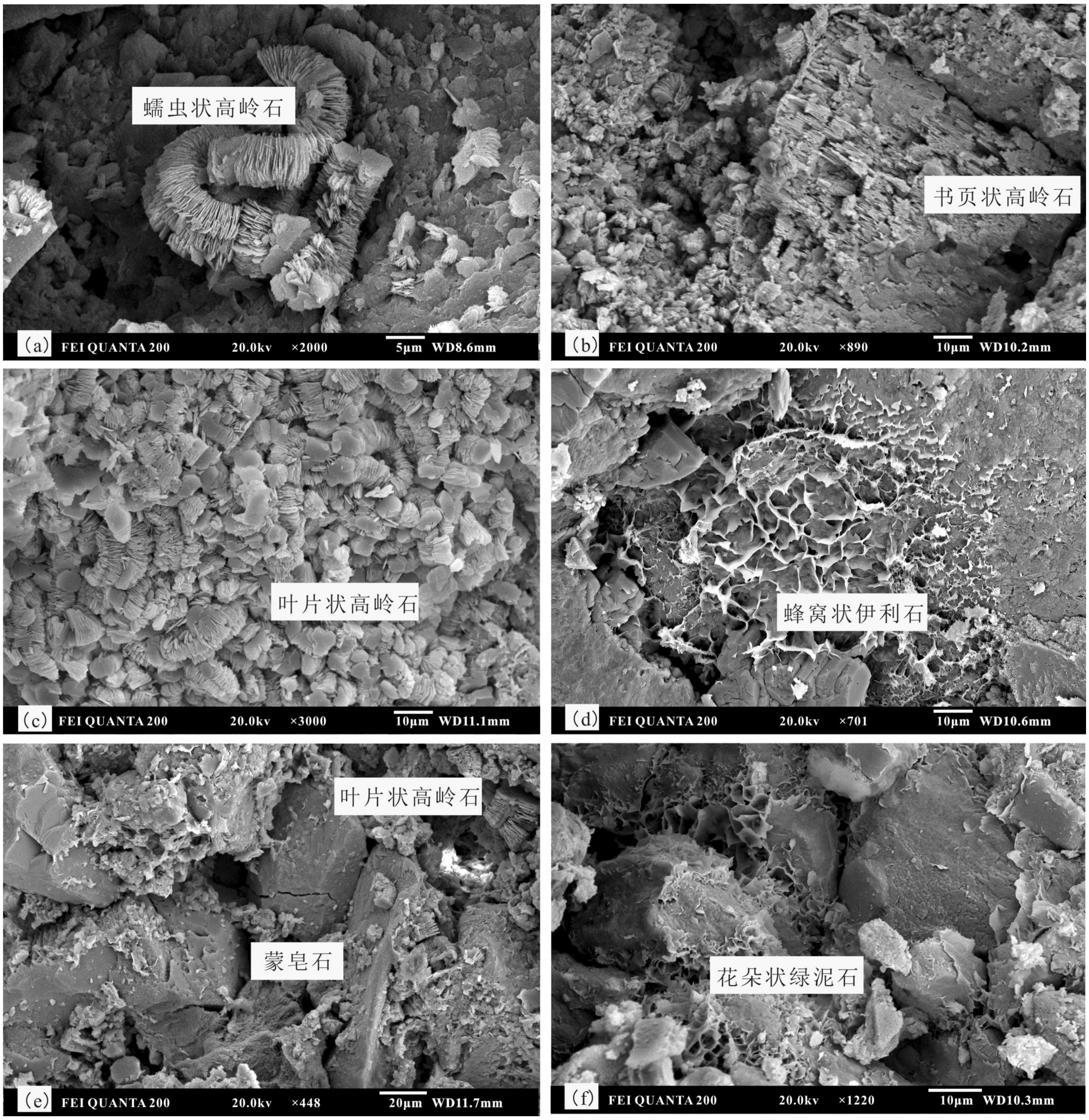

图4 钱家店地区姚家组砂岩黏土矿物扫描电镜照片

a—粒间蠕虫状高岭石;b—斜长石碎屑被强烈淋滤,粒表书页状高岭石;c—碎屑粒间片状高岭石;d—分布于颗粒表面的蜂窝状伊利石;e—位于粒间的蒙皂石集合体和叶片状高岭石;f—粒间花朵状绿泥石

Fig. 4 Scanning electron microphtographs showing the clay minerals of sandstone rocks from the Yaojia Formation, Qianjiadian area

a−Intergranular vermicular kaolinite; b—Strongly leached plagioclase detritus, grain surface page kaolinite; c−Intergranular flake kaolinite; d−Honeycomb kaolinite on the surface of particles; e−Aggregates of smectite and foliate kaolinite located between grains; f−Intergranular flower-like chlorite

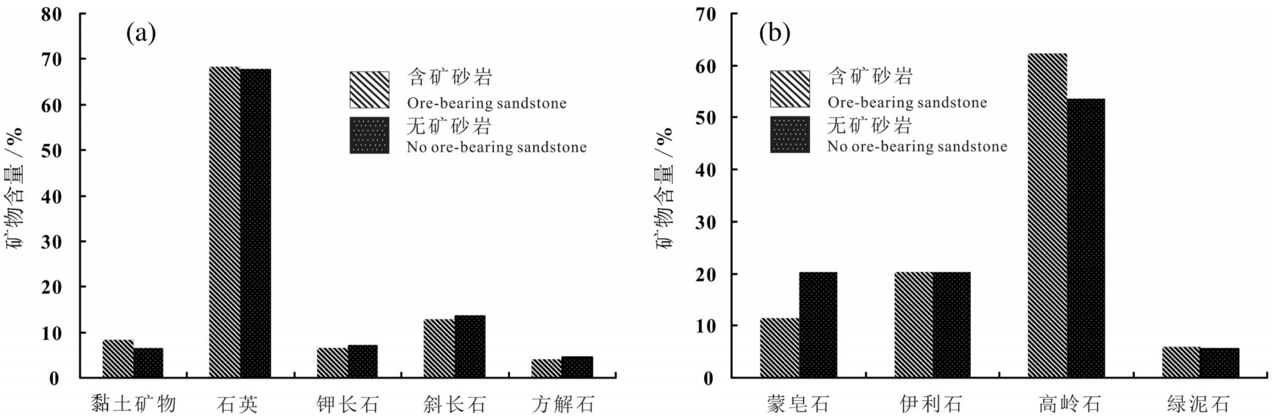

图5 钱家店地区姚家组砂岩X衍射全岩分析柱状图(a)及黏土矿物含量对比柱状图(b)
Fig.5 Histograms showing the comparison of whole-rock chemical compositions (a) and clay mineral abundance (b) of sandstone rocks from the Yaojia Formation, Qianjiadian area

分大体相当;(2)含矿砂岩较无矿砂岩黏土矿物总量升高;(3)与无矿砂岩相比,含矿砂岩中钾长石、斜长石及方解石含量均表现出较低的含量;(4)伊利石和绿泥石的含量在两种砂岩中无明显变化;(5)含矿砂岩在高岭石含量方面明显高于无矿砂岩,而蒙皂石含量在含矿砂岩中明显降低。

基于钱家店地区姚家组黏土相对含量数据,对黏土矿物做线性回归分析,结果表明:高岭石含量与蒙皂石含量呈现很好的负相关(图6a),相关系数为0.8146,高岭石含量与伊利石含量也具有较强的负相关性(图6b),相关系数为0.6843,暗示高岭石与蒙皂石、高岭石与伊利石之间存在较强烈的转化。蒙皂石含量与伊利石含量呈现较差的正相关(图6c),相关系数为0.2671,表明蒙皂石和伊利石为一定的环境条件下同时生成的产物。蒙皂石含量和绿泥石含量呈现较差的负相关(图6d),相关系数为0.1385,暗示两种矿物存在少量的转化关系。绿泥石与高岭石、绿泥石与伊利石之间相关系数分别为0.029、0.0004(图6e、f),表明相关系数均较差,可能与姚家组砂岩中绿泥石含量较低有关。

高岭石可能是沉积作用过程中从成矿溶液中晶出或是由铝硅酸盐如长石蚀变形成。姚家组沉积时期,开鲁盆地处于温暖潮湿的气候环境,母岩化学风化作用强,一些碱金属碱土金属元素容易经淋滤流失,先形成蒙脱石,进一步形成高岭石,因而钱家店地区陆源碎屑沉积砂岩含有大量高铝硅酸盐的矿物,为高岭石形成提供了物质基础(罗毅等,2012)。蒙皂石往往是沉积晚期及成岩期的产物,其介质环境具有一定的盐度,pH较高。徐叶净等(2013)指出热液自生黏土矿物主要是蒙皂石矿物,其次是绿泥石矿物,高岭石、伊利石矿物相对较少,因此本区局部蒙皂石含量的升高可能与深部热流体的参与密切相关。黏土矿物在一定条件下会相互转化,其含量也会发生改变。高岭石在富含钙、镁或钠的碱性介质中可以转化为蒙皂石,而在富铁的介质中可转化为绿泥石;若孔隙水中富含钾,蒙皂石也可向伊利石发生转化(Merriman,2005)。黏土矿物在成岩作用过程中随着埋藏深度温度和压力的增加,可发生相互转化,蒙脱石在成岩过程中的伊利石化需要至少1500 m的埋深(徐叶净等,2013)。钱家店地区姚家组埋深均小于600 m,仅经历了早成岩作用,可能为该区储层中伊利石含量较少的原因。钱家店地区碱性的含氧含铀水在流经过渡带时,随着物理化学环境的改变,出现酸化现象,pH降低,造成高岭石的富集,这是矿区无论是含矿砂岩还是无矿砂岩黏土矿物均以高岭石为主体的内因。而含矿砂岩黏土矿物总量和高岭石含量较高的原因可能是伴随着铀的沉淀富集,储集体发生了更强烈的蚀变作用。

5.2 黏土矿物与储层物性的关系

黏土矿物的含量、成岩变化和产状是影响砂岩孔隙度和渗透性的重要因素(Neasham,1977;葛坦等,2009)。黏土矿物特征与其生成环境密切相关,晶形完好的自生黏土矿物生成于地下水补、径、排

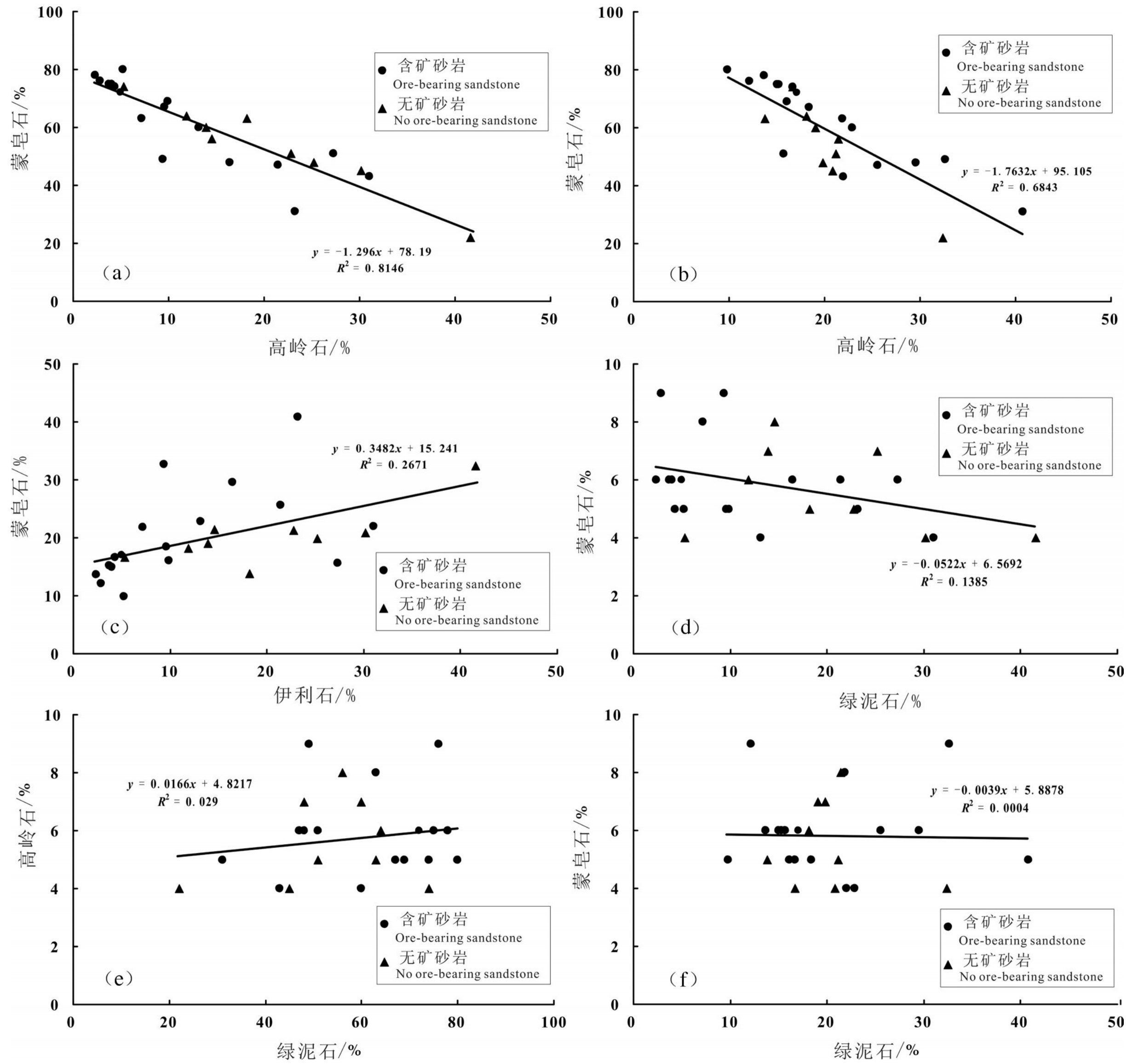

图6 钱家店地区姚家组砂岩黏土矿物含量关系图

a—蒙皂石与高岭石关系图；b—伊利石和高岭石关系图；c—蒙皂石和伊利石关系图；d—蒙皂石和绿泥石关系图；e—高岭石和绿泥石关系图；f—伊利石和绿泥石关系图

Fig. 6 Correlations showing the clay abundance of sandstone rocks from the Yaojia Formation, Qianjiadian area

a−Correlation diagram of smectite and kaolinite; b−Correlation diagram of illite and kaolinite; c−Correlation diagram of monzonite and illite; d−Correlation diagram of smectite and chlorite; e−Correlation diagram of kaolinite and chlorite; f−Correlation diagram of illite and chlorite

体系通畅的沉积环境（刘铭艳等，2007；应立朝等，2013）。黏土矿物作为砂岩中重要的填隙物，对砂岩渗透率和孔隙度具有重要影响，进而影响铀的迁移和沉淀。其质量分数过高将影响砂岩孔隙度，降低砂岩渗透性，不利于铀的沉淀富集（张晓等，2013）。刘铭艳等（2007）指出与黏土矿物含量大于10%的砂岩相比较，含量小于10%的砂岩孔隙度和渗透率对黏土矿物含量的变化更为敏感。由于黏土矿物含量影响了储层空隙，进而改变了U赋存空间，利于铀在特定部位富集成矿。砂岩中黏土矿物质量分数过高不利于U的迁移和沉淀；另一方面若砂岩黏土矿物质量分数低，不利于U在过渡带的沉淀和富集，秦明宽等（1998）解释为黏土矿物对U沉淀富集的抑制作用。

根据薄片资料并结合野外岩心观察发现,黏土矿物是姚家组砂岩主要的胶结物,产状主要为包壳状、团块状及条带状,是岩屑及长石的溶蚀及黏土化的产物。黏土矿物的胶结作用对砂岩物性的影响表现在其占据了一定的孔隙空间,同时有些黏土矿物可能会形成于喉道中,甚至堵塞喉道而使渗透率大大降低。铀容易在具有相对较好的物性条件,并且含有少量泥质的岩层中富集成矿。黏土矿物起到两方面作用,一方面使岩层中富含铀的流体流动减缓,延缓吸附或水岩反应时间;另一方面泥质对铀元素具有很好的吸附性。因此对铀的富集成矿来说,既要保证流体在其中能流动,但又不能过快,并且要有一定的吸附质,也就是同时具有良好的储集空间和流体运移通道,粒间孔、粒内孔及铸模孔为比较有利的孔隙类型,而特大孔、裂隙及微孔隙为不利于成矿的孔隙类型。由于姚家组砂岩物性条件整体比较好,黏土矿物胶结对砂体整体的物性影响不大,相反,适量疏松多孔的黏土矿物可能会增强砂体的吸附性,使铀元素更易富集成矿。铀矿的富集需要一定的地下水流条件和吸附条件,因此,在砂体厚度适中的河道充填微相中比在砂体较厚、较纯的心滩中更易成矿。

5.3 黏土矿物与铀成矿的关系

钱家店铀矿床矿石中铀存在形式有3种:铀矿物、吸附铀及含铀矿物。其中以铀矿物和吸附状态铀为主,吸附剂主要为黏土矿物及有机质(张明瑜等,2005;罗毅等,2007)。对钱家店钻探岩心观察,发现富含炭屑的灰色砂岩中铀含量往往较高,电子探针分析结果表明铀矿物主要分布在有机质周围;富含泥砾的灰色砂岩同样铀含量较高,黏土矿物与铀紧密共生,暗示了其对铀的吸附作用(荣辉等,2016)。

Charles(1996)指出,在铀发生还原作用之前,通过有机质的吸附作用,可以加速铀的富集;相应的,经过吸附作用的预富集,可以加速铀的还原。姚家组灰色砂岩中含有较丰富的有机碳,这些有机碳足够还原氧化性流体中的铀元素,同时丰富的有机碳可作为良好的吸附剂,有利于铀元素富集成矿。黏土矿物是沉积岩中铀富集的重要吸附剂,铀在黏土矿物表面被吸附是影响铀在天然水体中迁移的一种重要机制,矿石中占相当比例的铀以分散吸附状态存在于黏土矿物中。虽然黏土矿物因具有一定的吸附性,对U有一定的吸附富集作用,其吸附能力不如有机质(张淑苓等,1983)。但是考虑到砂岩中黏土矿物总量远高于有机质,因此,其成矿潜力和成矿总量仍然较为可观,所以对于钱家店铀矿床而言,有机质和黏土矿物均起着重要的吸附作用。

在表生条件下,黏土矿物通过吸附作用使铀沉淀和富集,黏土矿物带负电荷很容易吸附表生带中带正电荷、水解能力弱铀酰离子。不同种类的黏土矿物对铀的吸附能力存在一定差异。黏土矿物比表面积和阳离子交换能力对其吸附铀的能力有很大影响,吸附剂比表面积越大,吸附铀的能力越强;阳离子交换能力越强,吸附铀的能力越强。蒙皂石比表面积远大于高岭石,蒙皂石的阳离子交换能力同样大于高岭石(杨殿忠等,2005;游伟华等,2015),因此,蒙皂石具更强的铀吸附能力,然而钱家店地区姚家组砂岩中蒙皂石含量远低于高岭石含量,从而推测蒙皂石对铀沉淀富集的贡献低于高岭石。高岭石和伊利石等黏土矿物均对铀元素具有不同程度的吸附。

层间水中氧化还原电位及pH值是控制层间氧化带砂岩铀矿成矿作用的决定性物理化学条件,还原地球化学障的出现是层间氧化带铀矿化的前提,而酸性地球化学障为铀沉淀富集提供了有利条件(赵杰等,2002)。田时丰(2005)对钱家店地区姚家组矿石和围岩的U含量与pH值进行了整理归纳,并探讨了两者之间关系。结果表明,含矿砂岩pH值明显低于无矿砂岩,pH值与U含量具有负相关性,暗示了酸化作用有利于铀矿化,碱化作用不利于铀矿化。钱家店地区姚家组砂岩中大量的高岭石就是在这种酸性条件下由长石或中酸性岩浆岩岩屑转变而来。荣辉等(2016)通过研究钱家店铀矿床蚀变矿物演化序列,指出姚家组成矿环境经历了成矿早期的酸性环境和成矿晚期的弱碱性环境。钱家店地区高岭石与蒙皂石相关性较好,伊利石次之,暗示这两种黏土矿物可能为,在成矿晚期的弱碱性介质环境下经高岭石转化而来的产物。

6 结 论

(1) 钱家店地区姚家组砂岩黏土矿物以高岭石

为主,其次为伊利石和蒙皂石,绿泥石含量较低。高岭石多呈蠕虫状、叶片状及书页状;伊利石单体形貌多为叶片状,聚合体呈蜂窝状;蒙皂石呈花朵状集合体。

(2) 黏土矿物是沉积岩中铀富集的重要吸附剂,姚家组砂岩中不同黏土矿物之间在层间氧化过程中存在着一系列的相互转化关系,其含量变化不仅影响着铀储层物性特征,同时也影响着铀的沉淀富集。

(3)在黏土矿物吸附作用下,姚家组砂岩成岩过程中,预富集了大量的铀,为钱家店地区形成特大型铀矿床奠定了坚实物质基础。

References

Charles. 1996. The roles of organic matter in the formation of uranium deposits in sedimentary rocks[J]. Ore Geology Review, (11): 54 − 55.

Chen Fanghong, Zhang Mingyu, Lin Changsong. 2005. Sedimentary environments and uranium enrichment in the Yaojia Formation, Qianjiadian depression, Kailu Basin, Nei Mongol[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 25(3): 74− 79 (in Chinese with English abstract).

Chen Lulu, Tang Chao, Li Jianguo, Zhong Yanqiu, Gu Shefeng, Wei Jialin, Xiao Peng, Xu Zenglian, Zeng Hui, Liu Huajian, Chen Yin. 2018. Petrology characteristics of the uranium− bearing layer of Sifantai Formation in Daqing placanticline of Songliao basin and their geological implications[J]. Geological Survey and Research, 41(1): 33−39,66 (in Chinese with English abstract).

Chen Xiaolin, Xiang Weidong, Li Tiangang, Xia Yuliang, Zheng Jiwei, Pang Yaqing. 2007. Lithofacies characteristics of ore− hosting horizon and its relationship to uranium mineralization in Qianjiadian uranium deposit, Songliao basin[J]. Uranium Geology, 23(6): 335−341 (in Chinese with English abstract).

Ge Tan, Han Jiangwei. 2009. Characteristics of clay minerals and geochemistry and soil−forming environment of the red weathering crusts in Weizhou Island and Xieyang Island, Guangxi[J]. Geology in China, 36(1): 203−213(in Chinese with English abstract).

Huang Sijing, Huang Keke, Feng Wenli, Tong Hongpeng, Liu Lihong, Zhang Xuehua. 2009. Material exchange between feldspar kaolinite and the formation of secondary pores during diagenesis: A study of the xujiahe formation in the upper Paleozoic of Ordos basin and Triassic in west Sichuan sag [J]. Geochemistry, 38(5): 498−506 (in Chinese with English abstract).

Jiao Yangquan, Wu Liqun, Rong Hui. 2018. 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 Science, 43(2):459−474 (in Chinese with English abstract).

Li Hongtao, Wu Shixiang, Cai Chunfang, Luo Xiaorong. 2008. Forming processes of petroleum− related sandstone− type uranium ore: Example from Qianjiadian uranium deposit[J]. Geochimica, 37 (6): 235−532 (in Chinese with English abstract).

Li Jianguo, Jin Ruoshi, Zhang Bo, Miao Peisen, Yang Kai, Li Hongliang, Wei Jiallin, Ao Cong, Cao Minqiang, Zhang Hongliang, Zhu Qiang. 2018. Characteristics of primary clay minerals in the Upper Cretaceous Yaojia Formation of Southwest Songliao Basin and their significance[J]. Acta Geoscientica Sinica, 39(3): 295−305 (in Chinese with English abstract).

Li Shengxiang. 2002. Geological Evolution History of Songliao Basin and Prospecting Direction of Sandstone− type Uranium Deposits[D]. Beijing Institute of Geology, Nuclear Industry, 59: 114−115 (in Chinese with English abstract).

Lin Jinrong, Tian Hua, Dong Wenming, Xia Yuliang, Zheng Jiwei, Qi Daneng, Yao Shancong. 2009. Original geochemical types and epigenetic alteration of rocks in prospecting target stratum for uranium deposit in the southeast of Songliao basin[J]. Uranium Geology, 25(4): 202−207 (in Chinese with English abstract).

Liu Mingyan, Zhang Zhanfeng. 2007. Study on the characteristics of clay minerals in Shuixigou group at the south edge of Yili basin and its significance[J]. Uranium Geology, 23(5):275− 282 (in Chinese with English abstract).

Luo Yi, He Zhongbo, Ma Hanfeng, Sun Xiang. 2012. Metallogenic geological characteristics of Qianjiadian sandstone type uranium deposit, Songliao basin [J]. Deposit Geology, 31(2): 391−400 (in Chinese with English abstract).

Luo Yi, Ma Hanfeng, Xia Yuliang, Zhang Zegui. 2007. Geologic characteristics and metallogenic model of Qianjiadian uranium deposit in Songliao basin[J]. Uranium Geology, 23(4): 193−199 (in Chinese with English abstract).

Ma Hanfeng, Luo Yi, Li Ziying, Yu Zhenqing. 2010. Constrain of sedimentary characteristics on the mineralization type of sandstonehosted uranium deposits—A case study of Yaojia Formation in the southern Songliao Basin[J]. World Nuclear Geoscience, 27(1): 6−10 (in Chinese with English abstract).

Merriman R J. 2005. Clay minerals and sedimentary basin history [J]. European Journal of Mineralogy, 17: 7−20.

Neasham J W. 1977. The morphology of dispersed clay in sandstone reservoirs and its effect on sandstone shaliness, pore space and fluid flow properties[C]. SPE6858, 52th Annu. 9−12.

Nie Fengjun, Yan Zhaobin, Xia Fei, Li Mangen, Lu Yayun, Cai Jianfang, Guo Funeng, Ning Jun. 1990. Hot fluid flows in the sandstone——type uranium deposit in the Kailu basin[J]. Geological Bulletin of China, 36(10): 1850−1866 (in Chinese with English abstract).

Qin Mingkuan, Wang Zhengbang, Zhao Ruiquan. 1998. Characteristics of clay minerals and their relationships with uranium mineralization in uranium deposit No.512, Yili Basin[J]. Earth

Science——Journal of China University of Geosciences, 23(5): 508−512 (in Chinese with English abstract).

Rong Hui, Jiang Yangquan, Wu Liqun, Ji Dongmin, Li Hongliang, Zhu Qiang, Cao Minqiang, Wang Xiaomei, Li Qingchun, Xie Huili. 2016. Epigenetic alteration and its constrains on uranium mineralization from the Qianjiadian Uranium Deposit, Southern Songliao Basin[J]. Earth Science, 41(1):154−166 (in Chinese with English abstract).

Shan Zhibo. 2019. Detrital Modal, geochemical characterristics and tectonic setting of the the Yaojia Formation ore−bearing sandstones in Qianjiadian area, Songliao Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 54(2): 1−19 (in Chinese with English abstract).

Tian Shifeng, 2005. Analysis of uranium deposit diagenesis in Qianjiadian Sag of Songliao Basin[J]. Special Oil Gas Reservoirs, 12(5):26−34 (in Chinese with English abstract).

Xia Feiyong, Jiao Yangquan, Rong Hui, Wu Liqun, Zhu Qiang, Wan Lulu. 2019. Geochemical characteristics and geological implications of sandstones from the Yaojia Formation in Qianjiadian Uranium Deposit，Southern Songliao Basin[J]. Earth Science, 44(12): 4235−4251 (in Chinese with English abstract).

Xia Yuliang, Lin Jinrong, Li Ziying, Li Shengxiang, Liu Hanbin, Wang Zhiming, Fan Guang, Zheng Jiwei, Li Zhenji, Zhang Mingyu. 2003. Perspective and resource evaluation and metallogenic studies on sandstone− type uranium deposit in Qianjiadian Depression of Songliao Basin[J]. China Nuclear Information Centre, 3: 5−10 (in Chinese with English abstract).

Xu Yejing, Zuo Wenzhe. 2013. A preliminary study on the genesis of clay minerals [J]. Journal of Hebei United University, 35(1): 68−72 (in Chinese with English abstract).

Xu Zenglian, Tang Chao, Li Jianguo, Wei Jialin, Zeng Hui, Xiao Peng, Liu Jianhua, Chen Lulu. 2018. Sequence stratigraphy of the Sifangtai Formation and its relationship with uranium mineralization in the Sanzhao depression, northern Songliao basin[J]. Geological Survey and Research, 41(1): 24− 32. (in Chinese with English abstract).

Xu Zenglian, Zhang Bo, Li Hongliang, Li Jianguo, Zeng Hui, Zhu Qiang, Cao Minqiang, Wei Jialin. 2019. Geochemistry of the Yaojia Formation sandstone in the Kailu depression, Songliao Basin: Implications for its provenance and tectonic setting[J]. Bulletin of Mineralogy,Petrology and Geochemistry, 38(3): 572−586 (in Chinese with English abstract).

Yang Dianzhong, Yu Man. 2005. The clay mineral characteristics and the relation to uranium mineralization in Turpan− Hami Bsin[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 20(3): 188 −191 (in Chinese with English abstract).

Yin Ke, Hong Hanlie, Li Rongbiao, Han Wen, Wu Yv, Gao Wenpeng. 2012. Mineralogical characteristics and genesis of clay mineral transition facies in Jiujiang reticulated laterite [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 32(10): 2765− 2769 (in Chinese with English abstract).

Ying Lichao, Liang Bin, Wang Quanwei, Zhu Bing, Hao Xuefeng, Liu Liang, Wen Long, Yan Zhonglin, Fu Xiaofang. 2013. Geochemical characteristics of Chengdu clay and their implications for provenance and weathering intensity[J]. Geology in China, 40(5): 1666−1674(in Chinese with English abstract).

You Huawei, Li Mangen, Hu Baoqun,Nie Fengjun, Yang Jianxin, Han Guohao, Zhang Chao, Liu Zhongren. 2019. Characteristics and significance of clay minerals of purpose layer in bayanwula uranium deposit of Erlian Basin[J]. Science Technology and Engineering, 15(36): 15−41 (in Chinese with English abstract).

Zhang Mingyu, Zheng Jiwei, TIAN Shifeng, Xia Yuliang, Liu Hanbin. 2003. Research on existing state of uranium and uranium ore−formationage at Qianjiadian uranium deposit in Kailu depression[J]. Uranium Geology, 21(4): 213−218 (in Chinese with English abstract).

Zhang Shuling, Shu Xiuling. 1983. Preliminary study of the relationship between uranium and some clay minerals[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1(1): 129− 136 (in Chinese with English abstract).

Zhang Wanliang, Su Xuebin, Zhang Bo. 2017. Discution on mining utilization coefficient for in− situ leaching sandstone type uranium resource−A case study of qianjiadian uranium deposit[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 36(1): 19− 22 (in Chinese with English abstract).

Zhang Xiao, Li Xiaocui, Qin Mingkuan, Liu Hongxu, Liu Zhangyue. 2019. Feature of clay minerals in Menqiguer uranium deposit and its relation to uranium mineralization[J]. Uranium Geology, 29(2): 78−85 (in Chinese with English abstract).

Zhao Hualei, Chen Lulu, Feng Xiaoxi, Li Jianguo, Chen Yin, Wang Gui. 2018. Sandstone clay mineral characteristics and preliminary comparative study of Zhiluo Formation in Nalinggou area, Ordos basin [J]. Acta Geologica Sinica, 24(5): 627−636 (in Chinese with English abstract).

Zhao Jie, Luo Mei, Liu Feng, Yang Xuehong. 2002. Formation conditions and distribution features of situ leachableg sandstone−type uranium mineralization in the north of Songliao Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 29(2): 137−143 (in Chinese with English abstract).

Zhao Zhonghua, Liu Guangchan, Cui Changyuan. 1998. The prospecting direction for sandstone type uranium deposit ininterlayered oxidation zone in the southwest of Songliao Basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 17 (3): 156−159 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

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.

陈路路, 汤超, 李建国, 钟延秋, 谷社峰, 魏佳林, 肖鹏, 徐增连, 曾辉,

刘华建, 陈印. 2018.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, 41(1):33−39, 66.

陈晓林, 向伟东, 李田港, 夏毓亮, 郑纪伟, 庞雅庆. 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, 23(6): 335−341.

单芝波. 2019. 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, 54(2): 1−19.

葛坦, 韩江伟. 2009. 涠洲岛和斜阳岛红色风化壳黏土矿物和化学特征及成土环境研究[J]. 中国地质, 36(1): 203−213.

黄思静, 黄可可, 冯文立, 佟宏鹏, 刘丽红, 张雪花. 2009. 成岩过程中长石、高岭石、伊利石之间的物质交换与次生孔隙的形成：来自鄂尔多斯盆地上古生界和川西凹陷三叠系须家河组的研究[J]. 地球化学, 38(5): 498−506.

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.

李宏涛, 吴世祥, 蔡春芳, 罗晓容. 2008. 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, 37(6): 235−532.

李建国, 金若时, 张博, 苗培森, 杨凯, 里宏亮, 魏佳林, 奥琮, 曹民强, 张红亮, 朱强. 2018. 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, 39(3): 295−305.

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]. 核工业北京地质研究院, 59: 114−115.

林锦荣, 田华, 董文明, 夏毓亮, 郑纪伟, 戚大能, 腰善丛. 2009. 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, 25(4): 202−207.

刘铭艳, 张占峰. 2007. 伊犁盆地南缘水西沟群黏土矿物特征研究及其意义[J]. 铀矿地质, 23(5): 275−282.

罗 毅, 何中波, 马汉峰, 孙祥. 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, 张泽贵. 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): 193−199.

马汉峰, 罗毅, 李子颖, 于振清. 2010. 沉积特征对砂岩型铀成矿类型的制约——以松辽盆地南部姚家组为例[J]. 世界核地质科学, 27(1):6−10.

聂逢君, 严兆彬, 夏菲, 李满根, 卢亚运, 蔡建芳, 郭福能, 宁君. 2017. 内蒙古开鲁盆地砂岩型铀矿热流体作用[J]. 地质通报, 36(10): 1850−1866.

秦明宽, 王正邦, 赵瑞全. 1998. 伊犁盆地512铀矿床黏土矿物特征与铀成矿作用[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 23(5): 508−512.

荣辉, 焦养泉, 吴立群, 季东民, 里宏亮, 朱强, 曹民强, 汪小妹, 李青春, 谢惠丽. 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): 154−166.

田时丰. 2005. 松辽盆地钱家店凹陷铀成矿条件分析[J]. 特种油气藏, 12(5): 26−34.

夏飞勇, 焦养泉, 荣辉, 吴立群, 朱强, 万璐璐. 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, 林锦荣, 李子颖, 李胜祥, 刘汉彬, 王志明, 范光, 郑纪伟, 李真济, 张明瑜. 2003. 松辽盆地钱家店凹陷砂岩型铀矿评价预测和成矿规律研究[J]. 中国核科技报告, 3: 5−10.

徐叶净, 左文哲. 2013. 黏土矿物的成因初步研究[J]. 河北联合大学学报, 35(1): 68 −72.

徐增连, 汤超, 李建国, 魏佳林, 曾辉, 肖鹏, 刘华健, 陈路路. 2018. 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, 41(1): 24−32.

徐增连, 张博, 里宏亮, 李建国, 曾辉, 朱强, 曹民强, 魏佳林. 2019. 松辽盆地开鲁坳陷钱家店地区姚家组砂岩地球化学特征及物源和构造背景分析[J]. 矿物岩石地球化学通报, 38(3): 572−586.

杨殿忠, 于漫. 2005. 吐哈盆地黏土矿物特征及其与铀成矿关系[J]. 地质找矿论丛, 20(3): 188 −191.

殷科, 洪汉烈, 李荣彪, 韩文, 吴钰, 高文鹏. 2012. 九江网纹红土中黏土矿物过渡相的矿物学特征及成因[J]. 光谱学与光谱分析, 32(10): 2765−2769.

应立朝, 梁斌, 王全伟, 朱兵, 郝雪峰, 刘亮, 文龙, 燕钟林, 付小方. 2013. 成都黏土地球化学特征及其对物源和风化强度的指示[J]. 中国地质, 40(5): 1666−1674.

游华伟, 李满根, 胡宝群, 聂逢君, 杨建新, 韩国豪, 张超, 刘忠仁. 2015. 二连盆地巴彦乌拉铀矿床目的层黏土矿物特征及其意义[J]. 科学技术与工程, 15(36): 15−41.

张明瑜, 郑纪伟, 田时丰, 夏毓亮, 刘汉彬. 2005. 开鲁坳陷钱家店铀矿床铀的赋存状态及铀矿形成时代研究[J]. 铀矿地质, 21(4): 213−218.

张淑苓, 束秀琴.1983. 铀与某些黏土矿物之间关系的初步研究[J].沉积学报, 1(1): 129−136.

张万亮, 苏学斌, 张渤. 2017. 可地浸砂岩型铀资源开采利用系数的探讨——以钱家店铀矿床为例[J]. 铀矿冶, 36(1): 19−22.

张晓, 李晓翠, 秦明宽, 刘红旭, 刘章月. 2013. 蒙其古尔铀矿床砂岩中黏土矿物特征及其与铀矿化的关系[J]. 铀矿地质, 29(2): 78−85.

赵华雷, 陈路路, 冯晓曦, 李建国, 陈印, 王贵. 2018. 鄂尔多斯盆地纳岭沟地区直罗组砂岩黏土矿物特征及初步对比研究[J]. 高校地质学报, 24(5): 627−636.

赵杰, 罗梅, 刘峰, 杨雪虹. 2002. 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, 29(2): 137−143.

赵忠华, 刘广传, 崔长远. 1998. 松辽盆地西南部层间氧化带砂岩型铀矿找矿方向[J]. 矿物岩石地球化学通报, 17(3): 156−159.