https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.228



钱家店及外围红杂色含铀目标层位重新划分及其 地质意义

肖 菁^{1,2},秦明宽^{1,2},郭 强^{1,2*},严张磊^{1,2},贾立城^{1,2},刘 鑫³,邢作昌^{1,2}

- 1. 核工业北京地质研究院,北京100029
- 2. 中核集团铀资源勘查与评价技术重点实验室,北京100029
- 3. 核工业二四三大队,内蒙古赤峰 024000

摘 要: 钱家店铀矿床及外围地区含矿目标层位划分不明已成为当前生产和科研迫切需要解决的关键问题. 为准确厘定含矿层位,综合运用地层学、沉积学、砂岩型铀成矿理论,采取岩性、测井、古生物和其他多手段相结合的多重地层对比方法,系统分析了含矿目标层位的识别特征和划分依据. 研究成果证明目前被统归划分为姚家组的含铀红杂色层可以识别并划分出泉头组、青山口组和姚家组,并在此基础上重新厘定了区域上不同矿体的层位归属和矿化特征. 该研究可为松辽盆地南部铀矿勘查突破提供新的找矿思路和地质依据,在此新层位体系下进一步开展成矿规律研究,或许能真正有助于揭示长期以来悬而未决的板状铀矿体成因.

关键词: 钱家店铀矿床;红杂色层;地层划分;孢粉化石;灰色砂体;矿床学.

中图分类号: P536 文章编号: 1000-2383(2024)04-1277-15 收稿日期:2021-06-16

Red-Colored Uranium Target Horizon Reclassification and Its Significance in Qianjiadian Uranium Deposit and Surrounding Areas

Xiao Jing^{1,2}, Qin Mingkuan^{1,2}, Guo Qiang^{1,2*}, Yan Zhanglei^{1,2}, Jia Licheng^{1,2}, Liu Xin³, Xing Zuochang^{1,2}

- 1. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China
- 2. Key Laboratory of Uranium Resource Prospection and Evaluation Technology, China National Nuclear Corporation, Beijing 100029, China
- 3. Geologic Party No.243, China National Nuclear Corporation, Chifeng 024000, China

Abstract: The unclear division of ore-bearing targets in Qianjiadian uranium deposit and its surrounding areas has become a key problem that needs to be solved urgently in current production and scientific research. In order to determine the ore-bearing strata accurately, based on the stratigraphy, sedimentology and sandstone-type metallogenic theories, the identification characteristics and classification basis are systematically researched by using lithology, well logging, paleontology and other means. Research results show that the ore bearing target layer can be identified and divided into three horizons: Quantou Formation, Qingshankou Formation and Yaojia Formation (traditional stratigraphic division classifies it as the Yaojia Formation). On this basis, the strata

基金项目:国防科工局核能开发项目(No.HSL1403).

作者简介:肖菁(1990—),女,博士,从事沉积地层、砂岩型铀矿地质研究工作. ORCID:0000-0002-6288-0328. E-mail: shawjingbao@sina.com * 通讯作者:郭强,E-mail: guoqiang9818@126.com

引用格式:肖菁,秦明宽,郭强,严张磊,贾立城,刘鑫,邢作昌,2024.钱家店及外围红杂色含铀目标层位重新划分及其地质意义.地球科学,49(4):1277-1291.

Citation: Xiao Jing, Qin Mingkuan, Guo Qiang, Yan Zhanglei, Jia Licheng, Liu Xin, Xing Zuochang, 2024. Red-Colored Uranium Target Horizon Reclassification and Its Significance in Qianjiadian Uranium Deposit and Surrounding Areas. Earth Science, 49(4):1277—1291.

attribution and mineralization characteristics of different ore bodies in the region are redetermined. This study can provide a new idea and geological basis for the progress of uranium exploration in southern Songliao basin. Further study of metallogenic regularity under this new horizon system may really help to reveal the genesis of tabular uranium ore body.

Key words: Qianjiadian uranium deposit; red-colored layer; stratigraphic division; pollen-spore; grey sand body; ore deposit geology.

0 引言

砂岩型铀矿具有开采成本低、环保等优势(Tulsidas and Fairclough, 2018),是我国主要的铀矿勘 查种类,大多分布于我国北方各大中一新生代盆地 内(聂逢君等, 2015; 张金带, 2016; 焦养泉等, 2018). 松辽盆地南部钱家店砂岩型铀矿床已实现规 模化工业开采,勘探程度较高,找矿成果突出(蔡煜 琦和李胜祥, 2008; 张金带等, 2010; 李林强, 2014; 朱强等,2015;荣辉等,2016;夏飞勇等,2019;金松 等, 2022, Feng et al., 2023). 近年来, 随着铀矿勘查 工作量的不断投入,在钱家店铀矿床外围的海力 锦、宝龙山、大林、双宝等地区又相继取得重大找矿 突破(张金带等, 2015; Zhao et al., 2018; 蔡建芳 等,2018; 贾立城等,2018; 焦养泉等,2018; 王岩 等,2021),初步控制了一条呈 NNE 向延伸数十千 米的"海力锦一钱家店一宝龙山一大林一双宝"特 大型铀矿带,目前已成为我国砂岩型铀矿勘查的主 要战场之一.

最早钱家店铀矿床取得突破时,主要赋矿层位为上白垩统姚家组下段,为一套灰色含矿砂岩层(Bonnetti et al., 2017;贾立城等,2018;佟术敏等,2019),其顶底界面在钱家店矿区小范围内较好对比,下伏为上白垩统青山口组(含矿灰色砂岩层底

与下伏大套红色洪泛泥岩为界限),上覆为灰砂红 泥互层的姚家组上段.随着外围找矿的相继突破, 发现含矿灰色砂岩段在整个矿带范围内存在多套 且含矿岩性也有所差别,但目前其含矿段层位归属 问题仍认识不清(姚家组下段?青山口组?泉头 组?),其主要原因是含矿目标层整体表现为一套形 成于半干旱炎热古气候条件下的红杂色碎屑沉积 (Xu et al., 2019; 江文剑等, 2023), 与传统的暗色含 煤碎屑岩建造明显不同(Dai et al., 2015; Hall et al., 2017; Bullock and Parnell, 2017), 岩性及测 井上均缺乏明显标志层,层位划分困难.石油系统 对松辽盆地白垩系开展过不少工作,认为盆地南部 上白垩统沉积地层较薄且为边缘相沉积不利于油 气储层的发育,下白垩统才是寻找油气的主攻层 位,故石油系统对上白垩统这套红杂色层并不关 注,从钻孔资料来看,在研究区钱家店凹陷内将这 套红杂色层划分为"姚家组+青山口组",在整个松 辽盆地南部也未将其划分开来(表1).目前铀矿找 矿和研究工作则苦于没有很好的分层依据,暂将铀 矿带内的这套红杂色层均统归划分为姚家组(表 1),这为生产带来一定的方便,但存在着很大的地 质矛盾.首先,若按此划分区域内姚家组厚度变化 太大(海力锦-钱家店-宝龙山-线姚家组厚度仅 约几十米至百多米,但大林一双宝一线姚家组厚度

表1 研究区地层划分方案

Table 1 Stratigraphic division scheme of study area

	研究区地层划分							
松辽盆地南部	海力锦一银	 表家店一宝龙	Щ	大林一双宝地区			松辽盆地北部	
	石油系统	铀矿系统	本次划分	石油系统	铀矿系统	本次划分		
嫩江组	嫩江组	嫩江组	嫩江组	嫩江组	嫩江组	嫩江组	嫩江组	
姚家组+青山口组	姚家组+青山口组	姚家组 -	姚家组		姚家组	姚家组	姚家组	
	姚豕组十宵山口组		青山口组	姚家组+青山口组		青山口组	青山口组	
	泉头组			-	-	泉头组	泉头组	

注:石油系统地层划分主要引自中国石油辽河油田内部报告:2012年《松辽盆地铀资源评价及南部地区铀成矿规律与预测研究》、2010年《钱家店凹陷上白垩统姚家组沉积特征及铀成矿地质条件研究》、2013年《内蒙古通辽市钱家店铀矿床外围详查地质报告》以及收集到的单井资料;铀矿系统地层划分主要引自核工业北京地质研究院内部报告:2015年《松辽盆地南部铀成矿条件评价及靶区优选》、2018年《蒙东一吉黑地区砂岩型铀矿成矿地质条件评价与远景预测》;核工业二四三大队内部报告:2015年《内蒙古通辽市宝龙山铀矿床及外围普查》和2015年《松辽盆地南部余粮堡一白城地区1:25万铀矿资源区域评价》等.

可达三四百米).这在当时坳陷沉积背景下,数十千米甚至数千米范围内同一组段厚度却相差几百米,不符合一般沉积规律;其次,局部地段钻孔揭露上套灰色含矿层直接覆盖于基底上,说明姚家组底界应该为上套灰色含矿砂岩层的底界(即下套灰色含矿砂岩层不应归属于姚家组);再者,下套灰色含矿砂岩层在沉积特征方面与姚家组也存在不同,局部表现为水下沉积特征,与姚家组河流相有较明显的差别,进一步说明下套灰色含矿层不应归属于姚家组.目前铀矿生产单位也逐渐意识到将所揭露的这套红杂色均归入姚家组已经不合实际了,现已成为生产和科研中困惑的难点与亟待解决的重点问题.因此非常有必要对含矿目标层位进行重新厘定与划分.

鉴于此,本文以含矿目标层重新厘定为直接问题,以钱家店及其外围铀矿带为研究对象系统开展层位划分对比研究,初步建立了研究区地层划分的识别方案(表1),并重新厘定了铀矿带内含矿段的层位归属,以期能为研究区不同矿区不同层位的找矿部署提供一定指导.

1 地质背景

松辽盆地是我国东北地区最大的中新生代含油气沉积盆地,属于板内伸展断坳复合型,总面积约26×10⁴ km²(于文斌,2009;Rong et al.,2019).按区域隆起和坳陷的发育特征分为6个一级构造单元(图1a),即中央坳陷区、东北隆起区、东南隆起区、西南隆起区、西部斜坡区、北部倾没区(朱强等,2015;Feng et al.,2017).研究区位于盆地南部西南隆起区内,主要为钱家店凹陷北部、架玛吐隆起西南侧,呈一条NNE向延伸数十千米的"海力锦一钱家店一宝龙山一大林一双宝"特大型铀矿带,具有相似的成矿地质环境,地理位置属于我国内蒙古通辽市境内(图1b).

研究区地表第四系发育,露头出露较差,基底主要为石炭系一二叠系的浅变质岩和侏罗系的火山碎屑岩(颜新林,2018),盖层包括下白垩统义县组、九佛堂组、沙海祖和阜新组的断陷湖盆沉积;上白垩统泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组的河流一湖相沉积以及第四系,缺失嫩江组以上地层(陈晓林等,2006).其中含矿目标层位为上白垩统嫩江组下伏的一套干旱一半干旱气候下形成的红杂色河流相沉积建造(李林强,2014;Xu et al.,2019),厚度

变化较大.砂体厚度较大,部分地区呈现多期砂体叠置,且层组之间缺乏明显的标志层,造成地层界限难以界定,层位划分困难,整体表现为大套红杂色层中夹一套或多套薄层灰色砂岩,灰色砂岩即为赋矿部位(佟术敏等,2019;Jin et al.,2022),区域上变化较大,矿体形态均呈板状、层状或透镜状(Bonnetti et al.,2017),当前该赋矿灰色砂岩段层位归属不明,亟待解决.

2 含矿目标层位识别特征与重新划分

前述可知,研究区含矿目标层位为上白垩统嫩 江组下伏的一套干旱一半干旱气候下形成的红杂 色沉积建造,层位难以直接划分.而铀矿体主要赋 存在红杂色建造中的灰色层顶部、底部或悬空,呈 板状或透镜状(整体表现为大套红杂色层中夹杂较 薄的灰色含矿层),且在区域内变化较大.下面将从 岩性、测井、古生物化石和其他特殊标志等方面分 析和识别这套红杂色含矿目标层,初步建立其地层 划分和对比方案(图 2).

2.1 岩石组合和测井特征

红杂色含矿目标层上覆的嫩江组为松辽盆地区域性标志层,是一套覆盖范围广的暗色厚层稳定泥岩(席党鹏等,2009;李林强,2014),局部夹薄层介壳灰岩,发育大量介形虫、叶肢介化石(图 3a~3c),其平直低阻的测井特征与下伏含矿目标层的指状、箱状高阻特征具明显区别.

通过选取不同矿区典型钻孔进行详细的岩心 观察发现,目标层岩性主要由砾岩、含砾砂岩、中一 粗砂岩、细砂岩、粉砂岩、泥岩组成,颜色以紫红色、 砖红色、灰色一灰白色为主,灰绿色偶见,赋矿岩性 以灰色粗一中砂岩、灰白色细砂岩为主,铀矿带内 不同矿区的含矿岩性有所差别.根据岩石组合及测 井特征初步分析认为,泉头组(大部分钻孔仅揭露 顶部)岩性主要为紫红色砂质砾岩与褐红色泥岩互 层,具有分选磨圆较差、粒度较粗的特点,相应的测 井曲线特征表现为指型,齿化强烈(图 3d).前人研 究认为研究区内泉头组不发育,但本次研究双宝地 区发育泉头组,以灰色中砂岩和紫红色砾岩为主, 局部夹薄层灰色泥岩(图 3e),表现为水下沉积特 征.青山口组中下部为紫红色、灰色中粗砂岩夹薄 层紫红色泥岩(图 3f),整体表现为砂多泥少,相应的 测井曲线齿化剧烈,呈指状或钟型;上部岩性以大 套紫红色泥岩为主(图 3g),整体表现为泥多砂少,

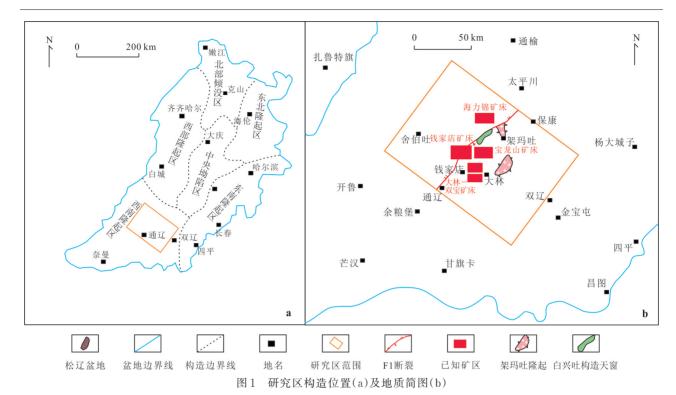


Fig.1 Tectonic location (a) and geological sketch map (b) of research area 图 a 审图号: GS(2019)1697号自然资源部监制

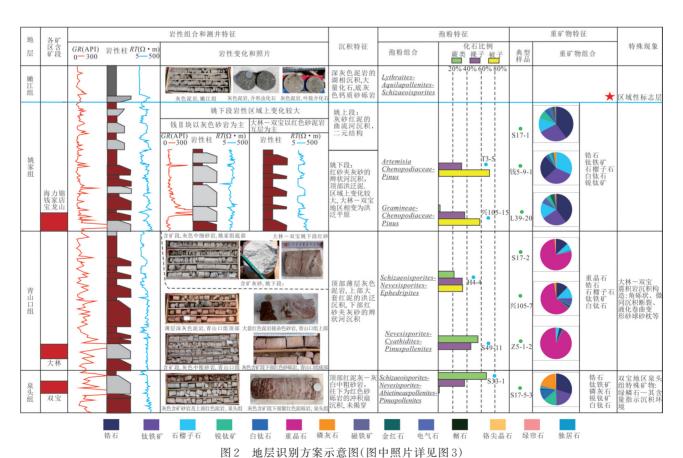


Fig.2 Schematic diagram of strata identifilcation scheme

相应的测井曲线特征较平直,顶部见薄层灰色泥岩 (有资料表明该薄层灰色泥岩为青山口组与姚家组 界面识别标志(图 3g),但从大量钻孔岩心观察发现 在区域上并不稳定).姚家组下部岩性以紫红色泥岩 和紫红色、灰色砂岩为主,夹薄层砂砾岩,分布广 泛,岩性在区域上变化较大(钱家店一宝龙山地区 整体表现以灰色砂岩为主(图 3h~3i),大林一双宝 地区以红色泥岩与薄层细砂岩互层(图 3j),整体表 现为泥多砂少的洪泛平原沉积),相应的测井曲线 特征表现为钟型或箱型,齿化强烈;上部岩性以紫 红色泥岩与浅灰色钙质细砂岩互层为主,呈现"灰 砂红泥"的二元结构,相应的测井曲线表现为箱型, 较光滑平直.

由此可知,含矿目标层位整体表现为红杂色碎屑沉积,岩性组合及测井存在一定规律(图 2),但仅在单个矿区或局部地段较好识别(Rong et al., 2021),区域上仍难以对比,尤其是区域内的青山口组和姚家组出现多期河道砂体叠置现象,更难直接进行层位划分及对比.

2.2 古生物组合特征

孢粉体积很小,一般在10~200 μm,产量很大, 可以随风、水流飘到各种地方,在各类型的沉积岩 中或多或少均有所分布,因而形成横、纵向的化石 分布连续性,目孢粉具有坚固的外壁能抵抗强酸强 碱破坏,经过几亿万年仍能保存良好(余静贤等, 1983; 高瑞祺, 1988). 若两个相邻地区的地层中发现 的孢粉组合的面貌比较相似,那么这两个地方的地 层可以进行对比(高瑞祺等,1994),因此孢粉化石 组合对于地层划分具有良好的地层时代指示意义. 调研发现前人针对松辽盆地晚白垩世孢粉化石做 过一些研究(余静贤等,1983;高瑞祺,1988;高瑞祺 等,1994;叶得泉和徐静慧,1994;田梦等,2005;闫 晶晶等,2007;吴炳伟,2007;席党鹏等,2009;荆夏, 2011),主要是基于地表零星露头剖面和油田钻井 的不连续岩心取样(表2),但由于松辽盆地白垩纪 露头较少、地层不连续而使研究结果均不够完整, 而且对松辽盆地晚白垩世孢粉化石的叙述相对早 白垩世要少,进而针对盆地南部晚白垩世的孢粉研 究则更少.研究区范围内仅温国强等(2017)和徐增



图 3 目的层岩石学特征

Fig.3 Petrological characteristics of target horizon

a. 灰色泥岩, 嫩江组, KT6; b. 介形虫化石, 深灰色泥岩, 嫩江组, L7; c. 叶肢介化石, 灰色泥质粉砂岩, 嫩江组, H16; d. 紫红色泥砾岩, 泉头组, S49; e. 灰色一灰白色中砂岩, 泉头组, S17; f. 紫红色砂砾岩为主, 青山口组底部, 兴87; g. 薄层灰色泥岩, 青山口组顶部, 兴105; h. 灰白色中砂岩, 姚家组, T6; i. 灰色中一细砂岩, 姚家组底部, T6; i. 砖红色粉一细砂岩, 姚家组, S33

表 2 松辽盆地前人孢粉化石研究

Table 2	Summary o	f previous	studies on	sporopollen	fossils of S	Songliao basin

研究范围	嫩江组	姚家组	青山口组	泉头组	文献来源	
松花江南部	被子植物花粉已占据重	未发现孢子花粉	裸子花粉居优势,蕨类次之,被子	蕨类孢子和裸子	余静贤等(1983)	
似化红角即	要地位,类型繁多	木 及现把丁化初	花粉含量不超过10%	花粉交替占优势	宋 肝 页 寺(1983)	
松辽盆地		以大量发育多花孢和	高瑞琪等(1988)			
松辽盆地新站地区	识别7个孢粉和藻类组合				田梦等(2005)	
松辽盆地青山口地 区后金沟剖面	孢粉指示为嫩江组一 段一二段下部				闫晶晶等(2007)	
开鲁盆地	蕨类、裸子、被子各站 1/3	化石稀少	蕨类少于 20%、裸子占 75%、被子约 6.4%	化石稀少	吴炳伟等(2007)	
姚家车站剖面	裸子占优势,蕨类和被子 各具一定比例	化石稀少			席党鹏等(2009)	
松辽盆地东部五条 剖面	识别出嫩三、四段3个孢 粉组合		青一段1个组合,青二段2 个组合,青三段1个组合		荆夏等(2011)	
钱家店凹陷1口井		建立3个孢粉组合,可	对比		徐增连等(2017)	
钱家店凹陷 12 口井		裸子占优势,柏科和花粉繁盛、三沟类发			温国强等(2017)	

连等(2017)通过单井或多井对钱家店姚家组的孢粉化石做过相关研究,而且也不是全井段连续取心分析(表2).

本文在分析研究区孢粉化石资料的基础上,对海力锦、钱家店、宝龙山、大林、双宝矿区共14口典型钻孔(S49、S33、兴99、兴105、兴109、兴101、H4、T6、T14、T3、K10、BK5、HK1、HT1)进行了全井段系统取样.全部送中国科学院南京地质古生物研究所鉴定,筛除孢粉含量不足的样品,分析了具有鉴定意义的样品92块.根据主要孢粉类型纵向相对百分含量变化以及井间横向对比,分析表明含矿目标层自下而上孢粉化石分带明显(图2).

2.2.1 Schizaeoisporites-Nevesisporites-Abietineae-pollenites-Pinuspollenites 组合带(希指蕨孢-三花孢-单束松粉-双束松粉) 该组合鉴定其地质时代为泉头组顶部,研究区 S33、兴 105、兴 101、兴 109、兴 99、S49 井均有该组合的化石产出.组合特征为:①以蕨类植物孢子(64.22%)占绝对优势,裸子植物花粉(34.62%)次之,被子植物花粉(1.16%)仅见少量的藜粉属;②蕨类植物孢子中以希指蕨孢Schizaeoisporites、三花孢Nevesisporites 居多,还有少量的具唇孢、多环孢、波缝孢等;③裸子植物花粉主要单束松粉Abietineaepollenites、双束松粉Pinus-pollenites、麻黄粉(Ephedripites)也有一定比例(图4).这一组合与前人建立的泉头组顶部或青山口组

底部的孢粉组合基本一致,考虑到这时期麻黄属较多,典型青山口组的麻黄属较少,结合岩性特征将其地质时代定为上白垩统泉头组顶部.

2.2.2 Nevesisporites-Cyathidites-Pinuspollenites 组 合带(三花孢-桫椤孢-双束松粉) 该组合地质 时代为青山口组,其组合特征为:①以蕨类植物孢 子(53.09%)和裸子植物花粉(44.58%)为主,比较 来说蕨类植物孢子略占优势,被子植物花粉含量最 低(0.32%~2.32%),见三孔粉 Triporopollenites(最 早出现于晚白垩世 Cenomanian 期,对应青山口时 期);②蕨类植物孢子中以三花孢 Nevesisporites (15.58%)和桫椤孢 Cyathidites(12.34%)居多,其次 为三角孢 Deltoidospora, 无突肋纹孢 Cicatricosisporites 等;③裸子植物花粉(44.58%)主要是松科 花粉,其中双束松粉属 Pinuspollenites 含量最高,为 12.34%,其次为云杉粉 Piceapollis(6.82%),单束松 粉 Abietineaepollenites, 破 隙 杉 粉 Taxodiaceaepollenites hiatus 也有一定含量(图4).这一组合与前人 在野外剖面(黑龙江省宾县以北白石采石场一白石 粮库一带的鸟河剖面)建立的青山口组一段孢粉化 石组合带: Pinuspollenites-Cyathidites, 裸子植物花 粉和蕨类植物孢子占绝对优势,少见被子植物花粉 (荆夏,2011)相似,可以对比.

其中双宝地区样品 S49-5 中的无突肋纹孢 Cicatricosisporites 特征明显,容易鉴定,并且大量资

料表明,该属在早白垩世 Berriasian 期数量很少,至 Valanginian 期才开始增多, Hauterivian 期一Barremian 期大量繁盛.在我国松辽盆地以早白垩世沙河子组一晚白垩世 Cenomanian 期青山口组一段最为丰富,青山口组二、三段以后数量显著减少.保康地区样品 HK1-38 中根据三孔沟粉 Tricolporopollenites(始现于早白垩世 Albian 期)和优美美丽粉 Beaupreaiditeselegansiformis(一般自晚白垩世 Cenomanian 期青山口组开始分布,之后逐渐增多)的出现(图4),结合其孢粉组合综合更确定其样品的地质时代为晚白垩世 Cenomanian 期青山口组.

另外大林地区样品兴 99-6(Abietineaepollenites-Nevesisporites 组合)、兴 101-10 和 ZK 兴 101-11 (Nevesisporites-Pinuspollenites组合以及Pterisiporites 的存在)、兴 105-9(Nevesisporites-Abietineaepollenites组合)、钱 五 块 地 区 T14-3 (Abietineaepollenites-Nevesisporites组合)、和 T14-2 (Pinuspollenites-Cyathidites组合)、海 力 锦 地 区 样 品 H4-4 (Schizaeoisporites-Nevesisporites组合以及 Ephedripites有一定分布)等都比较契合青山口组孢粉组合特征,均可作为划分成青山口组的孢粉证据.

2.2.3 Gramineae-Chenopodiaceae-Pinus 组合带 (禾本科-藜科-松属) 该组合地质时代为姚家组,其组合特征为:①以被子植物花粉(50.01%)和裸子植物花粉(47.38%)为主,其中被子植物花粉含量增长很大,蕨类植物孢子(2.6%)少见;②被子植物花粉中禾本科 Gramineae 高达50.53%,还有少量的藜科 Chenopodiaceae (4.54%)、蒿属 Artemisia (1.87%)和禾本粉属 Graminidites等;③裸子植物花粉(40.58%)以松属 Pinus(37.21%)为主,还有零星的云杉粉属、单束松粉属和杉粉属等;④蕨类孢子中仅见三角孢属 Deltoidospora(1.42%)和桫椤孢属 Cyathidites等(图4).

本组合总的特征与前人建立的姚家组孢粉特征相似,均以被子植物花粉含量增高,类型较多,且较进化的类型频繁出现,占有重要地位,见一定比例的三孔沟花粉(有三孔沟粉表明晚于青山口组);松科、杉科和柏科植物花粉含量较高,综合判定该组合特征反映的是我国松辽盆地姚家组孢粉组合面貌.

另外钱家店地区 T3-5 样品以被子植物花粉 (68.71%)和裸子植物花粉(30.99%)为主,被子植物最多,以 Chenopodiaceae (43.27%)为主;裸子植

物(30.99%)中以 Pinus(14.04%)稍多;基本没有蕨类植物;双宝地区 S33-10样品显示被子植物花粉(61.78%)中 Gramineae 为 52.93%,其次为 Chenopodiaceae(8.22%)和少量 Artemisia等;裸子植物花粉(33.53%)中 Pinus 高达(29.73%)和 Quercus(3.81%)等;蕨类孢子(4.69%)中仅见 S. sinensis等其他同深度样品中的孢粉化石也十分契合该组合特征,综合岩性及地层厚度可将其地质时代均划分为姚家组.

2.2.4 Lythraites-Aquilapollenites-Schizaeoisporites 组合带(千屈菜粉一鹰粉一希指蕨孢) 该组合地 质时代为红杂色层上覆的嫩江组,其组合特征为: ①被子植物花粉类型繁多,含量较高的有山龙眼科 之美丽粉 Beaupreaidites, 千屈菜科之拟千屈菜粉 Lythraites, 高腾粉 Gothanipollis、三孔沟粉 Tricolporopollenites, 三沟粉 Tricolpopollenites 等形态分子, 其中拟千屈菜粉 Lythraites 为组合的特征分子(图 4).②裸子植物花粉以掌鳞杉科之克拉梭粉 Classopollis 含量最高,次为松科之双束松粉 Pinuspollenites和云杉粉 Piceapollis;③蕨类植物孢子以莎草 蕨科之希指蕨孢 Schizaeoisporites 含量居首, 桫椤科 之桫椤孢 Cyathidites 次之. 其中高腾粉 Gothanipollisplicus常见于松辽盆地嫩江组一明水组;大型拟千 屈菜粉 Lythraitesgiganteus 和三角拟千屈菜粉 L. triangulatus 仅分布于亚洲东部晚白垩世(图4),是我 国松辽盆地晚白垩世 Campanian 期嫩江组的特征分 子,另外还见于湖北枣阳上白垩统.本组合与松辽 盆地嫩江组孢粉化石组合(田梦等,2005)十分相 似,可以对比,共同点为:①被子植物花粉类型较 多,主要分子有:美丽粉 Beaupreaidites,拟千屈菜粉 Lythraites, 高腾粉 Gothanipollis, 三沟粉 Tricolpopollenites, 三孔沟粉 Tricolporopollenites 等,其中拟 千屈菜粉 Lythraites 和高腾粉 Gothanipollis 的出现 为组合的重要特征;②裸子植物花粉以掌鳞杉科之 克拉梭粉 Classopollis 含量最高,其他常见的还有松 科、杉科、柏科、罗汉松科等的一些分子;③蕨类植 物孢子以莎草蕨科之希指蕨孢 Schizaeoisporites 最 为丰富.可见,两组合应属同一地质时期的沉积.

藻类化石可称为嫩江繁棒藻 Cleistosphaeridiumnenjiangense—光面球藻 Leiosphaeridia 组合,其 中前者特征明显,容易鉴定(图4),现有资料表明, 它目前仅出现于松辽盆地上白垩统嫩江组一、二 段,暂未在其他地层中发现过,属于地方性分子.本

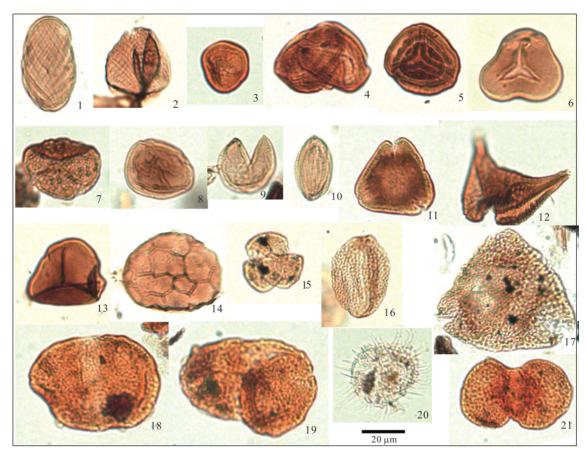


图 4 目的层代表性孢粉一 藻类化石

Fig.4 Representative palynological fossils and algal fossils of target horizon

1. 希指蕨孢 Schizaeoisporites; 2. 无突肋纹孢 Cicatricosisporites; 3. 最小克拉梭粉 ClassopollisminimusHerngreen; 4. 克拉梭克拉梭粉 Classopollisclassoides; 5. 三角多环孢 Polycingulatisporites triangularis; 6. 小桫椤孢 Cyathidites; 7. 三花粉 Nevesisporites; 8. 隐孔粉 Exesipollenites; 9. 破隙杉粉 Taxodiaceaepollenites hiatus; 10. 麻黄粉 Ephedripites; 11. 美丽粉 Beaupreaidites; 12. 拟千屈菜粉 Lythraites; 13. 三角孢 Deltoidospora; 14. 三孔孢 Triporoletes; 15. 三孔沟粉 Tricolpopollenites; 16. 网面三沟粉 Retitricolpites; 17. 优美美丽粉 Beaupreaiditeselegansiformis; 18. 单束松粉 Abietineaepollenites; 19. 双束松粉 Pinuspollenites; 20. 嫩江繁棒藻 Cleistosphaeridiumnenjiangense; 21. 罗汉松粉 Podocarpidites

组合主要特征与松辽盆地嫩江组一、二段嫩江繁棒 藻 Cleistosphaeridiumnenjiangense- 小型拟沟裸藻 Dinogymniopsis minor组合(高瑞祺和孔庆云,1992) 相似,可以对比.

综合上述孢粉和藻类化石层位意见,将地质时 代定为晚白垩世 Santonian 晚期—Campanian 早期, 层位相当于嫩江组一、二段,即红杂色含矿目标层 的上覆层位.

2.3 其他特征

2.3.1 重矿物组合特征 由于不同时期下的物源 虽有一定的继承性,但也可能存在一定的改变,这 在重矿物组合特征上往往会有所体现(蔡煜琦和李 胜祥,2008). 因此重矿物组合特征上的差异对于该 区域内的层位划分具有一定的借鉴意义,尤其体现

在用岩性、测井等常规分析手段,标志层较难识别, 层位不易区分的钻孔中.通过对钱家店及外围地区 典型钻孔165个重矿物样品的系统分析,发现同一 钻孔不同层段的重矿物组合均表现出一定的规律, 统计作图得出姚家组的重矿物组合主要为:锆石+ 石榴子石+白钛矿+锐钛矿+钛铁矿;青山口组的 重矿物组合为:钛铁矿+石榴子石+重晶石+锆 石;泉头组的重矿物组合为:锆石+钛铁矿+磷灰 石十石榴子石(图2).这与基于岩性、测井和孢粉数 据的层位划分有很好的契合,从这个角度来说进一 步肯定了从其他分析手段进行的层位划分与对比. 2.3.2 事件沉积构造现象 在研究区大林、双宝矿 区的S33、S49、S17、兴109、兴101、兴99、兴105、兴

117等钻孔中均发现一些软沉积物变形构造,经研

究分析认为是震积岩的特征,研究区钻孔中发现的 震积岩构造主要为液化混杂堆积、角砾状构造、微 同沉积断裂、液化卷曲变形构造、砂球枕构造等(图 5),其中钻孔S33中的微同沉积断裂是被大多数震 积岩研究者认可的地震活动的一个典型标志,呈单 独发育的张性断裂(图 5a). 兴 99、兴 105 等钻孔中见 到的液化卷曲变形构造大小不一,形态各异(图 5b, 5c).S49、S33等钻孔中观察到的拖曳拉长的枕状沉 积构造为震积砂枕构造,砂块的大小从几毫米到几 厘米不等,由于粒度细、饱含水,在震动下沉过程中 发生塑性变形呈现出不规则的球状、枕状、拖曳拉 长状等,构成枕状层(图 5d,5e).兴105钻孔中发育 的角砾混杂堆积现象是固结及未固结岩层被震裂 而形成的初始断裂角砾状构造(图 5f),角砾棱角分 明,顺层分布,位移不大,大小相差也不大,相邻角 砾可完全拼接到一起,研究区大林、双宝地区的震 积岩以灰色细砂岩、粉砂岩与粉砂质泥岩为主,埋 深较大,多为580~750 m,是一种明显区别于姚家

组河流相的水下沉积特征,综合分析认为是青山口 组下部一泉头组的辫状河三角洲前缘沉积.该时期 震积岩的发育表明研究区有构造活动,表示松辽盆 地南部坳陷期并非仅仅是热沉降,也有断裂的强烈 活动.本次对研究区震积岩的识别属于首次发现, 该发现对该区域地层划分与对比也提供了一个新 思路.

2.3.3 特殊矿物 在研究区双宝地区钻孔样品中发现一种似海绿石矿物,经过电子探针及 X 衍射进一步鉴定,确定为绿鳞石矿物.主要呈不规则粒状、蜡状光泽,不透明,颗粒的边缘为次棱角或椭球状团粒状,表面新鲜,无氧化膜,颜色呈深绿色、蓝绿色、浅绿色,部分颗粒色调不一,个别浅绿色颗粒能见到云母向绿鳞石过渡的假象,光性及颗粒特征与海绿石相近,成分也相近(表3).通过进一步查阅前人资料得知,早在1987年松辽盆地南部泉头组砂岩中就发现了绿鳞石矿物,分布比较广泛,但含量较低,且在湖盆三角洲前缘相带内比较富集,其含量

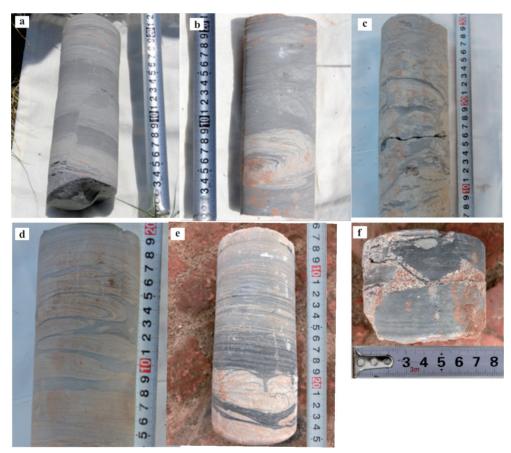


图 5 典型事件沉积构造现象

Fig.5 Typical structure of event sedimentology

a. 微同沉积断裂,灰色含粉砂泥岩,s33;b. 包卷层理,灰色泥质粉砂岩,s33;c. 液化构造,灰色泥质粉砂岩,兴99;d. 球枕构造,灰色泥质粉砂岩,兴99;e. 火焰构造,灰色粉砂岩,兴105;f. 角砾混杂堆积,灰色粉砂岩,兴105

多少受沉积环境的严格控制(黄善炳,1987).湖盆中央绿鳞石含量普遍较高,由中央向边部过渡,绿鳞石随之减少.从沉积相来看,高绿鳞石含量的地区都处于砂体入湖的三角洲前缘相带内,而且绿鳞石与所在砂岩中的碎屑颗粒粒径相同并与黄铁矿、方解石、菱铁矿、赤铁矿相伴生.绿鳞石含量高,往往黄铁矿和含铁的碳酸盐矿物含量也高,但其与赤铁矿的含量是一种逆相关系.本次研究在双宝地区发现的绿鳞石矿物进一步佐证了该地区泉头组的发育和本次层位划分的科学性.

3 各矿区含矿段层位厘定

基于以上层位划分依据,挑选铀矿带内不同矿 区典型钻孔进行单井划分和连井对比,初步厘定和 总结了不同矿区(海力锦、钱家店、宝龙山、大林和 双宝)的含矿层位和矿化特点(图6).

海力锦矿区的含矿深度普遍位于 565~585 m 范围内,厚约 15~20 m,层位归属姚家组下段,含矿段岩性粒度较细,以灰白色细砂岩为主,夹灰色、灰绿色中一细砂岩,岩石较疏松,见长石高岭土化,局部见大量炭屑和薄层灰色泥砾岩,岩心观察多见砂纹层理、波状层理.工业铀矿化受上、下氧化带控制,夹于上下氧化带之间的灰色层中,主要呈板状分布,矿体形态较稳定、单一.上氧化带主要为砖红色细砂岩和薄层粉砂岩互层,厚约8 m,下氧化带以浅砖红色细砂岩为主,夹薄层浅黄色细砂岩,厚约6 m.上下泥岩隔水层稳定,具备良好的泥一砂一泥结构.

钱家店和宝龙山矿区的含矿深度较浅,层位归属以姚家组下段为主,钱Ⅲ块矿区的含矿深度普遍在280~300 m左右;钱Ⅲ块矿区的含矿深度一般为360~410 m;钱Ⅳ块和钱Ⅴ块矿区具有多层氧化及多层铀矿化多层位的特点,含矿深度一般为240~270 m和310~350 m,上套矿体归属姚家组下段,下套矿体归属青山口组;宝龙山矿区从空间区域上来说紧挨钱Ⅴ块矿区,由于不同勘探单位的勘探工作

取名有所不同(石油系统命名为钱 V 块,核系统命名为宝龙山),但宝龙山矿区受架玛吐隆起影响,地层遭受剥蚀,含矿层位归属姚家组下段,深度一般为250~310m,且在矿区范围内呈现越往北见矿深度越浅的规律,下部层位发育青山口组薄层的风化壳角砾岩.铀工业矿化受上、下氧化带控制,多呈板状、透镜状分布,含矿岩性主要为灰色中一细砂岩夹砂质砾岩,岩石较疏松,渗透性好,工业铀矿化与F1断裂和白兴吐构造天窗泄水作用关系密切.

大林矿区的含矿深度较大,层位归属青山口组,且存在上、下两套含矿层,上套含矿层深度一般为500~530 m,下套含矿层主要为570~600 m,区域内稳定,连续性较好,且存在自北向南含矿深度逐渐增大的趋势.上、下氧化带红砂厚约20 m,矿体形态较为复杂,多呈板状和透镜状.含矿岩性粒度较粗,以灰、灰白色中一粗砂岩为主,夹薄层砂质砾岩,钙质胶结,胶结程度较高,岩石较致密.双宝矿床的含矿层通常也存在两套,但是上套含矿层区域上并不稳定,连续性较差,下套含矿深度一般为720~750 m,层位归属为泉头组.含矿岩性以灰、灰白色中砂岩为主,夹薄层灰色粗砂岩、泥砾岩,含矿层下部为黄色、黄色砾岩.

综上可知,研究区内各典型矿床的含矿层不仅 局限于传统认为的姚家组下段,其中海力锦、钱家 店和宝龙山地区的含矿层主要归属姚家组下段,大 林矿区含矿层为青山口组,双宝矿区含矿层为泉头 组.同时发现各矿床成矿并不完全受层位控矿影 响,赋矿层位姚家组在成矿区属于限定性古地貌沉 积,具有较强的汇流沉积作用特征,故推测姚家组 成矿主要是受控于成矿期的沉积古地貌.

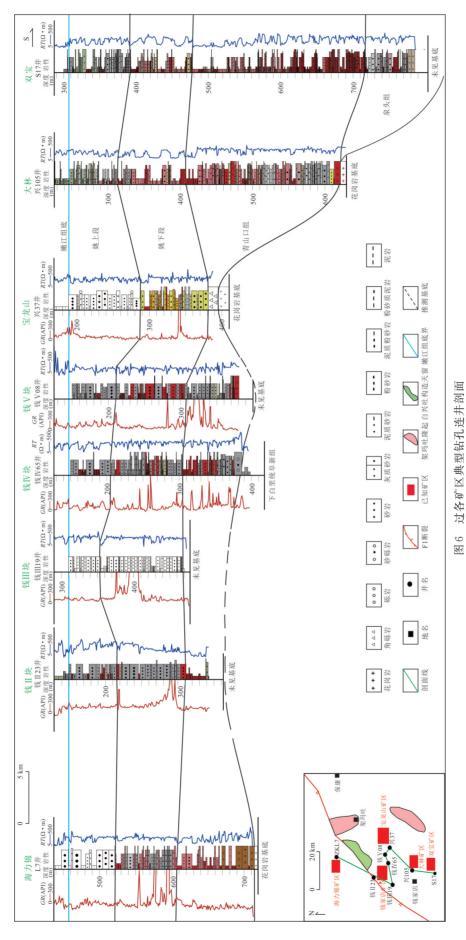
4 讨论

砂岩型铀矿床的形成虽受多重因素影响,但含矿目标层位的精确厘定是开展各项工作的基础.如果不能准确厘定出主攻层位,勘查工作势必产生较大的盲目性,进而也制约着成矿理论和铀矿找矿的

表 3 典型样品绿鳞石化学元素组成定量分析表(%)

Table 3 Mineral component of green phosphorite in typical samples (%)

样品号	Na ₂ O	SiO ₂	FeO	CaO	MgO	Al_2O_3	TiO ₂	K ₂ O	MnO	P_2O_5	总量
S17-3	0.08	54.44	16.72	/	6.41	4.41	/	9.71	/	/	91.77
S49-6	/	53.57	17.01	/	3.74	6.43	0.05	10.08	0.04	0.04	90.96
S33-2	0.08	54.88	14.80	/	6.71	5.12	0.09	9.85	0.05		91.58



进一步突破(秦明宽等,1999).

前已述及,研究区含矿地层为上白垩统嫩江组 以下的一套河流相红杂色层(泉头组一姚家组),由 于标志层不明显,层组难以直接划分与对比,目前 砂岩型铀矿找矿和研究工作将这套地层统归于姚 家组,大部分基础图件也是基于此来编制的,这样 一来将很难真正认识到沉积地层的展布规律,势必 也会对找矿方向和成矿规律的研究带来较大影响. 本文通过多方法手段证明了该套地层可以识别并 划分出泉头组、青山口组和姚家组,以此重新开展 研究区地层对比、基础图件编制和研究,这将对松 辽盆地南部找矿认识具有重要理论和实际意义: (1)从层位上扩大找矿空间;(2)研究区找矿的识别 标志是以寻找红杂色层中具一定规模的灰色砂体 为主,但目前灰色砂体成因尚不清楚、分布难以预 测,层位上的重新划分,将更有可能揭示其分布规 律,对找矿预测十分重要;(3)研究区具有"典型板 状矿体"成因特征,前人就此做了大量研究,但目前 仍没有统一的结论,这些研究均是基于含矿层归属 于姚家组这一认识来开展的,如果含矿层是跨层位 的,那么以上的认识就可能存在偏差.因此,若在新 层位体系下开展矿体形态和成矿规律的研究,将有 助于揭示板状铀矿体的真正成因.

5 结论

- (1)分析认为含矿目标层位整体表现为红杂色碎屑沉积,岩性组合及测井在单个矿区内较好识别划分.其中泉头组岩性主要为紫红色砂质砾岩与褐红色泥岩互层,测井曲线为指型,齿化强烈.青山口组中下部砂多泥少,测井曲线较平直.姚家组下部岩性在区域上变化较大(除钱家店地区以外,与青山口组中下部岩性相似),上部岩性呈现"灰砂红泥"的二元结构,测井曲线为箱型.
- (2)通过系统地孢粉取样分析,认为含矿目标层自下而上孢粉化石分带明显:泉头组以Schizaeoisporites-Nevesisporites-Abietineaepollenites-Pinuspollenites组合带(希指蕨孢—三花孢—单束松粉—双束松粉)为主,以蕨类植物孢子占绝对优势;青山口组以Nevesisporites-Cyathidites-Pinuspollenites组合带(三花孢—桫椤孢—双束松粉)为主,以蕨类植物孢子和裸子植物花粉为主,其中蕨类植物孢子略占优势,基本没有被子植物花粉;姚家组以Gramineae-Chenopodiaceae-

- Pinus组合带(禾本科-藜科-松属)为主,被子植物花粉最多,其次为裸子植物花粉,蕨类植物孢子少见.
- (3)通过各层组重矿物组合特征、在研究区大林、双宝矿区发现的事件沉积构造现象以及双宝地区特殊的指向性矿物一绿磷石,均进一步佐证了本次含矿层重新划分的科学性与准确性.

致谢:感谢核工业二四三大队的宁君、王海涛、 王常东三位队长、张韶华、佟术敏、李继木、张亮亮、 黄笑等项目负责人以及核工业二四○研究所的蔡 建芳总工程师为论文撰写提供的基础资料以及对 野外岩心编录工作的大力支持和帮助,感谢审稿专 家对本文提出的宝贵性意见!

References

- Bonnetti, C., Liu, X., Zhao, B. Y, 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. *Ore Geology Reviews*, 82: 108—129. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.11.013
- Bullock, L. A., Parnell, J., 2017. Selenium and Molybdenum Enrichment in Uranium Roll-Front Deposits of Wyoming and Colorado, USA. *Journal of Geochemical Exploration*, 180: 101—112. https://doi.org/10.1016/j. gexplo.2017.06.013
- Cai, J.F., Yan, Z.B., Zhang, L.L., et al., 2018. Relationship between Grey Sandstone and Uranium Mineralization in Yaojia Formation of Upper Cretaceous in Tongliao, Inner Mongolia. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 41(4): 328-335(in Chinese with English abstract).
- Cai, Y. Q., Li, S.X., 2008. Sedimentary Environment Analysis of Yaojia Formation: The Ore–Hosting Stratum of Qianjiadian Uranium Deposit. *Uranium Geology*, 24(2): 66–72(in Chinese with English abstract).
- Chen, X.L., Xiang, W.D., Li, T.G., et al., 2006. Distribution Characteristics of Interlayer Oxidation Zone and Its Relationship with Sedimentary Facies and Uranium Mineralization in QJD Uranium Deposit, Songliao Basin, NE China. World Nuclear Geoscience, 23(3): 137—144

- (in Chinese with English abstract).
- Dai, S., Yang, J., Ward, C. R., et al., 2015. Geochemical and Mineralogical Evidence for a Coal-Hosted Uranium Deposit in the Yili Basin, Xinjiang, Northwestern China. *Ore Geology Reviews*, 70: 1—30. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.03.010
- Feng, Q., Z., Yildirim, D., Han, L., C., et al., 2017.
 Structural Architecture and Stratigraphic Record of Late
 Mesozoic Sedimentary Basins in NE China: Tectonic Archives of the Late Cretaceous Continental Margin Evolution in East Asia. *Earth-Science Reviews*, 171: 598–620. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.05.015
- Feng, Z. B., Nie, F. J., Jiang, L., et al., 2023. Roles of Multisourced Fluids in the Formation of Sandstone– Hosted Uranium Deposits in the SW Songliao Basin, NE China. *Journal of Earth Science*, 34(1): 54-69. https://doi.org/10.1007/s12583-022-1705-2
- Gao, R.Q., 1988. Petroleum Geological Significance of Palynological Fossils in Cretaceous, Songliao Basin. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 7(1): 7—18(in Chinese with English abstract).
- Gao, R. Q., Kong, Q.Y., 1992. Ditchflagellate and Its Biomarkers from Cretaceous Non-Marine Source Rocks in Songliao Basin. *Natural Gas Geoscience*, 3(6): 9-17(in Chinese with English abstract).
- Gao, R. Q., Zhao, C.B., Zheng, Y.L., et al., 1994. Palynological Study of Deepbeds (Lower Cretaceous) in Songliao Basin, China. *Acta Palaeontologica Sinica*, (6): 659-675, 785-787(in Chinese with English abstract)
- Hall, S. M., Mihalasky, M. J., Tureck, K. R., et al., 2017.
 Genetic and Grade and Tonnage Models for Sandstone–
 Hosted Roll–Type Uranium Deposits, Texas Coastal
 Plain, USA. Ore Geology Reviews, 80: 716–753.
 https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.06.013
- Huang, S.B., 1987. The Celadonite in the Sandstones, South Songliao Basin. *Minerals and Rocks*, 7(2): 16-21(in Chinese with English abstract).
- Jia, L.C., Cai, J.F., Huang, X., et al., 2018. Petrological Characteristics and Diagenesis of Sandstone of the Lower Yaojia Formation in Baolongshan Uranium Deposit, South of Songliao Basin. *Uranium Geology*, 34(5): 264-273(in Chinese with English abstract).
- Jiang, W.J., Qin, M.K., Fan, H.H., et al., 2023. Paleoclimate Evolution and Uranium Mineralization during the Deposition of Uranium-Bearing Rocks in the Southwest of Songliao Basin. *Earth Science*, 48(3): 1232—1245(in Chinese with English abstract).

- Jiao, Y. Q., Wu, L. Q., Rong, H., 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. *Earth Science*, 43(2): 459—474(in Chinese with English abstract).
- Jin, R. S., Liu, H. J., Li, X. G., 2022. Theoretical System of Sandstone-Type Uranium Deposits in Northern China. *Journal of Earth Science*, 33(2): 257—277. https://doi.org/10.1007/s12583-021-1449-4
- Jin, S., Li, Y.J., Qian, C., et al., 2022. Geochronology and Geochemistry of Two Types of Basic Rocks in Horqin Right Middle Banner, Inner Mongolia and Their Tectonic Significances. *Earth Science*, 47(1): 342—356(in Chinese with English abstract).
- Jing, X., 2011. Late-Cretaceous Spores and Pollen Assemblages and Palaeoclimte Record in Eastern of Songliao Basin (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Li, L. Q., 2014. Petrological Characteristic and Mineralization Analysis of Red Muddy Gravelled Sandstone in Qianjiadian Uranium Deposit. *Uranium Geology*, 30(5): 271-275(in Chinese with English abstract).
- Nie, F. J., Li, M. G., Deng, J. Z., et al., 2015. Multiple Type Uranium Deposit Assemblage and Uranium Exploration in Erlian Rift Basin, Inner Mongolia. *Mineral Deposits*, 34(4): 711-729(in Chinese with English abstract).
- Qin, M. K., Zhao, R. Q., Wang, Z.B., 1999. Recognition Model for In Situ Leachable Sandstone Type Uranium Deposit. *Uranium Geology*, 15(3): 129-136(in Chinese with English abstract).
- Rong, H., Jiao, Y. Q., Liu, W. H., et al., 2021. Influence Mechanism of Palaeoclimate of Uranium-Bearing Strata on Mineralization: A Case Study from the Qianjiadian Sandstone-Hosted Uranium Deposit, Songliao Basin, China. Ore Geology Reviews, 138: 104336. https://doi. org/10.1016/j.oregeorev.2021.104336
- Rong, H., Jiao, Y.Q., Wu, L.Q., et al., 2016. Epigenetic Alteration and Its Constraints on Uranium Mineralization from the Qianjiadian Uranium Deposit, Southern Songliao Basin. *Earth Science*, 41(1): 153—166(in Chinese with English abstract).
- Rong, H., Jiao, Y. Q., Wu, L. Q., et al., 2019. Origin of the Carbonaceous Debris and Its Implication for Mineralization within the Qianjiadian Uranium Deposit, Southern Songliao Basin. *Ore Geology Reviews*, 107: 336— 352. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.036

- Tian, M., Zhang, M.S., Ren, Y.G., et al., 2005. On the Sporopollen-Alga Assemblages and Environments from the Third Member of Nenjiang Formation in the Xinzhan Area of Songliao Basin. *Journal of Jilin University* (*Earth Science Edition*), 35(4): 449—455(in Chinese with English abstract).
- Tong, S. M., Ning, J., Liu, D. L., et al., 2019. Distribution of Uranium, Iron and Carbon of Yaojia Formation in Tongliao-Tongyu Area of Southern Songliao Basin and Its Prospecting Significance. *Uranium Geology*, 35 (5): 282—291(in Chinese with English abstract).
- Tulsidas, H., Fairclough, M., 2018. Geological Classification of Uranium Deposits and Description of Selected Examples. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Wang, Y., Rong, H, Jiao, Y. Q., et al., 2021. Effects of Basic Intrusions on Shale Mineralogy: A Case Study from Nenjiang Formation in Songliao Basin. *Earth Science*, 46(6): 2188-2203(in Chinese with English abstract).
- Wen, G. Q., Shi, D. J., Zhang, J., et al., 2017. Study on the Sporopollen Assemblage from the Late Cretaceous Yaojia Formation in the Qianjiadian Sag, Inner Mongolia, North China. Acta Micropalaeontologica Sinica, 34(1): 84-93(in Chinese with English abstract).
- Wu, B. W., 2007. Discovery of Three Cretaceous Biotas in the Kailu Basin of Inner Mongolia and Their Geological Significance. *Journal of Stratigraphy*, (3): 280—287(in Chinese with English abstract).
- Xi, D.P., Li, G., Wan, X.Q., et al., 2009. Yaojia–Lower Nenjiang Formations and Lake Evolution of Southeastern Songliao Basin, NE China. *Acta Palaeontologica Si*nica, 48(3): 556–568(in Chinese with English abstract).
- Xia, F.Y., Jiao, Y. Q., Rong, H., et al., 2019.Geochemical Characteristics and Geological Implications of Sandstones from the Yaojia Formation in Qianjiadian Uranium Deposit, Southern Songliao Basin. *Earth Science*, 44 (12): 4235—4251(in Chinese with English abstract).
- Xu, Z., Li, J., Zhu, Q., et al., 2019. Late Cretaceous Paleoclimate Change and Its Impact on Uranium Mineralization in the Kailu Depression, Southwest Songliao Basin. Ore Geology Reviews, 104: 403—421. https://doi.org/ 10.1016/j.oregeorev.2018.10.020
- Xu, Z. L., Wei, J.L., Zeng, H., et al., 2017. Late Cretaceous Palynological Assemblage and Its Palaeoclimate Record from Yaojia Formation in Qianjiadian Depression, Kailu Basin. *Earth Science*, 42(10):1725—1735(in Chinese with English abstract).
- Yan, J.J., Xi, D.P., Yu, T., et al., 2007. Biostratigraphy and Paleoenvironmental Change of the Lower Nenjiang

- Formation in the Qingshankou Area, Songliao Basin. *Journal of Stratigraphy*, 31(3): 296—302(in Chinese with English abstract).
- Yan, X.L., 2018. Characteristics of Upper Cretaceous Diabase and Uranium Mineralization in Qianjiadian Area of Songliao Basin. *Journal of Northeast Petroleum University*, 42(1): 40—48, 123—124(in Chinese with English abstract).
- Ye, D.Q., Xu, J.H., 1994. Biostratigraphic Characteristics of Cretaceous Ostracods in Songliao Basin. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 11(4): 429-438(in Chinese with English abstract).
- Yu, J. X., Guo, Z.Y., Mao, S.Z., 1983. Cretaceous Palynological Assemblages from the District South of the Songhua River. Papers on Stratigraphic Paleontology (in Chinese).
- Yu, W.B., 2009. Study on Metallogenic Conditions of Cretaceous Sandstone-Type Uranium Deposits in Southern Songliao Basin (Dissertation). Jilin University, Changehun(in Chinese with English abstract).
- Zhang, J.D., 2016. Innovation and Development of Metallogenic Theory for Sandstone Type Uranium Deposit in China. *Uranium Geology*, 32(6): 321—332(in Chinese with English abstract).
- Zhang, J.D., Li, Z. Y., Xu, G. Z., 2015. Major Progress and Breakthroughs of Uranium Exploration in China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhang, J.D., Xu, G.Z., Lin, J.R., et al., 2010. The Implication of Six Kinds of New Sandstone-Type Uranium Deposits to Uranium Resources Potential in North China. *Geology in China*, 37(5): 1434—1449(in Chinese with English abstract).
- Zhao, L., Cai, C., Jin, R., et al., 2018. Mineralogical and Geochemical Evidence for Biogenic and Petroleum–Related Uranium Mineralization in the Qianjiadian Deposit, NE China. *Ore Geology Reviews*, 101: 273—292. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.07.025
- Zhu, Q., Jiao, Y. Q., Wu, L. Q., et al., 2015. Petrology and Diagenesis of the Uranium Reservoir in the Yaojia Formation of Songliao Basin, Qianjiadian Area. *China Science Paper*, 10(15): 1802—1808(in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 蔡建芳, 严兆彬, 张亮亮, 等, 2018. 内蒙古通辽地区上白垩统姚家组灰色砂体成因及其与铀成矿关系. 东华理工大学学报(自然科学版), 41(4):328-335.
- 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, 铀矿地质, 24(2): 66-72.
- 陈晓林,向伟东,李田港,等,2006. 松辽盆地QJD 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. 世界核地质科学,23(3):137-144.
- 高瑞祺,1988. 松辽盆地白垩纪孢粉化石的石油地质意义. 大庆石油地质与开发,7(1):7-18.
- 高瑞祺, 孔庆云, 1992. 松辽盆地白垩纪非海相烃源岩的沟 鞭藻及其生物标志化合物. 天然气地球科学, 3(6): 9-17.
- 高瑞祺,赵传本,郑玉龙,等,1994.松辽盆地深层早白垩世孢 粉组合研究,古生物学报,(6):659-675+785-787.
- 黄善炳,1987. 松辽盆地南部砂岩中的绿磷石. 矿物岩石,7(2):16-21.
- 贾立城,蔡建芳,黄笑,等,2018. 宝龙山铀矿床姚家组下段 砂岩岩石学特征与成岩作用. 铀矿地质,34(5): 264-273.
- 江文剑,秦明宽,范洪海,等,2023. 松辽盆地西南部含铀岩 系沉积时的古气候演变及其与铀成矿关系. 地球科学,48(3): 1232-1245.
- 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. 地球科学,43(2):459-474.
- 金松,李英杰,钱程,等,2022.内蒙古科右中旗两类基性岩的年代学、地球化学及其构造意义.地球科学,47(1):342-356.
- 荆夏,2011. 松辽盆地东部晚白垩世孢粉化石组合及其古气候记录(硕士学位论文). 北京:中国地质大学.
- 李林强,2014. 钱家店铀矿床红色泥砾砂岩岩石学特征及矿化成因分析. 铀矿地质,30(5):271-275.
- 聂逢君,李满根,邓居智,等,2015. 内蒙古二连裂谷盆地 "同盆多类型"铀矿床组合与找矿方向. 矿床地质,34 (4):711-729.
- 秦明宽,赵瑞全,王正邦,1999.可地浸砂岩型铀矿盲矿识别模式.铀矿地质,15(3):129-136.
- 荣辉, 焦养泉, 吴立群, 等, 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. 地球科学, 41 (1): 153-166.
- 田梦, 张梅生, 任延广, 等, 2005. 松辽盆地新站地区嫩江组 三段孢粉-藻类组合及其环境. 吉林大学学报(地球科 学版), 35(4):449-455.
- 佟术敏, 宁君, 柳东良, 等, 2019. 松辽盆地南部通辽一通榆

- 地区姚家组铀、铁和有机碳分布及指示意义. 铀矿地质, 35(5): 282-291.
- 王岩,荣辉,焦养泉,等,2021.基性岩侵入对页岩矿物学特征的影响:以松辽盆地嫩江组为例,地球科学,46(6):2188-2203.
- 温国强, 石敦久, 张静, 等, 2017. 内蒙古钱家店凹陷晚白垩世姚家组的孢粉组合研究. 微体古生物学报, 34(1): 84-93.
- 吴炳伟,2007.内蒙古开鲁盆地白垩纪三大生物群的发现及 其地质意义,地层学杂志,(3):280-287.
- 席党鹏,李罡,万晓樵,等,2009. 松辽盆地东南区姚家组一 嫩江组一段地层特征与湖泊演变. 古生物学报,48(3):556-568.
- 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,地球科学,44 (12): 4235—4251.
- 徐增连,魏佳林,曾辉,等,2017.曹民强.开鲁盆地东北部钱家店凹陷晚白垩世姚家组孢粉组合及其古气候意义. 地球科学,42(10):1725-1735.
- 闫晶晶, 席党鹏, 于涛, 等, 2007. 松辽盆地青山口地区嫩江 组下部生物地层及环境变化. 地层学杂志, 31(3): 296-302.
- 颜新林,2018. 松辽盆地钱家店地区上白垩统辉绿岩特征及 铀 成 矿 作 用. 东 北 石 油 大 学 岁 报,42(1):40-48,123-124.
- 叶得泉,徐静慧,1994. 松辽盆地白垩纪介形类生物地层学特征. 微体古生物学报,11(4):429-438.
- 余静贤,郭正英,茅绍智,1983. 松花江南部白垩纪孢粉组合. 地层古生物论文集,(00):1-117.
- 于文斌,2009. 松辽盆地南部白垩系砂岩型铀矿成矿条件研究(博士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 张金带, 2016. 我国砂岩型铀矿成矿理论的创新和发展. 铀 矿地质, 32(6): 321-332.
- 张金带,李子颖,徐高中,2015. 我国铀矿勘查的重大进展和 突破.北京:地质出版社.
- 张金带,徐高中,林锦荣,等,2010.中国北方6种新的砂岩型铀矿对铀资源潜力的提示.中国地质,37(5):1434-1449
- 朱强, 焦养泉, 吴立群, 等, 2015. 松辽盆地钱家店地区姚家组铀储层岩石学特征及成岩作用. 中国科技论文, 10 (15): 1802-1808.