

doi: 10.12029/gc20210418

邢作昌, 秦明宽, 李研, 郭强, 张杨, 贾立城, 肖菁. 2021. 松辽盆地东北缘晚白垩世地层结构、沉积充填及铀矿找矿方向[J]. 中国地质, 48(4): 1225–1238.

Xing Zuochang, Qin Mingkuan, Li Yan, Guo Qiang, Zhang Yang, Jia Licheng, Xiao Jing. 2021. Stratigraphic architecture, sedimentary filling and uranium prospecting of Upper Cretaceous strata, northeastern Songliao Basin[J]. *Geology in China*, 48(4): 1225–1238(in Chinese with English abstract).

松辽盆地东北缘晚白垩世地层结构、 沉积充填及铀矿找矿方向

邢作昌^{1,2}, 秦明宽^{1,2}, 李研³, 郭强^{1,2}, 张杨³, 贾立城^{1,2}, 肖菁¹

(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. 核工业二四〇研究所, 辽宁 沈阳 110032)

摘要: 松辽盆地北部铀矿地质研究相对薄弱。本文利用岩心、测井资料, 综合运用沉积学、盆地分析、砂岩型铀矿成矿理论, 对松辽盆地东北隆起区内的沉积建造特征进行了系统梳理: (1) 理清了松辽盆地东北隆起区盆缘的地层结构及含铀含氧水渗入窗口的时空分布特征, 绥棱以北嫩江组以下地层整体为超覆结构, 仅海伦隆起泉头组在盆缘具有削蚀结构从而具备渗入窗口; 而绥棱以南的晚白垩世地层整体在盆缘都呈削蚀结构, 均具备窗口。(2) 研究区可识别出冲积扇、扇三角洲、曲流河、辫状河、三角洲、滩坝及半深湖—深湖相这 7 种沉积相类型; 在海伦隆起、绥棱背斜、庆安隆起等不同构造单元具有不同的沉积充填样式。(3) 探讨了松辽盆地东北隆起区砂岩型铀矿的主攻层位、找矿类型及找矿方向: 庆安地区泉头组冲积扇中辫状河河道砂体是最有利的勘探对象, 其次是铁力地区姚家组的扇三角洲砂体和海伦地区泉头组的辫状河河道砂体, 最后是绥棱地区嫩一段的三角洲前缘砂体。该研究可为松辽盆地东北隆起区铀矿勘查突破提供新的找矿思路。

关键词: 地层结构; 沉积充填; 找矿方向; 砂岩型铀矿; 地质调查工程; 东北隆起区; 松辽盆地
中图分类号: P619.14 文献标志码: A 文献编号: 1000-3657(2021)04-1225-14

Stratigraphic architecture, sedimentary filling and uranium prospecting of Upper Cretaceous strata, northeastern Songliao Basin

XING Zuochang^{1,2}, QIN Mingkuan^{1,2}, LI Yan³, GUO Qiang^{1,2},
ZHANG Yang³, JIA Licheng^{1,2}, XIAO Jing¹

(1. *Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China*; 2. *Key Laboratory of Uranium Resources Prospection and Evaluation Technology, CNNC, Beijing 100029, China*; 3. *Research Institute No.240, CNNC, Shenyang 110032, Liaoning, China*)

Abstract: The research on uranium geology in the northern Songliao Basin is relatively weak. Based on the sedimentology, basin

收稿日期: 2020-06-07; 改回日期: 2020-08-15

基金项目: 国防科工局松辽盆地核能开发项目(2017-1403)、核工业北京地质研究院院长青年科技创新基金(地 QJ2003)和重点铀成矿区带资源潜力动态评价(2019-44-05)联合资助。

作者简介: 邢作昌, 男, 1988 年生, 博士, 工程师, 从事沉积地质及砂岩型铀矿的研究工作; E-mail: xzcxing@163.com。

通讯作者: 郭强, 男, 1982 年生, 博士后, 从事砂岩型铀矿的研究工作; E-mail: guoqiang9818@126.com。

analysis and sandstone-type metallogenic theories, the characteristics of sedimentary formation in the Northeast Uplift Zone (NUZ), Songliao Basin, is systematically researched by means of core and well logging. Firstly, the stratigraphic architecture of NUZ and the temporal-spatial distribution of infiltration window for oxygen water with dissolved uranium are clarified. The strata below Nenjiang Formation on the north of Suiling City are overlap structure. Only the Quantou Formation in Hailun Uplift has a truncated-structure at the basin margin, so it has an infiltration window. In contrast, the late Cretaceous strata on the south of Suiling City are all truncated-structure, so all late Cretaceous strata have infiltration windows. Secondly, seven sedimentary facies, including alluvial fan, fan delta, meandering river, braided river, delta, beach bar and semi-deep to deep lake facies, can be recognized. There are different sedimentary filling patterns among Hailun Uplift, Suiling Anticline and Qing'an Uplift. Thirdly, the main exploration formation, prospecting type and prospecting direction of sandstone-hosted uranium deposits in NUZ, Songliao basin, are discussed as follows. The braided channel sand body in the alluvial fan of Quantou Formation in Qing'an area is the most favorable exploration object, followed by the fan delta sand body of Yaojia Formation in Tieli area and the braided channel sand body of Quantou Formation in Hailun area, and finally the delta front sand body of the first Member of Nenjing Formation in Suiling area. This study can provide a new idea for the progress of uranium exploration in NUZ.

Key words: stratigraphic architecture; sedimentary filling; uranium prospecting direction; sandstone type uranium deposits; geological survey engineering; Northeastern Uplift Zone; Songliao Basin

About the first author: XING Zuochang, male, born in 1988, doctor, engineer, engaged in sedimentology and sandstone-type Uranium deposits; E-mail: xzcxing@163.com.

About the corresponding author: GUO Qiang, male, born in 1982, doctor, senior engineer, engaged in sandstone-type Uranium deposits; E-mail: guoqiang9818@126.com.

Fund support: Supported by Nuclear Energy Development Project in Songliao Basin (No.2017-1403), Dean Youth Science and Technology Innovation Fund of BRIUG (No.QJ2003) and Dynamic Evaluation of Resource Potential of Key Uranium Metallogenic Zones (No.2019-44-05).

1 引 言

松辽盆地作为中国重要的产铀盆地之一,目前铀矿的找矿突破集中于盆地西南隆起区的开鲁凹陷内(张金带等, 2010),已发现钱家店、宝龙山、大营等一批大中型铀矿床(蔡煜琦等, 2008; 张金带等, 2010; Zhao et al., 2018; 蔡建芳等, 2018; 焦养泉等, 2018),但盆地中北部的找矿工作仍在爬坡。盆地北部具有渗入型自流水特征(楼章华等, 2001),且在四方台组具有工业孔发现(汤超等, 2018; 孙大鹏等, 2021),泉头组、姚家组、嫩江组等多个层位发现铀异常(罗梅等, 2002; 封志兵等, 2013; 赵忠华等, 2018),表明盆地北部同样具有巨大的找矿潜力。研究区位于盆地东北缘,以往较少受到煤炭、石油系统的关注,基础地质资料积累匮乏,其铀源条件、沉积建造、后生改造条件等铀矿地质研究也相对薄弱(王帆, 2018)。

砂岩型铀矿作为铀矿床的重要类型之一,其产量占全球铀产量 55%(2015 年底数据, Tulsidas and Fairclough, 2018),加上其开采方式经济、环保、简单

等优点,已成为近年来铀矿地质的研究热点(聂逢君等, 2015; 张金带, 2016; 焦养泉等, 2018)。砂岩型铀矿多产于含炭质和/或黄铁矿的河流相(海相中不太常见)、长石质中—粗粒砂岩中(Tulsidas and Fairclough, 2018)。沉积建造是评价和筛选盆地砂岩型铀矿有利区带的基本评价判据之一(易超等, 2020),包括地层结构、沉积充填与演化、有利砂体定位等主要内容。大中型矿床的成矿作用主要为以层间氧化作用为主,可能耦合原生预富集作用、潜水氧化作用、烃类还原作用等(聂逢君等, 2015; 刘武生等, 2017; Hou et al., 2017; 李子颖等, 2020),发生层间氧化作用的必要条件在于是否存在含铀含氧水层间渗入的窗口(Finch, 1996; 张金带, 2016),而地层结构分析是确定这个含铀含氧水渗入窗口是否存在的技术关键。故可以说,盆缘地层结构研究是评价盆内是否存在大规模层间氧化成矿作用的首要任务。另外,大规模铀矿化也需要有成层性、渗透性、稳定性条件好的砂体及稳定的泥—砂—泥结构(焦养泉等, 2007; 焦养泉等, 2015; 易超等, 2020),这个良好沉积建造的时空定位也离不开地层

充填的精细分析。

本研究依托现有的岩心、测井及前人研究成果等资料,运用沉积学、盆地分析等理论,对松辽盆地东北隆起区内的地层结构及沉积充填进行了系统研究,并结合砂岩型成矿理论,探讨了其对研究区内铀矿找矿工作的启示,以为区内砂岩型铀矿找矿工作提供指导。

2 地质背景

位于中国东北部的松辽盆地,可细分出西南隆起区、东南隆起区、西部斜坡区、北部倾没区、中央坳陷区及东南隆起区6大构造单元(Feng et al., 2010),研究区位于盆地东北侧的东北隆起区内,其自北向南进一步细分出海伦隆起、绥棱背斜、庆安隆起、呼兰隆起、绥化凹陷5个次级构造单元(图1)。

从构造演化上看,松辽盆地经历了早中侏罗世热隆张裂期(前裂谷期)、晚侏罗世一早白垩世初期的伸展断陷期(裂谷期)、晚白垩世早中期的沉降拗

陷期(后裂谷期)及晚白垩世幕式构造反转期(抬升萎缩期)4大阶段(Feng et al., 2010; Wang et al., 2016),其中后裂谷期可进一步划分出4个构造幕(冯有良等, 2018),但研究区主要保存了前3个构造幕的地层记录(图2):自底到顶依次沉积了泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组等晚白垩世地层,缺失四方台组—明水组(晚白垩世顶部地层)、古近系及新近系,第四系直接覆盖在嫩江组之上(图2)。其中青山口组一段和嫩江组二段在全区为厚层富含介形虫、东方叶肢介化石的深灰色、灰黑色泥质沉积,为全区内明显的区域标志层。需要注意的是,青山口组顶部—姚家组底部存在一个区域性的不整合界面(冯有良等, 2018),该界面上下沉积相(三角洲突变为扇三角洲)、构造幕(热沉降二幕—热沉降三幕界线)、古气候参数(湿度:湿润—半湿润;气候带:热带—北亚热带;Wang et al., 2013)均存在突变(图2)。前人研究表明此不整合对应至少存在大于3.2 Ma的地层缺失(Wang et al., 2013; 杨承志, 2014; 冯

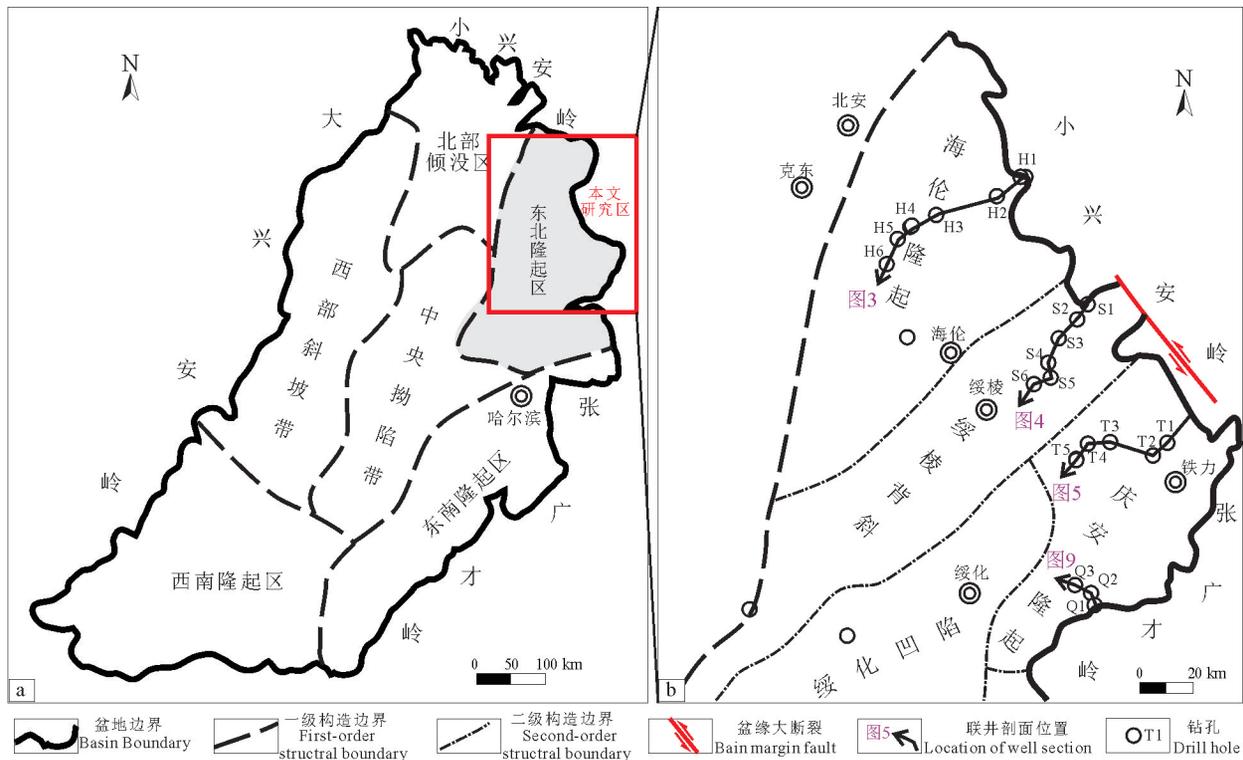


图1 松辽盆地东北隆起区综合信息图

a 松辽盆地构造单元划分引自 Feng et al. (2010). 注意 b 中示意了图3、图4、图5、图9的平面位置(黑色带箭头实线)

Fig.1 Comprehensive information map of northeastern uplift zone in Songliao Basin

Note that the division of structural units in Songliao basin in fig.a is after Feng et al. (2010) and the black solid lines with arrow stand for the location of Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 and Fig. 9

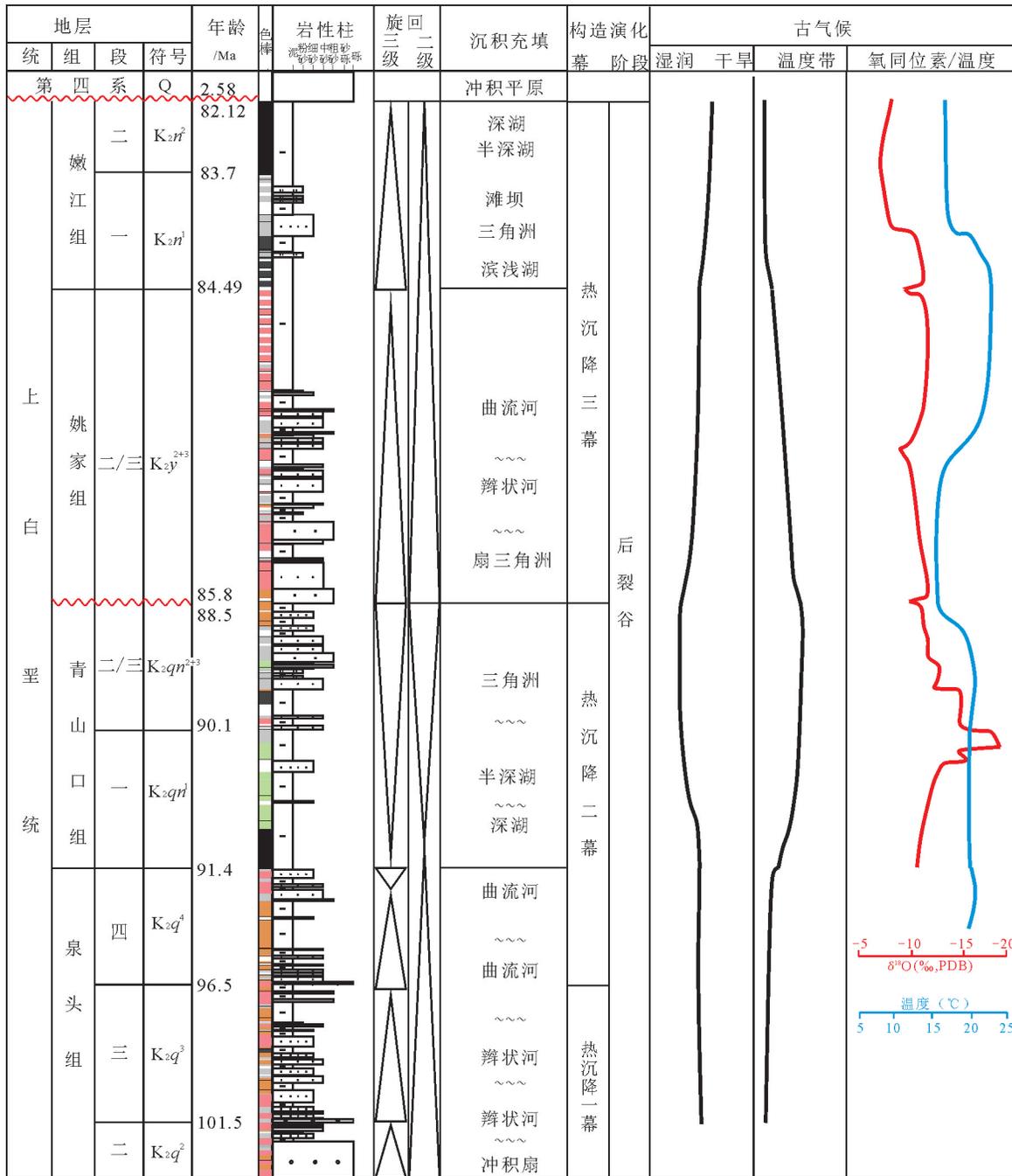


图2松辽盆地东北缘地层综合柱状图

(白垩纪地层年龄数据、构造演化引自冯有良等,2018;第四系年龄引自Cohen et al.,2013;古气候曲线引自Wang et al.,2013)

Fig.2 The comprehensive column of strata in the northeast margin of Songliao Basin

(Note that Cretaceous ages, tectonic evolution stage are after Feng Youliang et al.,2018; Quaternary age after Cohen et al.,2013; Paleoclimate curve after Wang et al.,2013)

有良等, 2018), 研究区内表现为缺失姚家组一段沉积(图2)。第二个区域性不整合即第四系与嫩江组之间的区域不整合, 代表太平洋板块向欧亚板块俯冲、松辽盆地东部遭受挤压隆升剥蚀的构造事件(Feng et al., 2010; Wang et al., 2016); 其间缺失了明

水组、四方台组等晚白垩世地层及古近系、新近系, 考虑到嫩二段顶部地质时间为82.12 Ma(冯有良等, 2018), 第四系底部的时间2.58 Ma(Cohen et al., 2013), 其间存在79.54 Ma的地层缺失; 相比姚家组底部不整合, 该不整合面存在的时间更长, 影响的

范围更大,对铀成矿作用的影响也更为深远。

3 地层结构

地层结构即地层在三维空间内的叠置样式,本文所指的地层结构侧重以砂岩型铀矿的评价要素为出发点,特指不整合及其分布、地层终止类型(上超、下超、顶超、削蚀)及与水成铀成矿作用关系密切的含铀含氧水渗入窗口分布特征等。研究区不同构造单元内的地层结构差异较大,故本文按照研究区内的三级构造单元进行地层结构特征总结。

3.1 海伦隆起

海伦隆起位于盆地东北隆起区最北部(图1b),其自底到顶依次沉积了泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组等晚白垩世地层,第四系直接覆盖在嫩江组之上(图2)。本研究通过拉平嫩江组二段底部界面的联井剖面再现了嫩二段沉积前的地层结构(图3):泉头组直接覆盖在基底之上,其在盆缘方向被青山口组上超;但青山口组顶部一姚家组底部区域不整合界面的存在,使得泉头组在盆缘与上伏姚家

组构成削蚀接触关系,表明盆缘泉头组遭受了一定的暴露剥蚀,从而使得在姚家组沉积之前,泉头组具有含铀含氧水渗入的窗口,这个剥蚀窗口使得泉头组具备了发生大规模的层间氧化的铀成矿作用的可能性;这个新认识为研究区泉头组的找矿工作注入了信心。其上的地层整体呈超覆地层结构:青山口组在盆缘被姚家组超覆,姚家组被嫩江组一段(嫩一段)超覆,而嫩一段又被嫩二段覆盖;这种超覆的地层结构表明盆缘不存在含铀含氧水的渗入窗口,不利于大规模铀成矿作用的发生。

3.2 绥棱背斜

绥棱背斜带盆缘的联井剖面显示,嫩江组下部地层整体呈超覆结构(图4):泉头组在盆缘方向上超减薄,其上被青山口组超覆;青山口组被姚家组和嫩一段共同超覆;姚家组特征与泉头组类似,其被嫩一段超覆,但其地层上超尖灭点相比泉头组更远离盆缘。嫩一段其上虽然被嫩二段覆盖,但在盆缘方向遭受剥蚀形成区域不整合界面,与第四系构成削蚀结构;考虑到暴露剥蚀的时间足够长(79.54

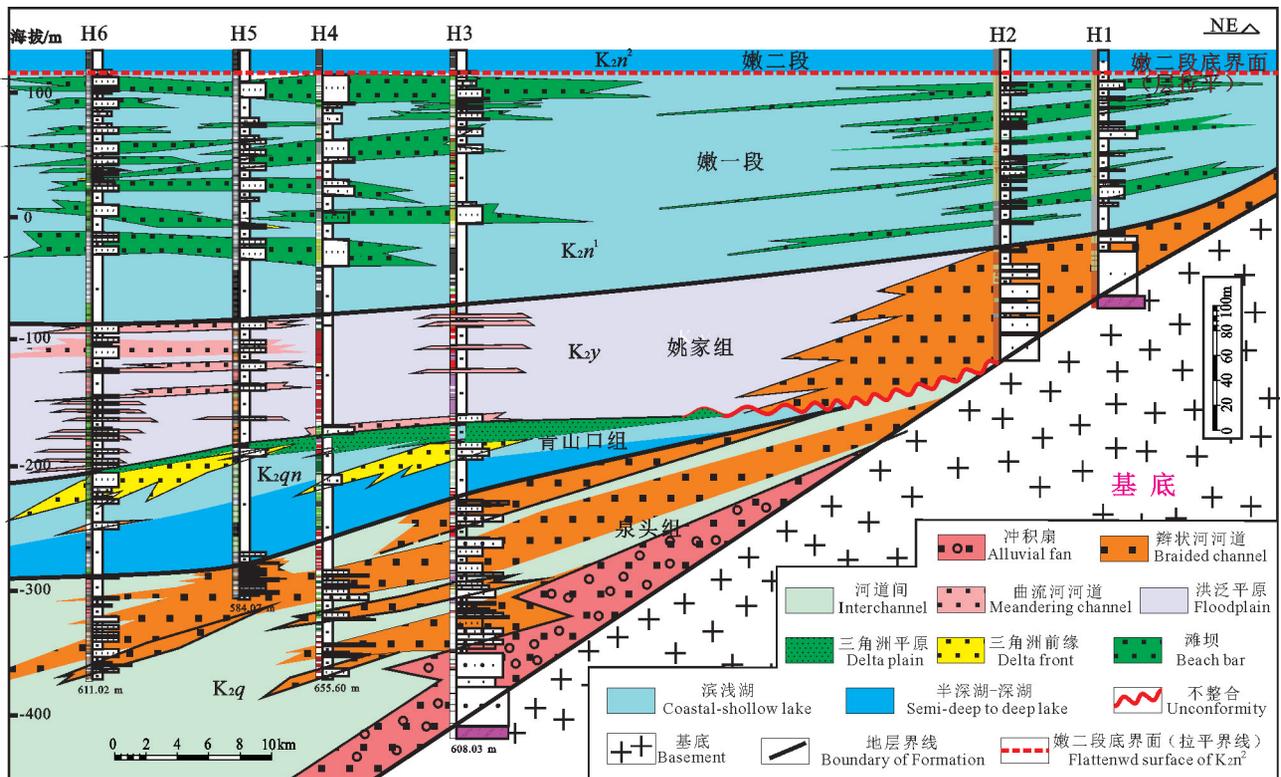


图3 松辽盆地东北隆起区海伦隆起地层结构与沉积充填 (联井剖面平面位置见图1b)

Fig.3 Stratigraphic architecture and sedimentary filling of Hailun Uplift in northeast uplift zone, Songliao Basin (See Fig.1b for the location of this cross section)

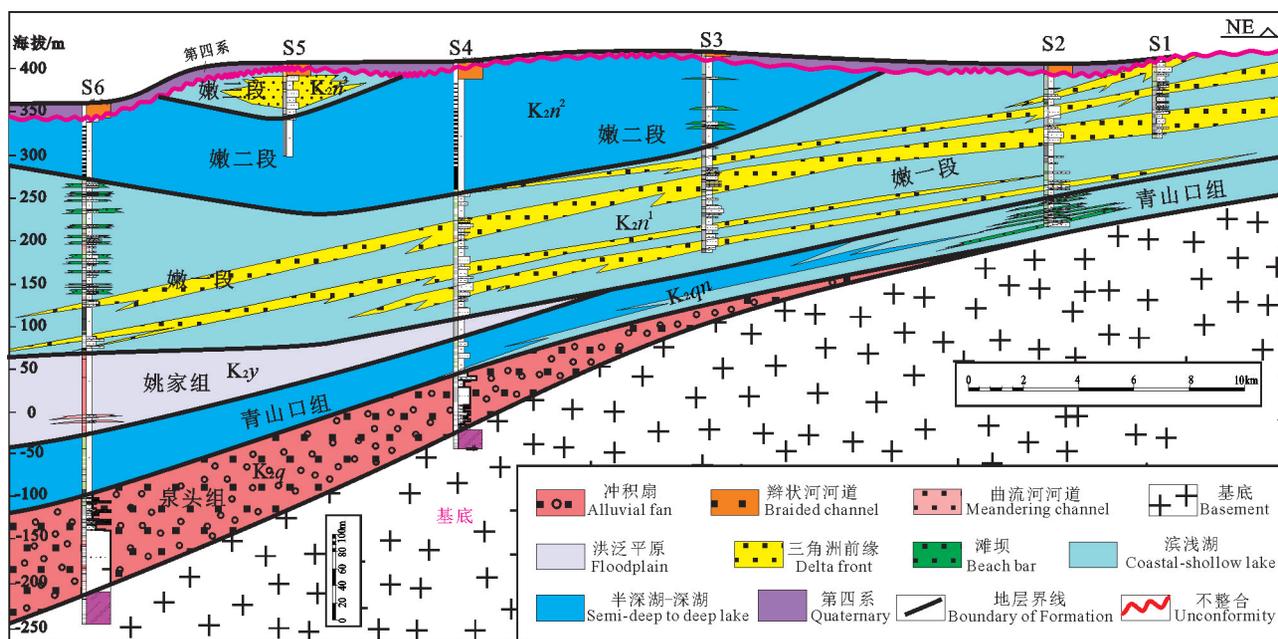


图4 松辽盆地东北隆起区绥棱背斜地层结构与沉积充填
(联井剖面平面位置见图1b)

Fig.4 Stratigraphic architecture and sedimentary filling of Suiling anticline in northeast uplift zone, Songliao Basin
(See Fig.1b for the location of this cross section)

Ma, 图2), 认为嫩一段在盆缘很可能形成含铀含氧水渗入的补给窗口。总的来看, 该区域嫩江组以下地层结构以超覆为主, 不具备含铀含氧水渗入的条件; 但嫩一段在盆缘具有削蚀暴露窗口, 即具备含铀含氧水渗入的条件。

3.3 庆安隆起

庆安隆起内的地层结构与海伦隆起、绥棱背斜的差异较大, 其前第四纪地层在盆缘整体遭受抬升剥蚀, 与第四系呈具有一定角度的削蚀结构, 形成宽缓的斜坡构造(图5)。自底到顶, 泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组的剥蚀窗口逐渐远离盆缘, 即地层越老, 其对应的盆缘窗口越靠近盆缘; 反之, 地层越新, 其对应的盆缘窗口越远离盆缘。需要注意的是, 晚白垩世地层与第四系通过第四系底部的区域不整合界面分隔。该不整合为区域性分布的角度不整合, 对应缺失四方台组—明水组等晚白垩世地层及古近系—新近系, 地质时间上缺失79.54 Ma(图2)。长期的暴露剥蚀使得该地区所有晚白垩世地层均具有含铀含氧水渗入的窗口, 在其他成矿条件良好的情况下该区域内的所有地层均具有铀矿化的可能性。

3.4 渗入窗口展布特征

依据地层结构的系统分析, 笔者得到了研究区

内削蚀暴露区的分布范围, 即可能的含铀含氧水渗入窗口的展布特征(图6)。其进一步可细分为盆缘渗入窗口区、盆内渗入窗口区两大类, 前者主要位于研究区东南部、张广才岭蚀源区以西、大致NE向展布的广大盆缘区, 对应泉头组、青山口组、姚家组的渗入窗口, 该类窗口暴露的时间足够长(最长82.12 Ma, 图2); 后者则呈土豆状位于海伦市西北的盆内, 主要为泉头组在海伦隆起内可能的渗入窗口, 其窗口暴露的时间相对较短(最长2.58 Ma, 图2)。这些渗入窗口展布特征的厘定, 奠定了区内层间氧化型砂岩型铀矿找矿的信心, 并为砂岩型铀矿成矿条件的厘定及有利区预测提供了依据。

4 沉积充填

4.1 沉积相类型

研究区内的沉积类型多样, 具有冲积扇、扇三角洲、曲流河、辫状河、三角洲、滩坝及半深湖—深湖相共7种沉积相类型, 各种沉积相又可进一步细分出多种亚相和微相。

4.1.1 冲积扇

区内的冲积扇沉积, 岩性以厚层杂色砂质砾岩、含砾粗砂岩为主, 局部夹中细砂岩、薄层泥岩,

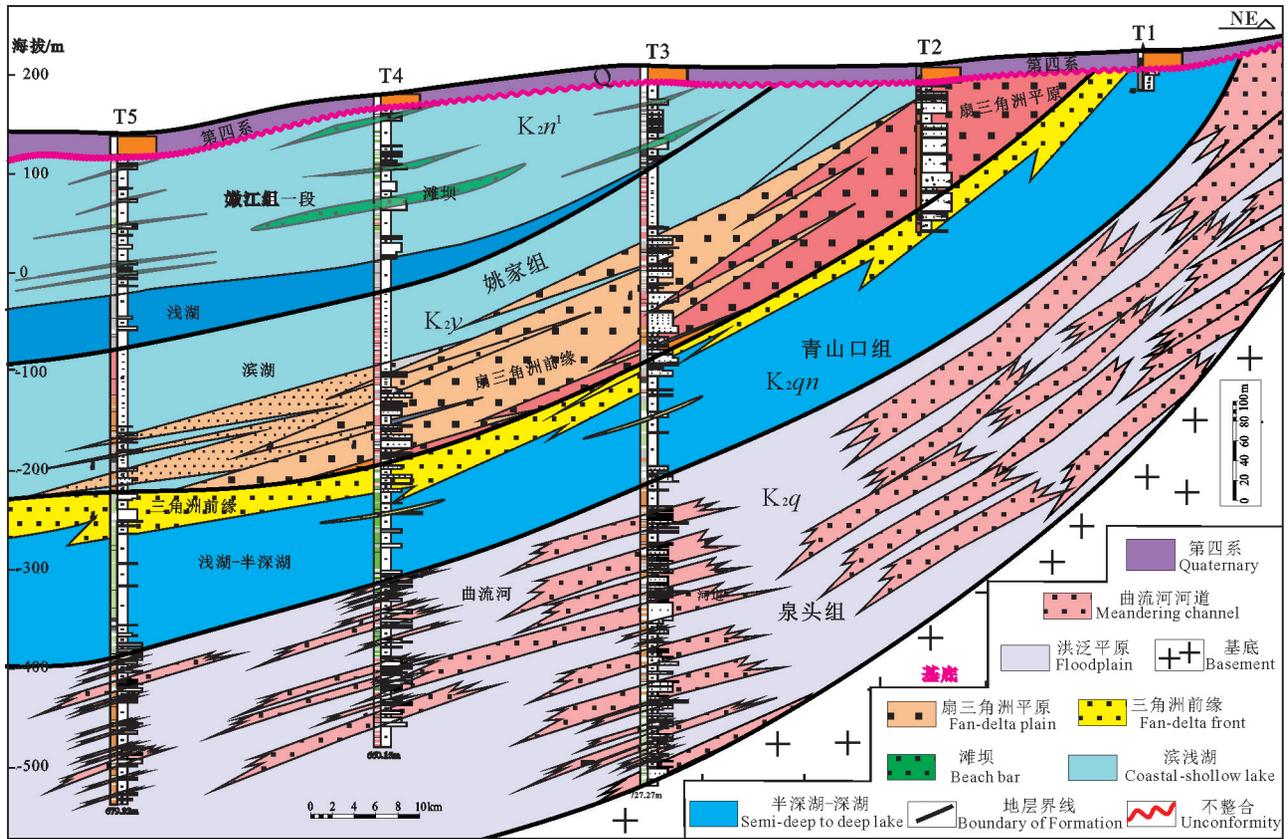


图5 松辽盆地东北隆起区庆安隆起北部地层结构与沉积充填
(联井剖面平面位置见图1b)

Fig.5 Stratigraphic architecture and sedimentary filling of northern Qing'an Uplift in northeast uplift zone, Songliao Basin
(See Fig.1b for the location of this cross section)

砾石多棱角状,分选差、磨圆极差、杂基支撑;可进一步分出泥石流沉积、辫状河河道沉积及漫流沉积等微相(图7)。该沉积相主要分布在海伦隆起、绥棱背斜、庆安隆起南部的泉头组(图3~图5;图9)。

4.1.2 扇三角洲

扇三角洲沉积体系是由冲积扇提供物质并沉积在活动扇与静止水体分界面处的、全部或部分位于水下的沉积体(林畅松, 2016)。研究区内的扇三角洲体系包括扇三角洲平原组合、扇三角洲前缘组合亚相,扇三角洲平原亚相以红色—紫红色、局部夹灰绿色—黄色的杂色粗粒建造、多个正旋回叠置发育为特征,可进一步细分出泥石流、辫状河河道及洪泛平原3种微相;扇三角洲前缘亚相以杂色中砂岩、细砂岩与杂色泥岩交互沉积、局部可见反粒序为特征,可识别出水下分流河道、水下分流间湾、河口坝等沉积微相。横切物源方向,其表现为顶平底凹的碗状;顺物源方向,该沉积体系表现为不断

向盆内进积的、减薄的楔形(邢作昌等, 2020)。该沉积相是研究区庆安隆起北部铁力地区姚家组典型的沉积充填类型(图5)。

4.1.3 辫状河

区内辫状河相岩性以中厚层灰色、黑白色、红色砾质粗砂岩、含砾中砂岩、局部夹薄层红色、灰绿色泥岩、泥质粉砂岩为特征,垂向相序显示整体砂多泥少特征,并可见多个由薄层砾岩—中层粗砂岩—细砂岩组成的正粒序旋回;各旋回间以明显冲刷面分隔为特征。可细分河道、心滩等沉积微相。该沉积相砂体的孔渗物性、砂体厚度及延展性等特征较其他沉积相类型好,是研究区北部海伦隆起泉头组中上部、姚家组靠盆缘基底方向重要的沉积充填相类型(图3)。

4.1.4 曲流河

该沉积相岩性为中厚层灰白色、棕红色细砂岩、泥质细砂岩与中厚层灰色泥岩、粉砂质泥岩近

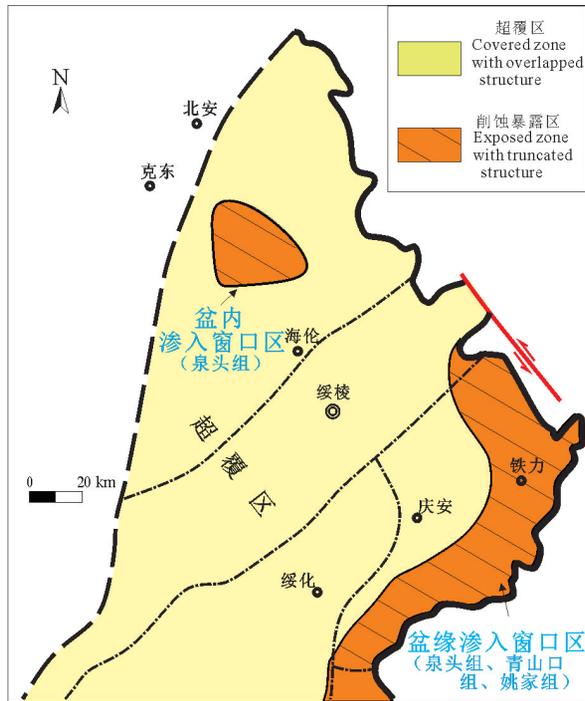


图6 松辽盆地东北隆起区可能含铀含氧水渗入窗口的平面分布

Fig.6 Plane of the infiltration window for oxygen water with dissolved uranium in northeast uplift zone, Songliao Basin

似等厚沉积,二元结构特征明显,垂向上可见多个正粒序的叠置;区内可进一步识别滞留沉积、边滩、洪泛平原、洪泛沼泽等多个微相。是区内海伦隆起、绥棱背斜构造单元内姚家组、庆安隆起北部泉头组内的主要沉积充填类型(图3~图5)。

4.1.5 三角洲

三角洲是研究区内的典型海陆过渡相沉积,其内部进一步可识别出三角洲平原、三角洲前缘、前三角洲三类亚相及河口坝、水下分流河道、水下分流间湾等多种沉积微相。区内该类沉积的典型识别标志为由河口坝、前三角洲泥构成的三角洲前缘组成的反旋回,之上被三角洲平原构成的正旋回叠置,这“一反一正”的相序叠置特征是这类相类型识别的重要标志。相比来看,此类沉积相较冲积扇、河流相等,主要以细砂、粉砂为主,且多沙泥互层。绥棱背斜赵光地区个别钻孔可见一定的铀增高,表明其具有一定的铀富集。此类沉积区内为海伦隆起青二段、绥棱背斜嫩一段、庆安隆起北部青二段的主要沉积充填类型(图3~图5)。

4.1.6 滩坝

岩性上表现为灰色砂泥建造,砂体主要为灰色细砂岩、粉细砂岩,部分砂内可见少量海绿石;泥岩主要为灰色、灰黑色。砂体厚度较薄,且厚度不稳定,多数砂体显示块状构造,部分具有反旋回层理。该类型沉积是海伦隆起、庆安隆起北部嫩一段内重要的沉积充填类型(图3,图5)。

4.1.7 半深湖—深湖相

半深湖—深湖相的岩性为厚层深灰色、灰黑色泥岩(图8a),可见明显的水平层理构造(图8b),泥岩层面可见大量的介形虫、东方叶肢介等生物化石(图8d、e),局部地段泥岩层面见3~7 mm不等的黄铁矿(图8c),表明缺氧、强还原的沉积环境;个别地区嫩二段钻孔的中上部具有垂直的、被石膏充填的裂隙(图8a)。该沉积相为青山口组一段、嫩江组二段内的典型沉积相,同时也是研究区全区范围内最具特色的地层标志层(图3~图5)。

4.2 沉积充填样式

沉积充填指沉积体系在空间上的展布样式,其可以揭示有利相带砂体的时空分布特征。研究区内青山口组一段、嫩江组二段地层充填特征在全区基本一致,为具有大量介形虫、东方叶肢介化石的半深湖—深湖泥质沉积(图8),是研究区明显的区域标志层,同时又可作为区域性的隔水层。其他地层在不同构造单元内的沉积充填差异较大,故分开进行讨论。

4.2.1 海伦隆起

研究区北部海伦隆起内的沉积充填分析表明,相对其他地层,青山口组和嫩二段粒度最细,而泉头组、姚家组、嫩一段粒序相对较粗;最底部的泉头组,底部冲积扇充填,中上部过渡为辫状河沉积;青山口组顶部发育三角洲充填;向上姚家组在盆缘为一套延伸有限的辫状河体系充填,向盆方向很快过渡为曲流河充填;而嫩一段为滩坝体系与滨浅湖泥的交互充填(图3)。从砂岩型找矿的有利相带来看,该区泉头组辫状河河道砂体最好,姚家组曲流河河道砂体次之。

4.2.2 绥棱背斜

该构造带上整体地层充填特征除青山口组和嫩二段特征与海伦隆起上类似外,其他地层差异较大(图4):泉头组充填以冲积扇相占优(图7);姚家

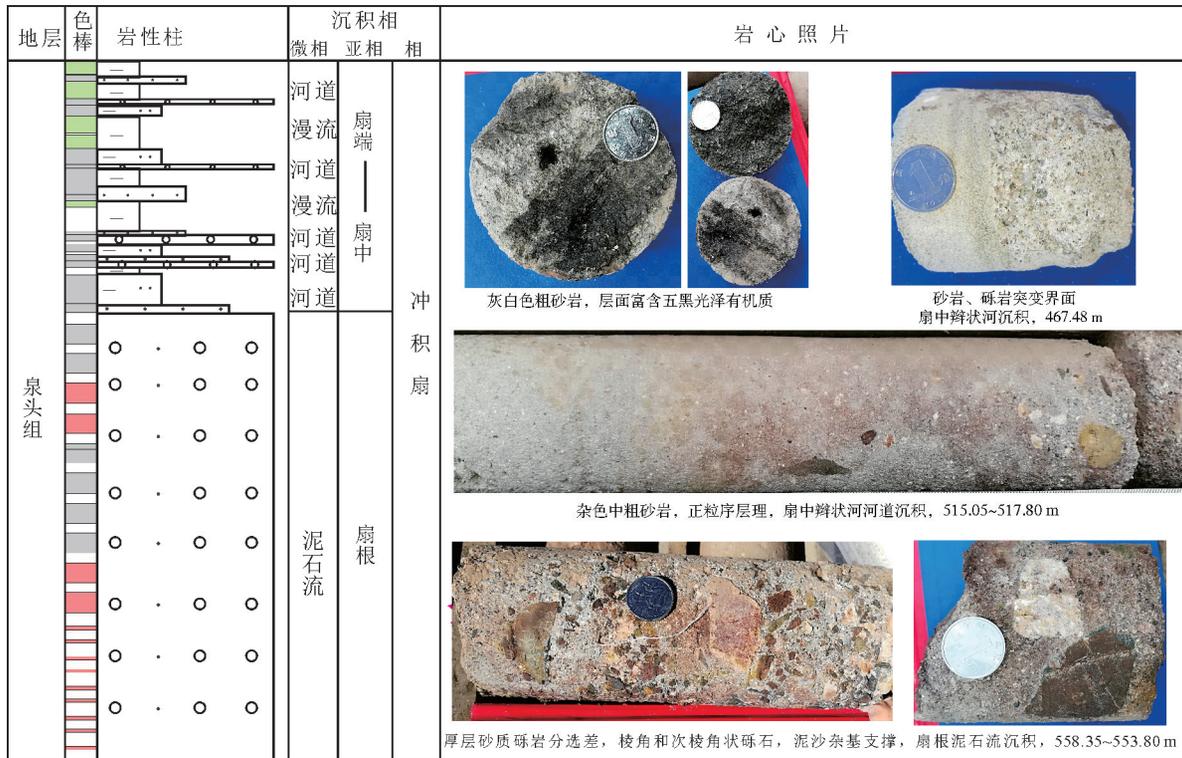


图7 松辽盆地东北隆起区冲积扇沉积特征

Fig.7 The sedimentary characteristics of alluvial fan in northeast uplift zone, Songliao Basin

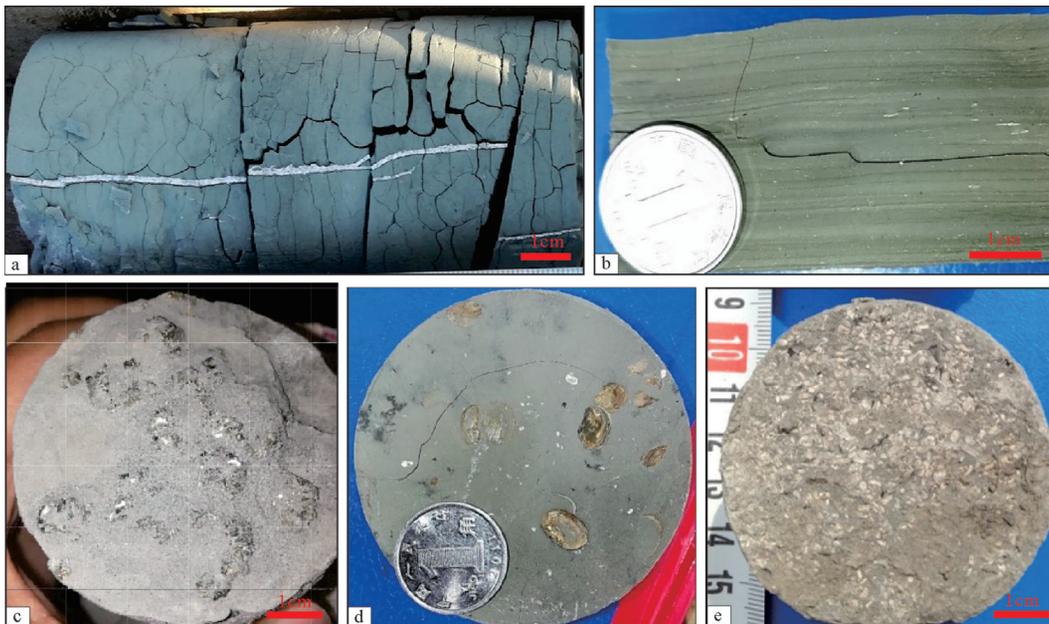


图8 松辽盆地东北隆起区内半深湖—深湖相岩心特征

a—深灰色泥岩,垂直裂缝中石膏充填,嫩江组;b—泥岩中的水平层理,嫩江组;c—灰色粉砂质泥岩中层见面黄铁矿(亮点),青山口组;d—灰黑色泥岩层间见东方叶肢介碎片化石,嫩江组;e—灰色泥岩层面见大量介形虫化石,嫩江组

Fig.8 The characteristics of semi-deep lake and deep lake sedimentary facies showed by cores, northeast uplift zone of Songliao Basin
a—Dark grey mudstone with gypsum filling in vertical fracture, Nenjiang Formation; b—Horizontal bedding in mudstone, Nenjiang Formation; c—Pyrites, the bright spots, can be see in gray silty mudstone, Qingshankou Formation; d—Eosostheria fossils in grayish black mudstone, Nenjiang Formation; e—Lots of Ostracoda fossils in the grey mudstone, Nenjiang Formation

组以洪泛平原的细粒沉积为主,缺少河道粗粒沉积,表明该沉积期该地区距离主河道距离较远;嫩一段则以三角洲充填为主。从砂岩型铀矿找矿来看,该区仅有嫩一段三角洲前缘砂体可能具备铀成矿潜力。

4.2.3 庆安隆起

庆安隆起北部的铁力地区,除青一段和嫩二段主要以半深湖—深湖相泥岩为主,其他地层的充填特征与海伦隆起、绥棱背斜的差异较大(图5):盆缘泉头组整体以曲流河充填为主,青山口组顶部具有少量的三角洲体系,而姚家组底部靠近盆缘方向充填扇三角洲体系,向盆方向很快突变为滨浅湖相沉积。嫩一段以浅湖相泥岩为主,可穿插少量的滩坝体系。从砂岩型铀成矿条件来看,区内泉头组的曲流河河道砂体、姚家组的扇三角洲体系具有较粗的粒度,且垂向具有稳定的泥—沙—泥结构,是有利的相带砂体。

庆安隆起南部的庆安地区,目前钻孔仅控制了泉头组地层,沉积充填以冲积扇中—扇端为主(图

9):泉二段底部为冲积扇扇根泥石流沉积,向上变为扇中辫状河河道、扇端漫流沉积;泉三段中下部为扇中—扇端沉积,上部为浅湖相泥岩沉积;泉四段目前未有钻孔控制。该区扇中辫状河河道砂体是有利的沉积相带砂体。

整体来看,海伦隆起泉头组辫状河河道砂体、庆安隆起北部铁力地区姚家组扇三角洲前缘砂体—泉头组曲流河河道砂体、庆安隆起南部泉头组扇中辫状河河道砂体是区内较为有利的沉积相砂体,可作为有利的含铀建造进行进一步精细分析。

5 砂岩型铀矿勘查找矿方向

松辽盆地东北蚀源区(小兴安岭+张广才岭)富铀花岗岩体为研究区提供了丰富的铀源(代问义等,2019),且在泉头组、姚家组、嫩江组等多个层位发现铀异常(图11),表明研究区内铀源充足。前人研究表明,东北隆起区具有渗入型自流水盆地特征(楼章华等,2001),水文地质条件较好,具备了地浸砂岩型铀成矿地质条件(钟延秋等,2010)。笔者认为制约研究区内砂岩型铀矿找矿突破的关键因素为沉积建造,故在地层结构和沉积充填分析的基础上,充分结合砂岩型铀矿的成矿要素及找矿经验,对区内的找矿层位、找矿类型及找矿方向进行了总结。

5.1 找矿层位

研究区内的泉头组、姚家组、嫩一段可作为主攻层位进行优先勘查。

泉头组是松辽盆地东北隆起区内砂岩型铀矿勘查最为有利的层位。首先,在庆安隆起、海伦隆起均具有含铀含氧水渗入的窗口(图3,图5,图9),从而具备发生层间氧化的可能性。其次,泉头组冲积扇扇中辫状河河道砂体(庆安隆起南部的庆安地区)、辫状河河道砂体(海伦地区)、曲流河河道砂体(庆安隆起北部的铁力地区)的粒度都较粗,且砂体上下都有区域性的隔水层(基底、青一段泥岩构成区域性的两个隔水层),垂向上具有稳定的泥—砂—泥结构。加之庆安地区、海伦地区目前具有铀异常孔的发现(图11)。综合来看,研究区内泉头组砂岩型铀矿的成矿条件良好。

姚家组是研究区内第二个砂岩型铀矿勘查的有利层位。该组有利相带砂体类型为扇三角洲前缘砂体(图5;庆安隆起北部铁力地区)、曲流河河道

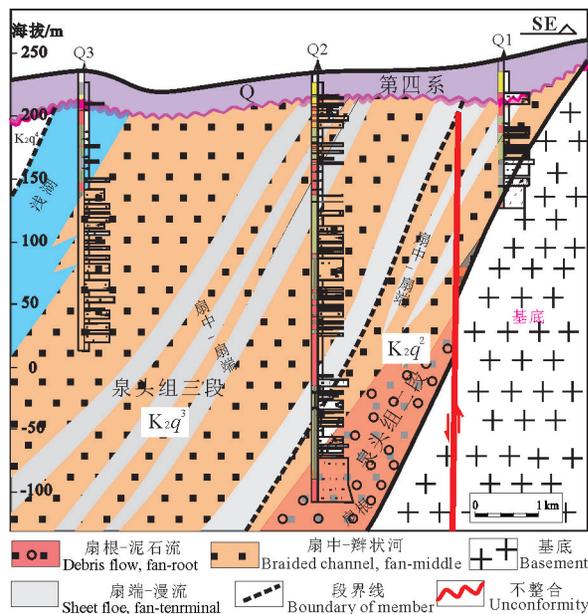


图9 松辽盆地东北隆起区庆安隆起南部泉二段、泉三段地层结构与沉积充填
(联井剖面平面位置见图1b)

Fig.9 Stratigraphic architecture and sedimentary filling of Quan2 Member and Quan3 Member of southern Qing'an Uplift in northeast uplift zone, Songliao Basin
(See Fig.1b for the location of this cross section)

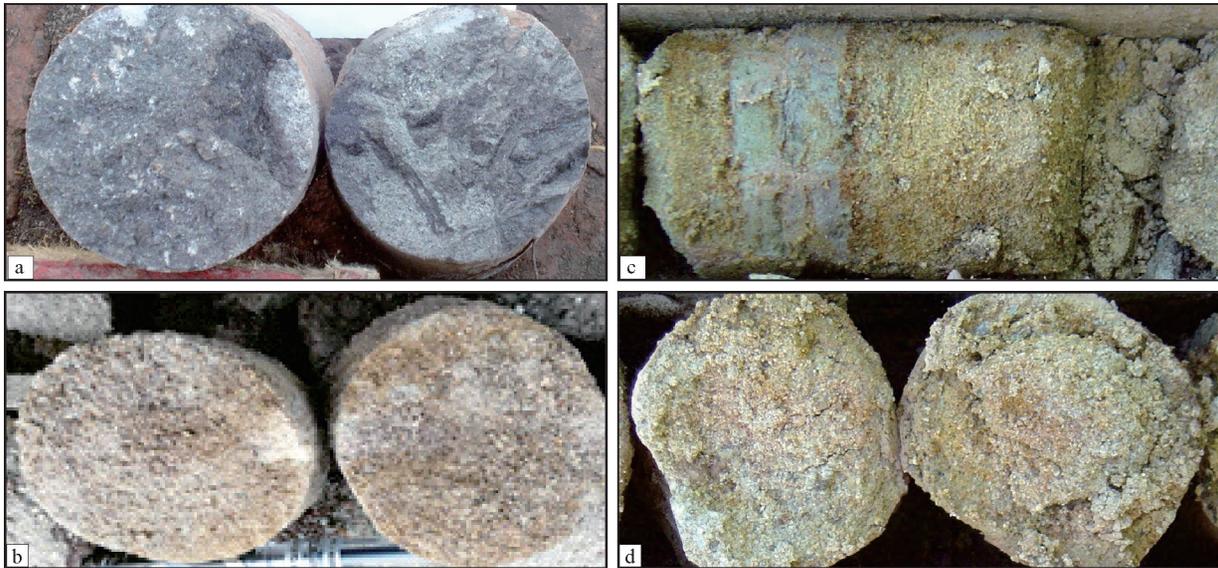


图10 松辽盆地东北隆起区铁力地区姚家组砂岩蚀变特征

a—灰色砂岩中的植物根茎化石,辫状河河道;b—褐黄色氧化砂,水下分流河道;c—黄色、黄绿色氧化粗砂岩,褐铁矿化,水下分流河道;d—黄色氧化粗砂岩,强褐铁矿化,河口坝

Fig.10 Sandstone characteristics of Yaojia Formation in northeast uplift zone, Songliao Basin

a—Plant rhizome fossils in grey sandstone of braided river channel microfacies; b—Brown yellow oxidized sand of underwater distributary channel microfacies; c—Yellow and yellow green oxidized coarse sandstone with ferritization of underwater distributary channel microfacies; d—Yellow oxidized coarse sandstone with strong ferritization of mouth bar microfacies

砂体(图3;海伦隆起)。就地层结构特征看,庆安隆起北部铁力地区盆缘具有含铀含氧水渗入窗口(图5),且窗口暴露的时间足够长(图2);考虑到扇中辫状河河道砂体中发育了大规模的黄绿色后生蚀变(图10b~d)及原生河道砂岩中含有丰富的植物根茎化石(图10a),更增加了其作为有利层位的信心。

嫩一段是第三个砂岩型铀矿可能的找矿层位。该组内的沉积充填以三角洲体系(绥棱背斜)、滩坝体系(海伦地区、铁力地区)为主,组内砂体的厚度大且和稳定性良好,但粒度较泉头组、姚家组偏细且砂泥互层特征明显(图3~图5)。考虑到嫩一段在绥棱背斜的盆缘方向具有含铀含氧水渗入窗口(图4),且该层段内发现两个铀增高孔(图11),不排除其铀成矿的可能性。

5.2 找矿类型

研究区地层结构的系统研究表明,绥棱以南广大地区显示,盆缘地层广泛暴露,形成含铀含氧水渗入的窗口;绥棱以北的个别层组(海伦地区泉头组、绥棱地区嫩一段)也同样具备渗入窗口(图6)。结合厘定的多数重要找矿层位垂向上具备稳定的泥沙—泥—结构、良好的蚀变特征等层间氧化成矿

作用的有利条件,故大胆推测研究区内可能的铀成矿作用应以层间氧化型砂岩型铀矿为主。区内砂岩型铀矿找矿工作应重点寻找层间氧化型砂岩型铀矿,兼顾沉积成岩型、潜水氧化型等其他类型砂岩型铀矿。

5.3 找矿方向

在地层结构、沉积充填、蚀变特征及铀异常孔(含增高孔)特征的综合分析基础上,在砂岩型铀成矿理论的指导下,笔者在松辽盆地东北隆起区内厘定了三大找矿方向(图11),包括庆安地区、铁力地区、海伦地区及绥棱地区4个地区(按成矿可能性大小依次排序)。

(1) I找矿方向

庆安地区位于庆安隆起南部(图11),找矿层位为泉头组。区内已发现1个铀矿化孔、2个铀异常孔,加之其具有渗入窗口(图6,图9)、冲积扇扇中辫状河河道砂体物性良好、且后生蚀变条件也较为有利。综合认为区内砂岩型铀矿进一步探索的空间很大,可进行优先探索。

铁力地区位于庆安隆起北部(图11),找矿层位为姚家组。区内姚家组具有含铀含氧水渗入的窗口、

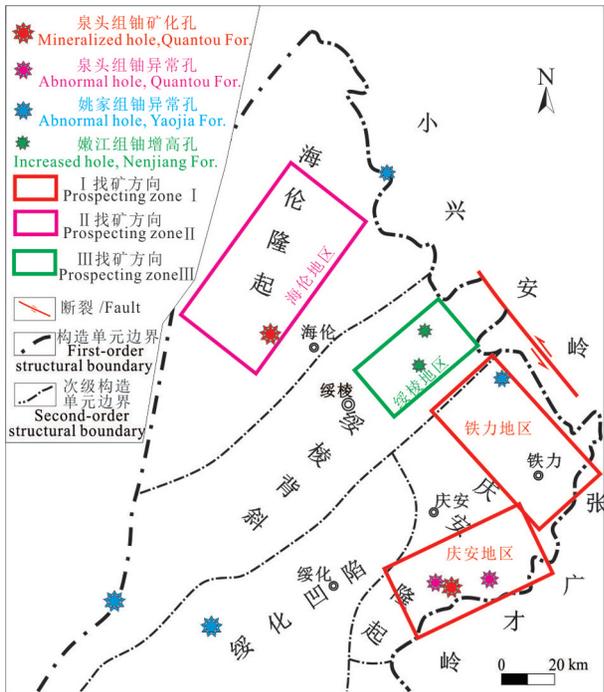


图 11 松辽盆地东北隆起区有利区预测
 Fig.11 Prediction of uranium prospects in northeast uplift zone, Songliao Basin

垂向上具有稳定的泥(青山口组厚层泥岩)—砂(扇三角洲前缘砂体)—泥(姚家组中上部滨浅湖泥岩及嫩江组厚层泥岩)结构(图5)、后生蚀变条件良好等特征(图10b~d)、且在区内东北部发现一个铀异常孔(图11)。故认为该地区也有较大的找矿潜力。

(2)II找矿方向

海伦地区位于海伦隆起内(图11),可主攻泉头组,兼顾姚家组,找矿类型为层间氧化型砂岩型铀矿。该区有利条件为泉头组中上部充填的辫状河砂体,其粒度、厚度、渗透性等物性特征良好;附近泉头组已发现一个铀异常孔。不利条件为作为层间氧化含铀含氧水渗入的窗口,其暴露剥蚀是时限大约持续3.2 Ma(图2),较短的暴露时间意味着需要较高的成矿效率,需要最佳的构造-建造-后生改造的时空匹配。鉴于目前该地区铀矿地质投入的工作量较少,地质认识较为薄弱。故建议加大对该地区的探索。

(3)III找矿方向

绥棱地区位于绥棱背斜的靠盆缘一侧(图11)。区内仅嫩一段的三角洲前缘砂体可能具有一定的成矿潜力:垂向上具有稳定的泥—沙—泥结构

且盆缘具有渗入窗口(图4)。考虑到区内嫩一段存在两个铀增高孔(图11),故建议将其作为备选区进行勘查。

6 结论

(1)理清了松辽盆地东北隆起区盆缘的地层结构:绥棱以北嫩江组以下地层整体以超覆结构为主,仅海伦隆起泉头组在盆缘具有削蚀结构;绥棱以南的晚白垩世地层整体呈宽缓的斜坡构造,在盆缘所有地层均呈削蚀结构。明确了研究区内可能含铀含氧水渗入窗口的时空分布:庆安隆起晚白垩世地层均有渗入窗口,绥棱背斜带仅嫩一段具有渗入窗口,而海伦隆起仅泉头组可能具有渗入窗口。

(2)在研究区内识别出冲积扇、扇三角洲、曲流河、辫状河、三角洲、滩坝及半深湖—深湖相7种沉积相类型,并系统梳理了海伦隆起、绥棱背斜、庆安隆起内不同构造单元内的沉积充填特征。

(3)厘定了松辽盆地东北隆起区砂岩型铀矿的主攻层位、找矿类型及找矿方向:泉头组、姚家组、嫩一段可作为主攻层位进行优先勘查;区内找矿应坚持层间氧化型砂岩型铀矿为主,兼顾其他类型;庆安地区泉头组冲积扇扇中辫状河河道砂体、铁力地区的扇三角洲前缘和平原砂体、海伦地区泉头组的辫状河河道砂体、绥棱地区嫩一段的三角洲前缘砂体都是可能的找矿方向。

致谢:感谢匿名审稿人及编辑部提出的宝贵修改意见。

References

Cohen K M, Finney S C, Gibbard P L, Fan J X. 2013. The ICS international chronostratigraphic chart[J]. Episodes, (36): 199–204.
 Cai Jianfang, Yan Zhaobin, Zhang Liangliang, Feng Zhibing, Huang Xiao, Nie Fengjun, Xia Fei. 2018. Relationship between grey sandstone and uranium mineralization in Yaojia formation of upper cretaceous in Tongliao, Inner Mongolia[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 41(4): 328–335 (in Chinese with English abstract).
 Cai Liqi, Li Shengxiang. 2008. Sedimentary environment analysis of Yaojia formation—the ore-hosting stratum of Qianjiadian uranium deposit[J]. Uranium Geology, 24(2): 66–72 (in Chinese with English abstract).
 Dai Wenyi, Li Yan, Zhao Zhonghua, Zhang Yang, Zhang Hang. 2019. Minerogenetic conditions and prospecting direction of the

- Cretaceous sandstone uranium deposit in northeast Songliao Basin[J]. *Geology and Resources*, 28(6): 519–525 (in Chinese with English abstract).
- Feng Zhibing, Nie Fengjun, Yan Zhaobin, Zhong Yanqiu, Gu Shefeng, Jiang Li. 2013. Mineralizing conditions and metallogenic model of uranium in west slope of Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 32(4): 36–41 (in Chinese with English abstract).
- Feng Youliang, Zou Caineng, Meng Qi'an, Wu Weian, Lu Weihua, Zhu Jichang. 2018. Tectonic and climatic influences on architecture of sequences and sedimentary systems in a post-rift basin: Insight from Late Cretaceous Northern Songliao Basin[J]. *Earth Science*, 43(10): 3445–3461 (in Chinese with English abstract).
- Feng Zhiqiang, Jia Chengzao, Xie Xinong, Zhang Shun, Feng Zihui, Timothy A. Cross. 2010. Tectonostratigraphic units and stratigraphic sequences of the Nonmarine Songliao Basin, Northeast China[J]. *Basin Research*, 22(1): 79–95.
- Finch W I. 1996. Uranium Provinces of North America——Their Definition, Distribution, and Models[R]. *Bulletin*, 1–17.
- Hou Baohong, Keeling John, Li Ziyang. 2017. Paleovalley-related uranium deposits in Australia and China: A review of geological and exploration models and methods[J]. *Ore Geology Reviews*, 88: 201–234.
- Jiao Yangquana, Wu Liquna, Yang Qin. 2007. Uranium reservoir: A new concept of sandstone-type uranium deposits geology[J]. *Geological Science and Technology Information*, 26(4): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Jiao Yangquan, Wu Liqun, Peng Yunbiao, Rong Hui, Ji Dongmin, Miao Aisheng, Li Hongliang. 2015. Sedimentary-tectonic setting of the deposition-type Uranium deposits forming in the Paleo-Asian tectonic domain, North China[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 189–205 (in Chinese with English abstract).
- Jiao Yangquan, Wu Liqun, Rong Hui. 2018. Model of inner and outer reductive media with 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).
- Lin Changsong. 2016. Principle and Application of Sedimentary Basin Analysis [M]. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).
- Liu Wusheng, Zhao Xingqi, Shi Qingping, Zhang Zinan. 2017. Research on relationship of oil-gas and sandstone-type uranium mineralization of northern China[J]. *Geology in China*, 44(2): 279–287(in Chinese with English abstract).
- Li Ziyang, Qin Mingkuan, Cai Yuqi, Fang Xiheng, Guo Qingyin, Yi Chao, Xia Yuliang, Sun Ye, Zhang Zilong, Jia Licheng. 2020. Metallogenic models and prospective analysis of sandstone-type uranium deposits in Ordos Basin[J]. *Uranium Geology*, 36(1): 1–13 (in Chinese with English abstract).
- Lou Zhanghua, Jin Aimin, Zhu Rong, Cai Xiyuan, Gao Qirui. 2001. Formation and evolution of the hydronamic field in the Songliao Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 75(1): 111–120 (in Chinese with English abstract).
- Luo Mei, Zhao Jie. 2002. Distribution features and genesis for in-situ leachable sandstone-type uranium mineralization in northern Daqing oil field[J]. *Uranium Geology*, 18(6): 328–334 (in Chinese with English abstract).
- Nie Fengjun, Li Mangen, Deng Juzhi, Yan Zhaobin, Zhang Chengyong, Jiang Meizhu, Yang Jianxin, Kuang Wenzhan, Kang Shihu, Shen Kefeng. Multiple type uranium deposit assemblage and uranium exploration in Erlian rift Basin, Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 34(4): 711–729 (in Chinese with English abstract).
- Sun Dapeng, Tang Chao, Wei Jialin, Zeng Hui, Chen Jun, Xiao Defu. 2021. Logging responsive characteristics of formation lithology from Nenjiang Formation to Taikang Formation in southern Daqing Placanticline[J]. *North China Geology*, (1):14–20, 26(in Chinese with English abstract).
- Tang Chao, Jin Ruoshi, Gu Shefeng, Li Jianguo, Zhong Yanqiu, Miao Peisen, Sima Xianzhang, Wei Jialin. 2018. Discovery and significance of industrial uranium ore in Sifangtai Formation, north Songliao basin[J]. *Geological Survey Research*, 41(1): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Tulsidas H, Fairclough M. 2018. Geological Classification of Uranium Deposits and Description of Selected Examples[M]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 244–309.
- Xing Zuochang, Qin Mingkun, Zhang Yang, Guo Qiang, Li Yan, Jia Licheng, Xiao Jing. 2021. Sedimentary facies and prospecting potential for uranium deposits of Yaojia Formation in Tieli, northeastern Songliao Basin[J]. *Uranium Geology*, 37(4): 573–583 (in Chinese with English abstract).
- Yi Chao, Liu Hongxun, Cai Yuqi, Zhang Yuyan, Li Linqiang, Li Xide, Zhang Kang, Ding Bo, Li Ping. 2020. Reseach progress on metallogenic mechanism and information identification technique of sandstone type uranium deposit[J]. *Uranium Geology*, 36(2): 73–83 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jindai. Xu Gaozhong, Lin Jinrong, Peng Yunbiao, Wang Guo. 2010. The implication of six kinds of new sandstone-type uranium deposits to uranium resources potential in North China [J]. *Geology in China*, 37(5): 1434–1449 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jindai. 2016. Innovation and development of metallogenic theory for sandstone type Uranium deposit in China[J]. *Uranium Geology*, 32(6): 321–332 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhonghua, Bai Jingping, Lai Tiangong. 2018. Reversal structure and its relation to metallization of sandstone type uranium deposit in northern Songliao Basin[J]. *Uranium Geology*, 34(5): 274–279 (in Chinese with English abstract).
- Zhao L, Cai C, Jin R, Li J, Li H, Wei J, Guo H, Zhang B. 2018.

- Mineralogical and geochemical evidence for biogenic and petroleum-related uranium mineralization in the Qianjiadian deposit, NE China[J]. *Ore Geology Reviews*, 101: 273–292.
- Zhong Yanqiu, Li Jia, Jiang Lina, Xu Qingxia. 2010. Analysis on metallogenic condition of leaching sandstone uranium deposit in west slope of the north of Songliao Basin[J]. *Jinlin Geology*, 29(3): 29–34 (in Chinese with English abstract).
- Wang C, Feng Z, Zhang L, Huang Y, Cao K, Wang P, Zhao B. 2013. Cretaceous paleogeography and paleoclimate and the setting of SKI borehole sites in Songliao Basin, northeast China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385: 17–30.
- Wang Fan. 2018. Analysis of Metallogenic Conditions of Sandstone-Type Uranium Deposits in Northwest Area of Songliao Basin[D]. Nanchang: East China University of Technology, 65–80 (in Chinese with English abstract).
- Wang P, Mattern F, Didenko N A, Zhu D, Singer B, Sun X. 2016. Tectonics and cycle system of the Cretaceous Songliao Basin: An inverted active continental margin basin[J]. *Earth-Science Reviews*, 159: 82–102.
- Yang Chengzhi. 2014. Comparative Study on Late Cretaceous Tectonic Inversion of Songliao Basin–Great Sanjiang Basin and its Genetic Relationships[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 99–154 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 蔡建芳, 严兆彬, 张亮亮, 封志兵, 黄笑, 聂逢君, 夏菲. 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[J]. *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[J]. *铀矿地质*, (2): 66–72.
- 代问义, 李研, 赵忠华, 张杨, 张航. 2019. 松辽盆地东北缘白垩系砂岩型铀矿成矿条件与找矿方向[J]. *地质与资源*, 28(6): 519–525.
- 封志兵, 聂逢君, 严兆彬, 钟延秋, 谷社峰, 江丽. 2013. 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*, 32(04): 36–41.
- 冯有良, 邹才能, 蒙启安, 吴卫安, 鲁卫华, 朱吉昌. 2018. 构造及气候对后裂谷盆地层序建造的影响: 以松辽盆地西斜坡晚白垩世为例[J]. *地球科学*, 43(10): 3445–3461.
- 焦养泉, 吴立群, 彭云彪, 荣辉, 季东民, 苗爱生, 里宏亮. 2015. 中国北方古亚洲构造域中沉积型铀矿形成发育的沉积-构造背景综合分析[J]. *地学前缘*, 22(1): 189–205.
- 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.
- 焦养泉, 吴立群, 杨琴. 2007. 铀储层——砂岩型铀矿地质学的新概念[J]. *地质科技情报*, (4): 1–7.
- 林畅松. 2016. 沉积盆地分析原理及应用[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 刘武生, 赵兴齐, 史清平, 张梓楠. 2017. 中国北方砂岩型铀矿成矿作用与油气关系研究[J]. *中国地质*, 44(2): 279–287.
- 李子颖, 秦明宽, 蔡煜琦, 方锡珩, 郭庆银, 易超, 夏毓亮, 孙晔, 张宇龙, 贾立城. 2020. 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿成矿作用和前景分析[J]. *铀矿地质*, 36(1): 1–13.
- 楼章华, 金爱民, 朱蓉, 蔡希源, 高瑞祺. 2001. 论松辽盆地地下水动力场的形成与演化[J]. *地质学报*, (1): 111–120.
- 罗梅, 赵杰. 2002. 大庆油田北部可地浸砂岩型铀矿化分布特征及成因[J]. *铀矿地质*, 18(6): 328–334.
- 聂逢君, 李满根, 邓居智, 严兆彬, 张成勇, 姜美珠, 杨建新, 旷文战, 康世虎, 申科峰. 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[J]. *矿床地质*, 34(4): 711–729.
- 孙大鹏, 汤超, 魏佳林, 曾辉, 陈军, 肖德富. 2021. 大庆长垣南端含铀岩系地层测井响应特征及应用[J]. *华北地质*, (1): 14–20, 26.
- 汤超, 金若时, 谷社峰, 李建国, 钟延秋, 苗培森, 司马献章, 魏佳林. 2018. 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*, 41(1): 1–8.
- 邢作昌, 秦明宽, 李研, 郭强, 张杨, 肖菁, 严张磊. 2020. 铁力地区姚家组沉积相及铀成矿潜力[J]. *铀矿地质*, 37(4): 573–583.
- 易超, 刘红旭, 蔡煜琦, 张玉燕, 李林强, 李西得, 张康, 丁波, 李平. 2020. 隐伏砂岩型铀矿成矿机理与成矿地质信息识别研究进展[J]. *铀矿地质*, 36(2): 73–83.
- 张金带. 2016. 我国砂岩型铀矿成矿理论的创新和发展[J]. *铀矿地质*, 32(6): 321–332.
- 张金带, 徐高中, 林锦荣, 彭云彪, 王果. 2010. 中国北方6种新的砂岩型铀矿对铀资源潜力的提示[J]. *中国地质*, 37(5): 1434–1449.
- 赵忠华, 白景萍, 赖天功. 2018. 松辽盆地北部反转构造与砂岩型铀矿成矿作用[J]. *铀矿地质*, 34(5): 274–279.
- 钟延秋, 李佳, 姜丽娜, 徐庆霞. 2010. 松辽盆地北部西斜坡地浸砂岩型铀矿成矿条件分析[J]. *吉林地质*, 29(3): 29–34.
- 王帆. 2018. 松辽盆地西北地区砂岩型铀矿成矿条件分析[D]. 东华理工大学.
- 杨承志. 2014. 松辽盆地—大三江盆地晚白垩世构造反转作用对比及其成因联系[D]. 武汉: 中国地质大学.