

## 松辽盆地东北缘白垩系砂岩型铀矿成矿条件与找矿方向

代问义,李 研,赵忠华,张 杨,张 航

核工业 240 研究所,辽宁 沈阳 110000

**摘 要:**通过松辽盆地东北缘蚀源区铀源条件、中生代构造演化、白垩系沉积建造研究,结合石油部门地震连井剖面等资料,综合分析了松辽盆地东北部砂岩型铀矿的成矿条件研究,认为盆缘的富铀花岗岩体提供了丰富的铀源,中生代后期反转构造形成的剥蚀天窗为含铀含氧水的渗入渗出提供了通道. 研究结果显示,松辽盆地东北部绥棱地区为最有利的砂岩型铀矿找矿部位,主要找矿目标层为上白垩统泉头组兼顾浅部姚家组,找矿类型为层间氧化带型.

**关键词:**砂岩型铀矿;上白垩统;松辽盆地;成矿条件

## MINEROGENETIC CONDITIONS AND PROSPECTING DIRECTION OF THE CRETACEOUS SANDSTONE URANIUM DEPOSIT IN NORTHEAST SONGLIAO BASIN

DAI Wen-yi, LI Yan, ZHAO Zhong-hua, ZHANG Yang, ZHANG Hang

No. 240 Institute of Nuclear Industry, CNNC, Shenyang 110000, China

**Abstract:** Through studying the uranium source conditions, Mesozoic tectonic evolution and Cretaceous sedimentary formation of the provenance area in northeast Songliao Basin, combined with the seismic well-tie section data of petroleum sectors, the paper analyzes the metallogenic conditions of sandstone uranium deposits comprehensively. It is believed that the uranium-rich granite body in the basin margin provides abundant uranium sources and the denudation window formed by the inversion structure in Late Mesozoic serves as the channel for infiltration and seepage of uranium-containing and oxygenated water. The results show that Suiling area in the northeast of Songliao Basin is the most favorable prospecting site for sandstone uranium deposits, with the Upper Cretaceous Quantou Formation and the shallow part of Yaojia Formation as the main target layers, focusing on the type of interlayer oxidation zone.

**Key words:** sandstone type of uranium deposit; Upper Cretaceous; Songliao Basin; metallogenic condition

### 0 前言

松辽盆地是一个中生代陆相盆地,其中煤炭、石油、天然气资源极其丰富. 随着研究不断深入,铀矿找矿工作也取得重大突破,特别是盆地南部钱家店特大

型铀矿床的发现,掀起了砂岩型铀矿找矿的新高潮<sup>[1]</sup>. 相比于松辽南部找矿的重大突破,松辽北部的砂岩型铀矿成矿条件及成矿远景研究等成果较少,尤其是与南部地质特征较为相似的绥棱地区,工作程度则更低.

收稿日期:2019-04-08;修回日期:2019-05-22. 编辑:张哲.

基金项目:中国核工业地质局“松辽盆地北部砂岩型铀矿资源调查评价”项目(编号 201709).

作者简介:代问义(1987—),男,工程师,主要从事地球物理勘探及地质工作,通信地址 辽宁省沈阳市沈北新区道义经济开发区孝信街 12 号,E-mail//1551841328@qq.com

受限于当时的认识程度,前人仅通过地表调查及少量的钻孔施工将目的层定为嫩江组,但是这些研究成果都集中在面上的大尺度研究,对其底部地层成矿条件的研究还尚显薄弱,致使该地区砂岩型铀矿找矿工作一直未能取得突破.鉴于此,本文以砂岩型铀矿成矿理论为指导,借鉴前人关于松辽盆地东北缘基础地质研究的相关成果,同时借鉴松辽南部成矿模式,采用大间距钻探查证并结合石油部门研究成果,拟对该地区砂岩型铀矿成矿环境进行深入研究,探讨其砂岩型铀矿的成矿远景及找矿方向.

生代大型盆地,呈北北东向展布,形态似菱形,其东部为张广才岭,西部为大兴安岭,北与小兴安岭相邻,南接康法丘陵地带,面积约  $12 \times 10^4 \text{ km}^2$  (图 1). 盆地的构造演化主要分为 4 个阶段,分别为热隆张热期(前裂谷期)、伸展断陷期(裂谷期)、沉降凹陷期(后裂谷期)和反转构造期(抬升萎缩期),自上而下依次形成了 3 个较大的反转构造层<sup>[2-3]</sup>. 在构造活动强烈处抬升隆起幅度较大,导致地层受到强烈剥蚀,基性岩脉及花岗岩直接出露地表,形成多个剥蚀天窗<sup>[4-5]</sup>(图 2).

### 1 区域地质背景

松辽盆地是在松辽微板块基础上发展起来的中新

研究区位于盆地东北缘,距蚀源区较近,是隆起区、褶皱带、阶地的过渡部位,构造环境较为复杂. 基底岩性主要由中深变质岩、浅变质岩和同期花岗岩组成,上覆盖层为上白垩统登娄库组、泉头组、青山口组、

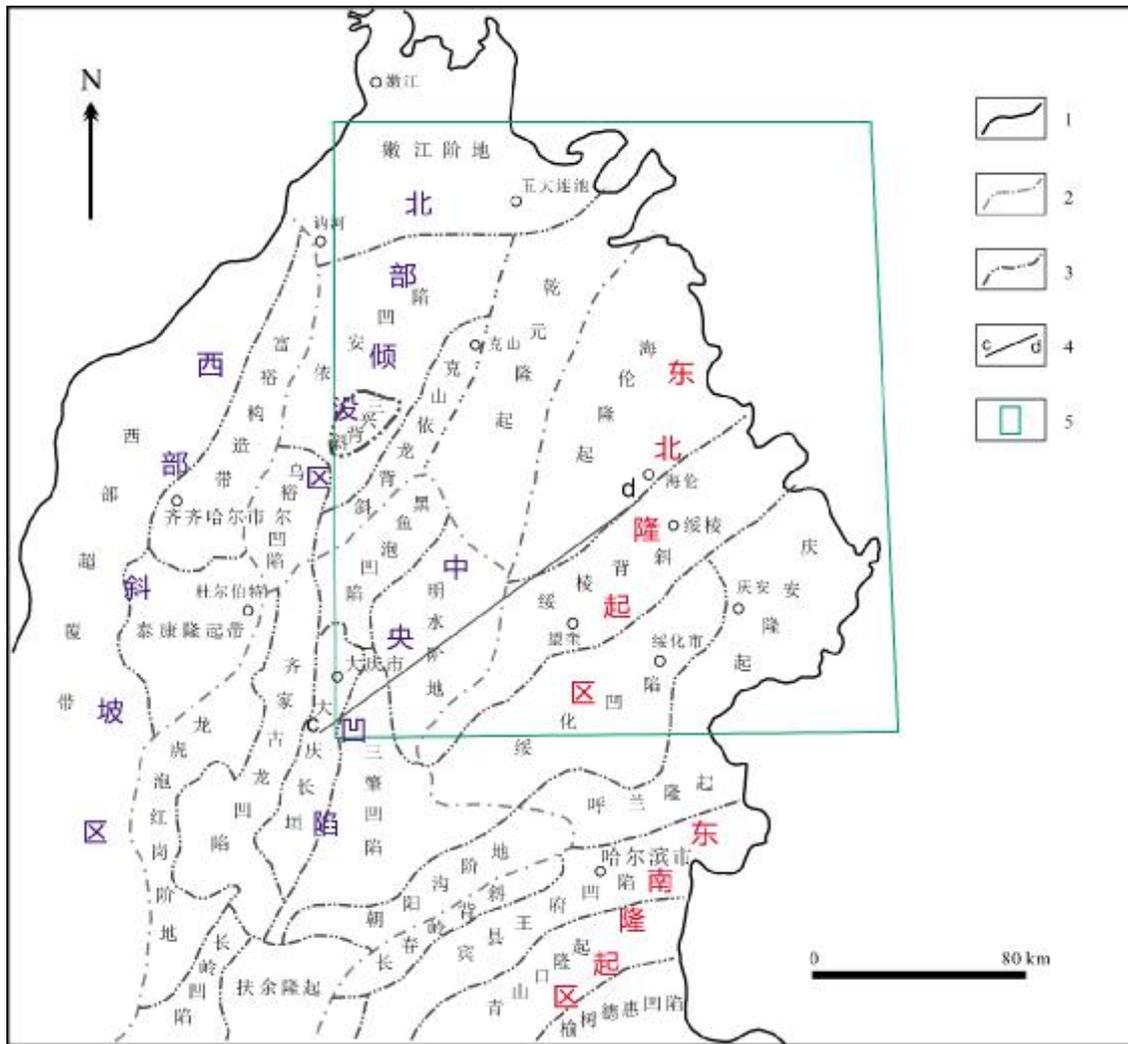


图 1 松辽盆地北部构造单元划分图

Fig. 1 Tectonic units of northern Songliao Basin

1—盆地边界(basin boundary); 2—一级构造单元(first-order tectonic unit); 3—二级构造单元(second-order tectonic unit); 4—剖面位置(profile position); 5—研究区范围(study area)

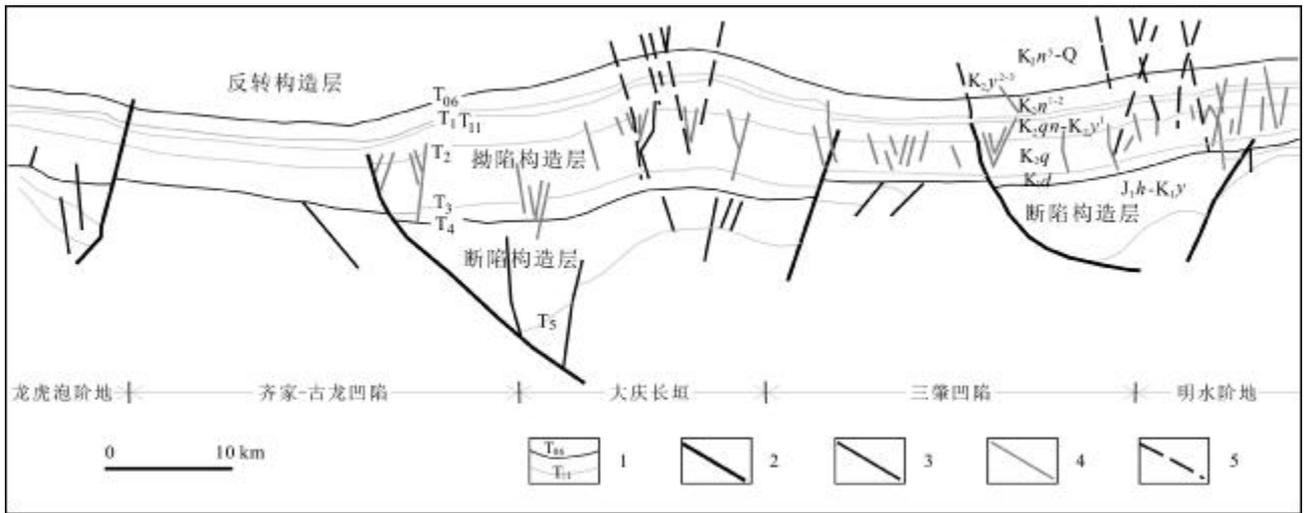


图 2 松辽盆地北部北东向剖面解释示意图

Fig. 2 Interpretation map of the SW-NE profile in northern Songliao Basin

1—地质反射界面(geologic reflection interface); 2—基底断裂(basement fault); 3—断陷期断裂(fault in faulted depression period); 4—凹陷期断裂(fault in depression period); 5—反转构造期断裂(fault in tectonic inversion period)

姚家组和嫩江组及中生代沉积地层. 由于反转构造影响, 普遍缺失明水组和四方台组地层. 其中找矿目的层为姚家组与泉头组. 含水岩性主要为灰色、黄色、灰带绿色细砂岩, 分选较好, 砂体疏松透水. 隔水层主要由棕红色、灰绿色泥岩、粉砂岩组成, 厚度 10~50 m 不等. 第四系厚度一般为 20~60 m, 主要为松散沙及黑色腐殖土.

## 2 成矿条件分析

### 2.1 铀源条件

研究区的铀源主要来自松辽盆地东北部的张广才岭与小兴安岭地区, 是整个构造活动最为活跃的地区, 尤其是后期的反转构造作用使松辽盆地整体表现为东掀西覆、东褶西平, 东强西弱的特点<sup>[6]</sup>. 花岗岩及火山岩类的岩浆活动在该区也大规模发育, 据聂逢君等<sup>①</sup>统计可知, 火山岩铀质量分数为  $3.3 \times 10^{-6} \sim 8.7 \times 10^{-6}$ , 海西期的白岗质花岗岩和黑云母花岗岩的铀含量较高, 铀质量分数为  $2.25 \times 10^{-6} \sim 22.30 \times 10^{-6}$ , 燕山期花岗岩铀质量分数为  $3.40 \times 10^{-6} \sim 13.05 \times 10^{-6}$ . 松辽盆地北部蚀源区迁入盆地的活化铀总量高达  $432 \times 10^4 \text{ t}$  (表 1), 表明盆地北部铀源丰富.

### 2.2 构造条件

研究区位于松辽盆地一级构造单元东北隆起区

表 1 松辽盆地北部含铀花岗岩蚀源区汇入盆地活化铀总量计算表<sup>①</sup>

Table 1 Total amount of the activated uranium migrated into basin from uranium-bearing granite provenance area

地区	大兴安岭 蚀源区	小兴安岭 蚀源区	张广才岭 蚀源区	合计
蚀源区面积/km <sup>2</sup>	19000	9800	14500	
花岗岩占蚀源区面积/%	55%	65	80	
花岗岩剥蚀厚度/m	100	100	100	
花岗岩平均铀含量/ $10^{-6}$	7.4	7.02	5.93	
花岗岩铀浸出率/%	23.42	22.13	22.13	
活化铀总量/ $10^4 \text{ t}$	181	99	152	432

内, 其二级构造单元分别为嫩江阶地、海伦隆起和绥棱背斜带, 其东与小兴安岭相接, 属弱次造山带位置(抬升幅度小). 本区演化历史可划分为 4 个阶段, 分别为热隆张热期(前裂谷期)、伸展断陷期(裂谷期)、沉降凹陷期(后裂谷期)和反转构造期(抬升萎缩期), 其中晚白垩世经历了断陷、凹陷与抬升作用, 是盆地演化的关键时期<sup>[7]</sup>. 古生代变质基底和海西期花岗岩形成以后, 在松辽盆地伸展背景下形成的绥化断陷带, 经营城子末期断陷填平并在“营末运动”作用下抬升, 缺失登娄库组沉积. 断陷期后出现沉积间断, 基底岩石遭受

①聂逢君. 松辽盆地讷河-泰贛地区砂岩型铀矿成矿条件研究 2018 年年报.

风化剥蚀改造,伴有铀的淋滤迁移,利于形成富铀的目的层。拗陷沉积期后,在嫩江运动作用下发生褶皱、抬升,长时期遭受风化剥蚀,使盆地区域局部不同程度地隆升,形成正向地形,形成多个剥蚀天窗,与松辽南部地质特征较为相似。天窗的产出既可以作为白垩纪含水层地下水的补给区,也可以作为它的排泄区,对铀成矿极其有利<sup>[4-5]</sup>。

### 2.3 古气候演化

研究区自早白垩世至第四纪,历经了早白垩世湿温-半干热古气候交替期,晚白垩世干热-湿热-温湿-干热古气候交替期,晚白垩晚期干热、湿热古气候期和古近纪至第四纪暖湿亚热-半湿润古气候期等复杂演化过程<sup>[7]</sup>。本区早白垩至晚白垩世中期的干热-湿热、温湿交替古气候通常有利于地层中铀的预富集或同生沉积成矿;晚白垩世晚期四方台期至古近纪早期的干热、半干旱、湿热古气候环境有利于岩石中铀活化迁移形成含氧含铀地下水及后生氧化作用发生和铀矿成矿。松辽盆地南部钱家店铀矿床的成矿作用主要是发生自晚白垩世姚家组干热、湿热环境下的同生沉积成岩期及晚白垩世四方台期-古近纪早期干热、湿热、半干旱古气候环境期,矿床铀成矿年龄为 $96\pm 14$  Ma和 $40\pm 2$  Ma,与晚白垩世、古近纪干热、湿热古气候演化期一致<sup>[8]</sup>。

### 2.4 白垩系目标层沉积相及砂体发育特征

研究区找矿目标层为泉头组兼顾浅部姚家组,其中泉头组地层顶板埋深自东向西逐渐变深,地层也随之变厚。根据石油钻孔连井剖面可知,泉头组地层在盆地最北端为冲积扇亚相,向南发育河道亚相,其中泉3段砂体厚度最大,湖扩时东西部连通,高位发育也较广泛。厚度均匀,向东西两边减薄,过深部断陷部位后加厚,呈楔状。其低位未连通,发育在乾元构造带以西,厚约80 m,呈宽带状,主要发育河道沉积。其湖扩超覆在低位之上,东西相连,厚度相对均匀,有向西增厚的趋势,厚0~50 m,呈长条状,向南有三角洲远端沉积。其高位发育范围与湖扩类似,在东北海陆隆起带相对较厚,最厚约120 m,主要发育小河道,沉积相河道为主,向南为三角洲前缘沉(图3)。

砂体在东西向连井及地震剖面得以控制(图4、5),最北部主要发育冲积扇亚相,岩性主要为含砾粗砂岩、砂砾岩组成,厚度较大,累计厚度大于100 m;在拜泉地区主要为辫状河(或冲积扇扇面的辫状河河道)砂砾岩、含砾粗砂岩,含砂率较高,可达80%。再向南泉头组砂体明显变细,为灰色细砂岩,曲流河相沉积,沉积碎屑物成熟度较高,砂体粒级较细。单层砂体厚度5~30 m,砂体呈北东向分布,砂体顶部及底部皆为泥岩。

姚家组顶板埋深自东向西亦有逐渐变深趋势,主

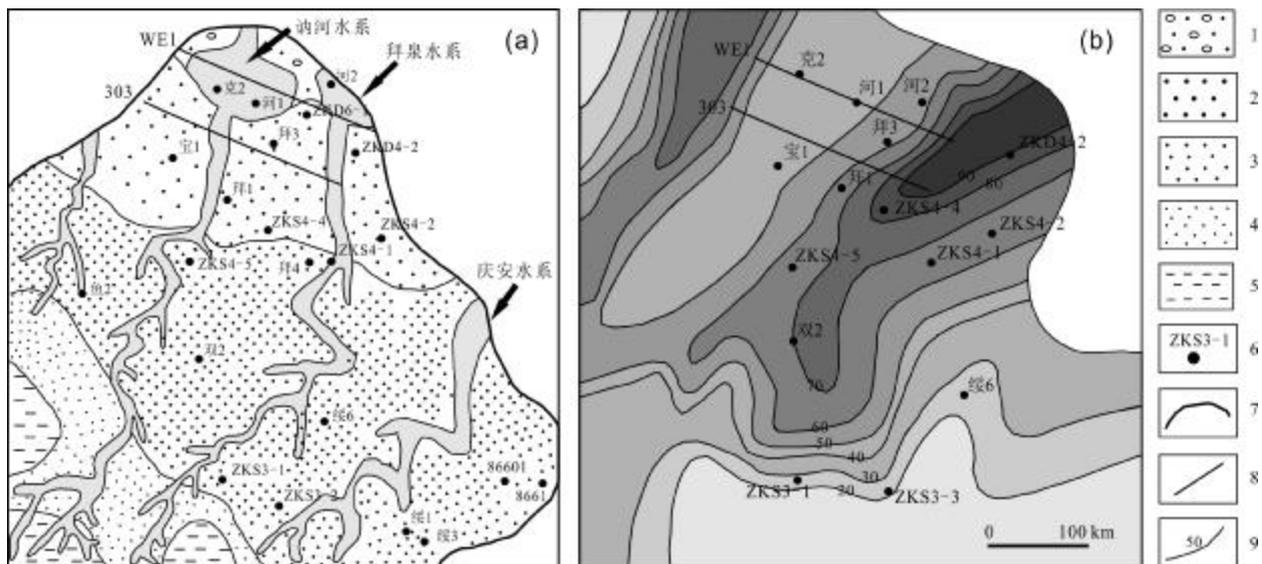


图3 研究区泉头组沉积相图(a)及砂体等厚图(b)

Fig. 3 Sedimentary facies and sand body isopach maps of Quantou Formation in the study area

1—冲积扇亚相(alluvial fan subfacies); 2—辫状河亚相(braided river); 3—曲流河亚相(meandering river); 4—三角洲平原亚相(delta plain); 5—湖泊亚相(lake); 6—钻孔及编号(borehole and number); 7—盆地边缘(basin boundary); 8—剖面位置(profile position); 9—砂体等厚线(sand body isopach)

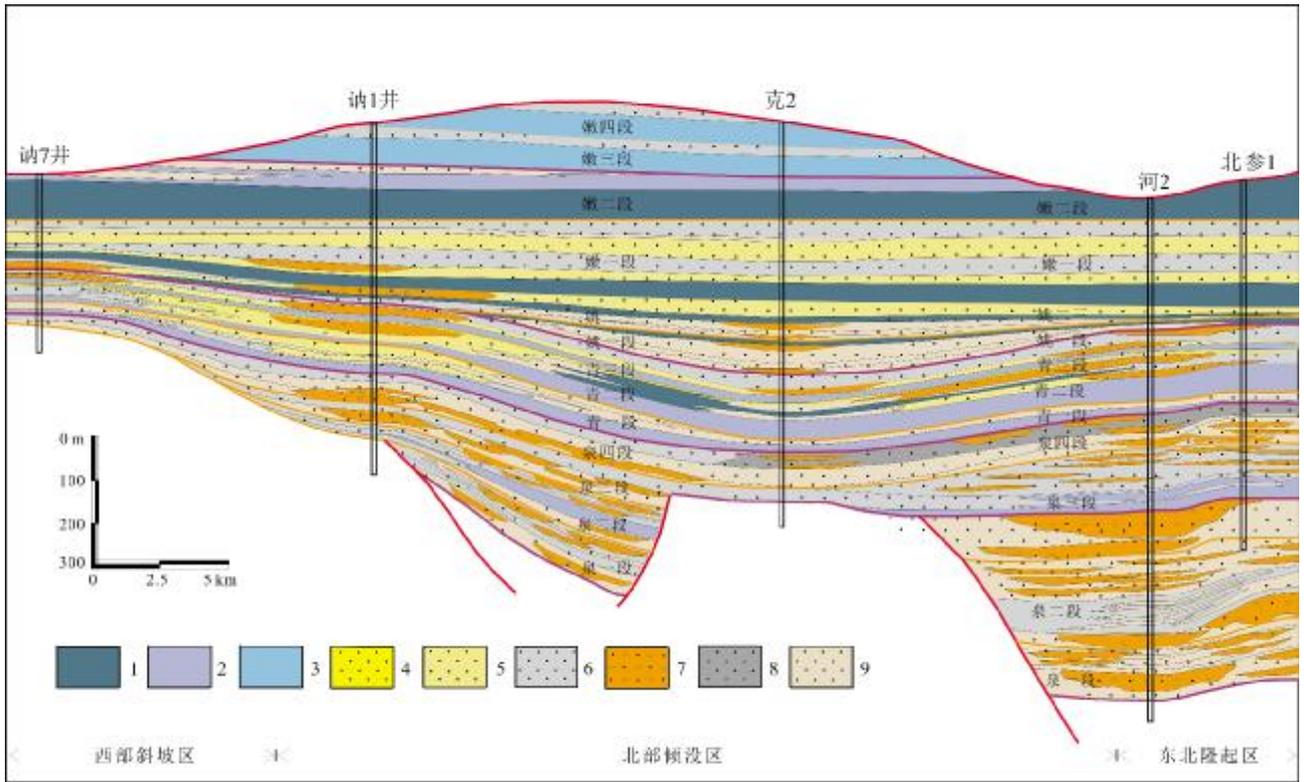


图 4 研究区东西向剖面沉积断面图

Fig. 4 Sedimentary profile of the E-W section of the study area

1—半深湖(half-deep lake); 2—浅湖-半深湖(shallow lake-half-deep lake); 3—滨浅湖(shore shallow lake); 4—三角洲前缘(delta front); 5—三角洲远端(delta distal end); 6—三角洲边缘(delta margin); 7—河道(river channel); 8—河道带(riverway belt); 9—洪泛平原(flood plain)

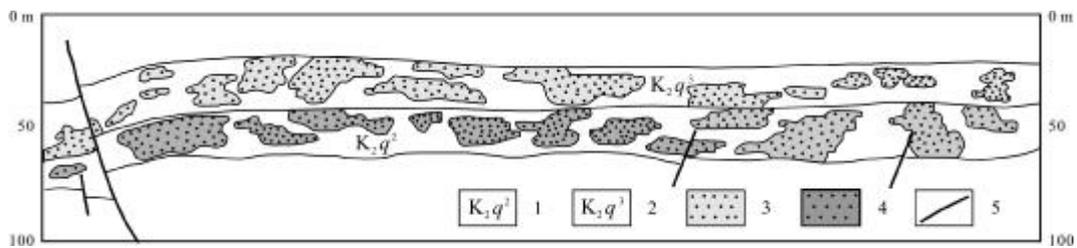


图 5 研究区 303 测线地震剖面综合解释图

Fig. 5 Integrated interpretation map of seismic section along survey line No. 303 in the study area

1—泉头组 2 段(2nd mem. of Quantou fm.); 2—泉头组 3 段(3rd mem. of Quantou fm.); 3—曲流河道(meandering river channel); 4—辫状河道(braided river channel); 5—断层(fault)

要发育河道亚相、三角洲及三角洲前缘相沉积组合(图 6)。其中在海伦—拜泉一带广泛发育河道亚相,南部青冈一带三角洲沉积体系则较为发育,发育水上分流河道及水下分流河道相砂体。河道亚相砂体由灰色、黄色、灰带绿色细砂岩组成,分选较好,砂体疏松,透水性较好,在拜泉县附近砂体最厚,单层厚度最厚达 30 m 以上,累计厚度大于 50 m。砂岩上下发育泥岩隔水层,

具有稳定的泥-砂-泥结构,成矿条件极其有利。

姚家组砂体东西向剖面亦得到控制,根据施工的钻孔显示,姚家组砂体极其发育,埋深为 239~352 m,单层厚度约为 30 m,累计厚度大于 50 m,砂体呈灰色调,为还原砂,砂体疏松,透水性好,上下部覆厚层泥岩,约 30 m,具备砂岩型铀矿成矿的有利条件。

通过以上分析可以看出,在绥棱地区找矿目的层

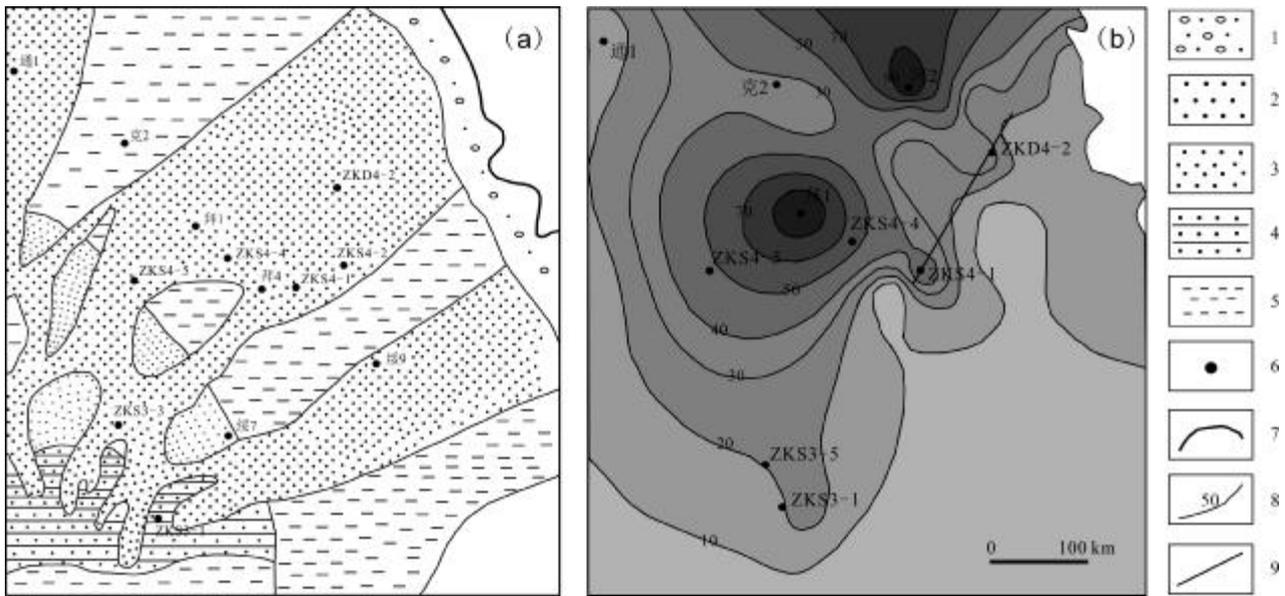


图6 研究区姚家组沉积相图(a)及砂体等厚图(b)

Fig. 6 Sedimentary facies and sand body isopach maps of Yaojia Formation in the study area

1—冲积扇亚相 (alluvial fan); 2—辫状河亚相 (braided river); 3—曲流河亚相 (meandering river); 4—三角洲平原亚相 (delta plain); 5—湖泊亚相 (lake); 6—钻孔及编号 (borehole and number); 7—盆地边缘 (basin boundary); 8—砂体等厚线 (sand body isopach); 9—剖面位置 (profile position)

泉头组和姚家组内均发育较好砂体,砂体受沉积相带控制明显,受控于北部古拜泉水系,大致呈北东向展布,长约120 km,宽度大于50 km,且上下均见有泥岩隔水层,具有良好的泥-砂-泥互层的地层结构.另根据岩心观察,在砂岩中普遍发育有机质、黄铁矿等还原介质,含量相对较高,还原能力较强.

### 2.5 氧化带发育特征

砂体中的氧化作用主要发育于研究区北部地区,发育层位主要为泉头组及浅部姚家组,剥蚀天窗及断裂是地下水的主要排泄通道.钻孔资料显示,泉头组及姚家组均存在厚层砂体,岩性以粗砂—细砂为主,厚度30~60 m.从目前施工的钻孔来看,研究区北部氧化砂体较为发育,为黄色为主的中细砂岩;南部则为灰色细砂岩,薄层灰色夹层中发育碳屑及黄铁矿.说明泉头组及姚家组砂体原生还原容量较高,层间氧化作用发育较为连续(图7).由于工作程度较低,氧化带长度并未得到控制.

### 2.6 铀矿化控制因素

综合以上分析可知,研究区铀矿化主要为砂岩型铀矿化,且主要发育于上白垩统河道相砂体中,其主要控制因素如下.

(1)构造演化及剥蚀天窗控矿.松辽盆地在白垩纪先后经历了断陷、凹陷及反转构造期,尤其是研究区所在的盆地东部边缘,是构造最为强烈的地区.区域性的构造抬升使得主要找矿目标层位多次暴露地表,形成多个剥蚀天窗并接受后生化改造,是该地区砂岩型铀矿发育的重要控制因素.这种地质特征与松辽南部已经发现的钱家店矿床的地质特征较为相似.

(2)古气候演化对砂岩型铀矿的发育和含矿建造本身地球化学环境及后期地球化学环境的演化有着非常严格的要求,古气候的演化控制着含矿建造发育及其后期改造过程中的地球化学环境.该地区含矿建造发育时期,在潮湿、半潮湿古气候环境下发育了灰色碎屑岩建造,其中富含有机质、炭屑及黄铁矿等还原物质,为后期铀矿化的沉淀富集提供了丰富的还原物质,有利于铀矿化的发育.含矿建造改造期,干旱古气候环境有利于蚀源区铀元素的活化迁移,来自于富铀岩体的含氧承压水携带大量的铀元素进入还原环境的灰色建造中,发生氧化还原反应,铀元素被还原并沉淀富集.随着含铀含氧承压水的持续渗入,铀元素随着氧化还原过渡带逐步向盆地内部迁移,铀元素不断得到富集并形成矿体<sup>[9-10]</sup>.

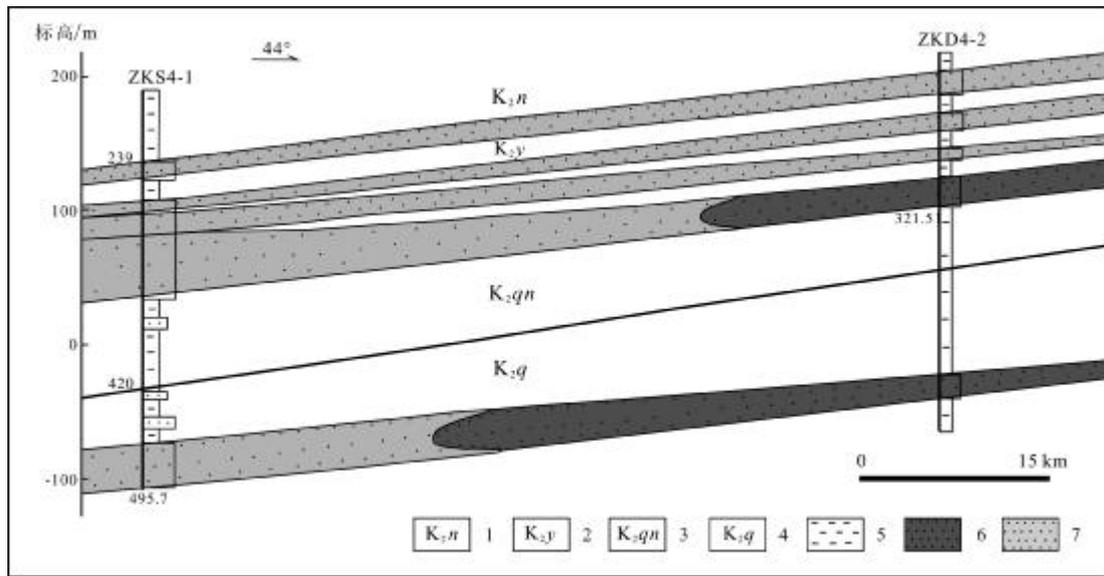


图7 ZKS4-1、ZKD4-2 钻孔剖面图

Fig. 7 Profile of boreholes ZKS4-1 and ZKD4-2

1—嫩江组(Nenjiang fm.); 2—姚家组(Yaojia fm.); 3—青山口组(Qingshankou fm.); 4—泉头组(Quantou fm.); 5—泥岩(mudstone); 6—氧化砂(oxidized sand); 7—还原砂(reduced sand)

(3)岩性-岩相组合的控制作用. 研究区泉头组的河道相砂体较为发育, 其上部青山口组二段洪泛泥岩为顶板隔水层, 底板隔水层为花岗岩、火山岩等相对隔水的基底岩石, 具有良好的泥-砂-泥结构, 有利于承压水的渗入. 其次, 河道砂体在横向上具有较好的连通性, 渗透性较好, 有利于承压水的通过, 为砂岩型铀矿的形成创造了天然条件. 姚家组底板隔水层主要为青山口组、泉头组泥岩, 以及花岗岩、火山岩等相对隔水的基底岩石, 其顶板隔水层为厚 5~25 m 的洪泛泥岩, 以及广布全区的嫩江组二段厚层泥岩, 从而形成了稳定的顶、底板隔水层, 为姚家组层间氧化带的发育提供了相对封闭的空间. 此外, 地层总体由东北隆起区向盆地沉积中心呈缓倾角变深, 又为层间氧化的持续进行提供了有利的水动力条件.

### 3 铀找矿方向讨论

找矿工作应以层间氧化砂岩型为主, 主要找矿目的层为白垩纪泉头组及浅部姚家组地层. 主要依据包括: 1) 泉头组及姚家组底部砂体发育, 岩心中可见丰富的还原物质, 还原能力强, 有利于铀元素的沉淀富集; 2) 泉头组及姚家组砂体为河道相砂体, 多为中-细

砂岩, 横向上具备良好的连通性, 纵向上与上、下地层能够组成良好的泥-砂-泥结构, 有利于承压水的稳定渗入及层间氧化作用的发育; 3) 泉头组及姚家组砂体形成后多次遭受抬升、剥蚀, 并发生掀斜, 为后生层间氧化作用的发育提供了良好的条件; 4) 砂岩型铀矿化的发育与古水动力条件密切相关, 研究区位于盆地边缘, 断裂发育, 剥蚀强烈, 天窗发育, 长期发育自北向南宽缓的拜泉水系, 有利于河道相砂体长期接受来自盆缘富铀岩体的地下水改造及层间氧化作用发育, 是研究区内最有利的砂岩型铀矿找矿部位.

### 4 结论

(1) 研究区内具备较好砂岩型铀矿成矿所需的铀源、构造演化、古气候条件及后生氧化改造条件, 具有较大的砂岩型铀矿找矿潜力.

(2) 研究区主要找矿层位为上白垩统泉头组和姚家组地层. 上白垩统泉头组及姚家组中广泛发育河道相砂体, 且垂向上具备良好的泥-砂-泥地层结构, 有利于承压水的稳定渗入及层间氧化作用的发育. 砂体中富含有机质、炭屑及黄铁矿等还原物质, 为铀元素的还原沉淀提供了丰富的还原物质.

(下转第 560 页 / Continued on Page 560)

## 参考文献:

- [1]余一欣,周心怀,彭文绪,等.盐构造研究进展述评[J].大地构造与成矿学,2011,35(2):169-182.
- [2]杨玉卿,张永生,漆智先,等.盐湖沉积的韵律性及成盐韵律类型——以潜江凹陷潜江组古盐湖沉积为例[C]//2001年全国沉积学大会摘要论文集.2001:512.
- [3]吴娟,叶加仁,康建云,等.潜江凹陷北部潜江组油气分布不均一性及控制因素[J].地质科技情报,2012,31(6):141-146.
- [4]方志雄.潜江凹陷隐蔽油藏成藏主控因素及勘探方向[J].石油与天然气地质,2006,27(6):804-812.
- [5]张广英,陈凤玲.潭口地区潜江组地层对比与油气勘探有利地带[J].江汉石油职工大学学报,2007,20(2):35-38.
- [6]王国力,杨玉卿,张永生,等.江汉盆地潜江凹陷王场地区古近系潜江组沉积微相及其演变[J].古地理学报,2004,6(2):140-150.
- [7]费安国.钟潭地区高陡构造油藏提高开发效果技术探讨[J].江汉石油职工大学学报,2017,30(5):37-39.
- [8]詹治萍,杨香华,潘知峰,等.江汉盆地潜江凹陷潜三段古地貌与砂体成因分析[J].古地理学报,2009,11(4):405-412.
- [9]方志雄,陈开远,杨香华,等.潜江盐湖盆地层序地层特征[J].盐湖研究,2003,11(2):14-23.
- [10]张永生,杨玉卿,漆智先,等.江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组含盐岩系沉积特征与沉积环境[J].古地理学报,2003,5(1):29-34.
- [11]柏建新,石万忠,何勇.潜江凹陷潜北地区潜四下段盐湖层序控制因素及层序模式[J].中国石油勘探,2014,19(1):22-30.
- [12]高楠安.江汉盆地江陵凹陷盐构造类型及成因机制探讨[J].石油地质与工程,2013,27(2):9-11.
- [13]汤良杰,黄太柱,邱海峻,等.塔里木盆地中央隆起带中、西段及邻区中、下寒武统盐相关构造及其变形机理[J].中国科学:地球科学,2013,43(1):33-43.
- [14]崔永刚,樊涛,孙昶旭,等.盐构造发育对沉积地层的影响——以东营凹陷中央隆起带郝现构造为例[J].新疆石油地质,2006,27(6):696-698.
- [15]李忠平.盐湖盆地相控砂体预测技术研究——以江汉盆地潜江凹陷为例[D].武汉:中国地质大学,2013.
- [16]康海霞.潜江凹陷潜江组剥蚀恢复与沉积体系研究[D].北京:中国地质大学,2009.
- [17]范传军.江汉盐湖盆地潜江组沉积控制因素与岩性油藏[J].江汉石油职工大学学报,2006,19(6):25-28.
- [18]汤良杰,余一欣,陈书平,等.含油气盆地盐构造研究进展[J].地学前缘,2005,12(4):375-383.
- [19]戈红星, Jackson M P A.盐构造与油气圈闭及其综合利用[J].南京大学学报,1996,32(4):640-649.
- [20]杨长清.江陵凹陷盐构造及与油气聚集的关系[J].断块油气田,2004,11(3):4-6.

(上接第 525 页 /Continued from Page 525)

## 参考文献:

- [1]张金带,李子颖,徐高中,等.我国铀矿勘查的重大进展和突破[M].北京:地质出版社,2015:210-232.
- [2]宋鹰.松辽盆地裂后期构造反转及其动力学背景分析[D].武汉:中国地质大学,2010:1-137.
- [3]孙永河,白鹿,付晓飞.松辽盆地北部 T2 反射层断裂密集带成因机制[J].地球科学——中国地质大学学报,2013,38(4):797-806.
- [4]赵忠华,白景萍,赖天功.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,2018,34(5):274-279.
- [5]赵忠华,赖天功.松辽盆地北部放射性异常产出特征及控制因素分析[J].世界核地质科学,2018,35(1):1-7.
- [6]罗梅,赵杰.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,2002,18(6):328-334.
- [7]荣辉,焦养泉,吴立群,等.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——中国地质大学学报,2016,41(1):153-166.
- [8]焦养泉,吴立群,荣辉.砂岩型铀矿的双重还原介质模型及其联合控矿机理:兼论大营和钱家店铀矿床[J].地球科学,2018,43(2):459-474.
- [9]叶德燎.松辽盆地东南隆起区下白垩统层序地层格架及油气成藏规律[J].地质科学,2005,40(2):227-236.
- [10]何中波,秦明宽,宋继叶,等.准噶尔盆地东北部侏罗系砂岩型铀矿成矿环境与找矿方向探讨[J].矿床地质,2018,37(1):175-190.