



## 松辽盆地泰康地区四方台组铀成矿条件分析

刘晓辉, 罗 敏

核工业 240 研究所, 辽宁 沈阳 110000

**摘 要:** 通过对泰康地区的铀源条件、构造条件、含矿建造地质特征以及氧化-还原条件等方面进行研究, 综合分析了泰康地区四方台组砂岩型铀矿的成矿条件, 认为盆地西部和北部的富铀岩体为其提供丰富的铀源, 四方台组具有成矿所必需的泥-砂-泥结构, 良好的补-径-排水文体系以及良好的氧化-还原条件. 四方台组底部砂体中获得铀工业孔和铀矿化孔, 显示出泰康地区四方台组在砂岩型铀成矿勘探方面具有较好的前景, 找矿类型为层间氧化带型.

**关键词:** 四方台组; 成矿条件; 砂岩型铀矿; 泰康地区; 松辽盆地

## ANALYSIS ON THE URANIUM METALLOGENIC CONDITIONS OF SIFANGTAI FORMATION IN TAIKANG AREA, SONGLIAO BASIN

LIU Xiao-hui, LUO Min

No. 240 Institute of CNNC, Shenyang 110000, China

**Abstract:** Through the study of uranium source condition, tectonic setting, geological characteristics of ore-bearing formation and oxidation-reduction condition in Taikang area, the paper analyzes the metallogenic conditions of sandstone uranium deposit in Sifangtai Formation. It is considered that the uranium-rich rocks in the west and north of Songliao Basin provide abundant uranium source. The Sifangtai Formation necessarily has a mud-sand-mud structure, a good recharge-runoff-discharge system and oxidation-reduction condition for mineralization. The uranium industrial holes and mineralized holes are obtained in the sand body at the bottom of Sifangtai Formation, indicating a good prospect in mineralization and exploration of sandstone uranium with the prospecting type of interlayer oxidation zone.

**Key words:** Sifangtai Formation; metallogenic condition; sandstone uranium deposit; Taikang area; Songliao Basin

松辽盆地是一个呈北北东向展布的大型沉积盆地, 具有多沉积旋回特征的的中新生代断拗盆地, 是我国重要的石油、煤炭、天然气及铀的共生建造盆地. 相比于松辽盆地南部的找矿成果, 松辽盆地北部成矿地质条件与成矿远景研究成果相对较少. 尤其是泰康地

区, 工作程度较低, 仅石油部门对姚家组、青山口组等地层做过钻探工作, 对于四方台组地层的成矿条件分析还尚显薄弱. 因此, 笔者以层间氧化带型成矿理论为指导, 借鉴前人研究成果, 对泰康地区四方台组铀成矿环境进行深入研究, 探讨其砂岩型铀矿的成矿条件

收稿日期: 2020-05-15; 修回日期: 2020-09-09. 编辑: 李兰英.

基金项目: 中国核工业地质局“松辽盆地北部新区目的层砂体特征研究与铀成矿预测”项目(编号 202024-5).

作者简介: 刘晓辉(1990—), 男, 工程师, 主要从事资源勘查工程(固体方向)研究, 通信地址 辽宁省沈阳市沈北新区孝信街 12 号核工业二四〇研究所 711 室, E-mail//840651425@qq.com

及找矿方向.

## 1 区域地质概况

松辽盆地是在松辽微板块基础上发展起来的中新生代大型盆地,盆地基底经历了前古生代微板块聚合、古生代的增生拼贴,于晚古生代海西运动末期与欧亚大陆联成一体,形成了完整的大陆地壳.其具有克拉通内盆地的基本特征,属于新克拉通内断拗转化型盆地<sup>[1-3]</sup>.根据盖层发育和构造演化等方面的特征,松辽盆地拗陷层划分为 6 个一级构造单元和 32 个二级构造单元.泰康地区主要隶属于西部斜坡区,主体为西部超覆带和泰康隆起带,东南少部分区域隶属于中央凹陷区的龙虎泡凹陷、齐家古龙凹陷以及北部倾没区的乌裕尔凹陷(图 1),行政区划位于杜蒙县.

泰康地区位于盆地西部,距离西部蚀源区较近,主要发育北东向构造,基底主要为早古生代—中石炭世浅变质岩系、印支—燕山早期花岗岩组成,地层层序完整<sup>[4-5]</sup>.找矿目的层为四方台组,含水岩性主要为灰色中砂岩、灰色细砂岩,分选好,疏松,透水性较好.第四系一般厚度为 50~80 m,主要为灰黄色松散沙及腐殖土.

## 2 含矿建造地质特征

### 2.1 沉积相特征

泰康地区四方台组顶板埋深 220~600 m,自西向东埋深逐渐增大,在东部埋深超过 700 m(图 2a).盆地东部四方台组大多数被剥蚀或无沉积<sup>[6]</sup>,四方台组厚度自西向东由 28 至 48 m,逐渐增厚,平均厚度约 35 m,最厚处位于泰康地区东南部位(图 2b).

根据 ZKQ1、ZKQ2 号钻孔岩性及沉积微相图(图 3)可知,泰康地区四方台组垂向上主要为曲流河三角洲相—滨浅湖相的沉积序列.平面上,四方台组主要发育三角洲平原相、三角洲前缘相和滨浅湖相(图 4).四方台时期沉积中心逐步西移到江湾一带,形成南北向分布的浅湖,主要物源是北部讷河水系与拜泉水系,在杜蒙县一带汇聚入湖,次要物源为盆地西部的泰康水系,规模较小.

泰康地区四方台组沉积早期主要发育相对干旱气候条件下的泛滥平原相,为氧化环境下形成的褐红色碎屑物沉积<sup>[7-8]</sup>,底部见含砾砂岩、泥砾组成的河道

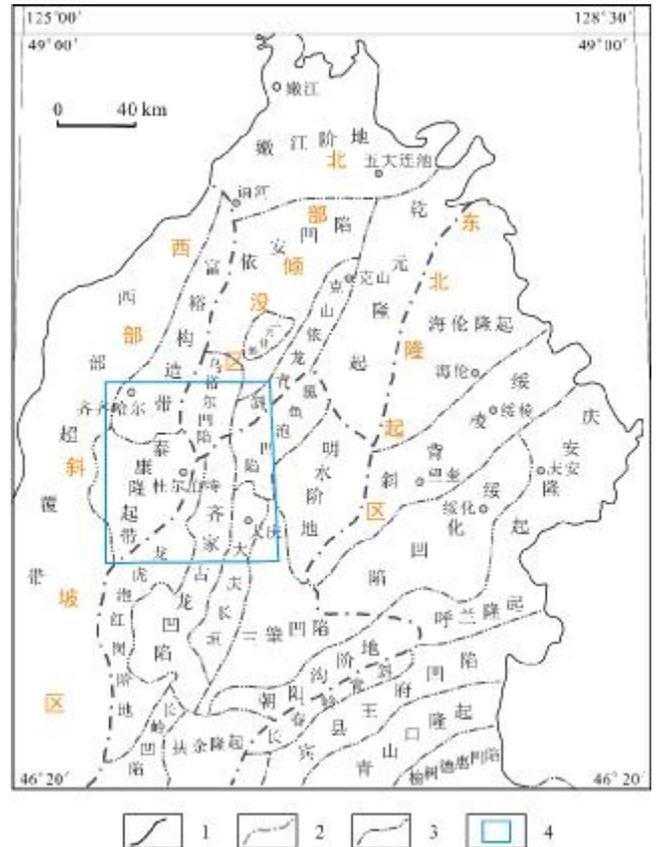


图 1 松辽盆地北部构造单元划分图

Fig. 1 Tectonic division map 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—研究区范围 (study area)

滞留沉积.四方台组沉积晚期粒度逐渐变细,河道砂体逐渐转变为河道与泛滥盆地泥质沉积互层.四方台组早期主要是湖进的特征,湖面进一步扩大,晚期主要为泛滥平原的褐红色泥质细粒沉积<sup>[9]</sup>.

### 2.2 含矿砂体特征

从四方台组沉积相剖面图(图 5)上可以看出,四方台组主要发育一层砂体,它位于四方台组底部,砂体较薄,为三角洲平原分流河道砂体.岩性主要为灰色细砂岩,碎屑物成分主要为石英和长石,见少量岩屑,砂岩成分成熟度和结构成熟度中等偏低.

## 3 成矿条件分析

### 3.1 铀源条件

西部斜坡区主要物质来源为西部蚀源区大兴安岭、北部蚀源区小兴安岭,蚀源区发育大面积的中生代火山岩,海西期及燕山期花岗岩等,存在较多的地

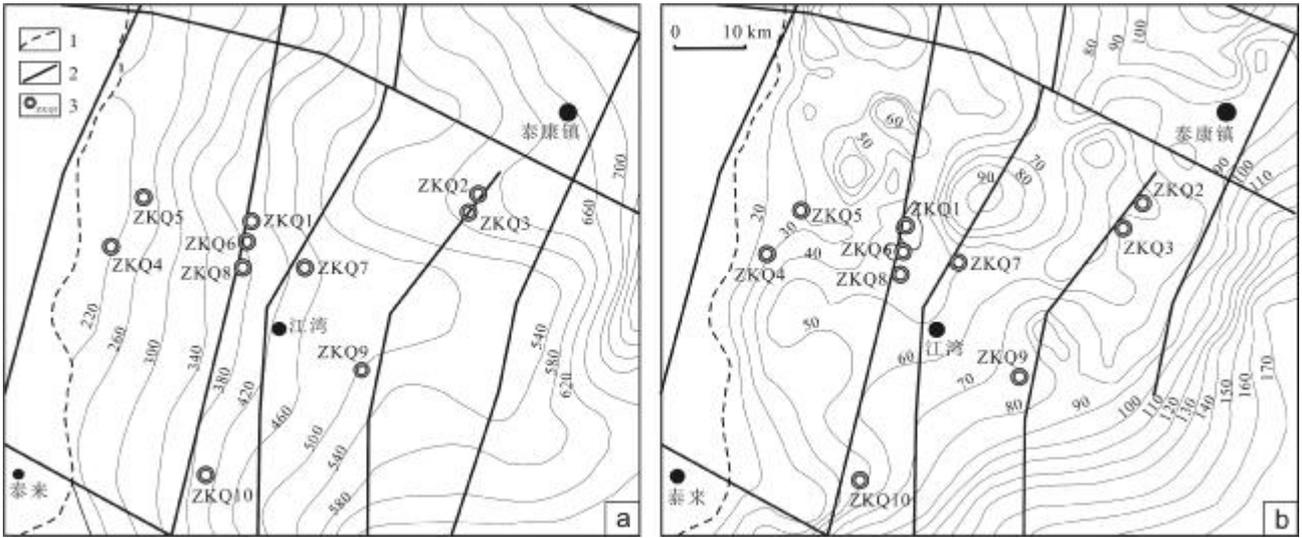


图2 四方台组地层埋深及厚度图

Fig. 2 Buried depth and thickness of Sifangtai Formation

a—顶板等深线图(depth contour of roof); b—等厚线图(isopach); 1—四方台组剥蚀边界(erosion boundary of Sifangtai fm.); 2—断裂(fault); 3—钻孔(borehole)

ZKQ1	自然电位	岩性剖面	岩性	微相	沉积相	ZKQ2	自然电位	岩性剖面	岩性	微相	沉积相		
四方台组	[Natural potential curve for ZKQ1]	[Lithology profile for ZKQ1]	泥岩	洪泛平原	河道相	四方台组	[Natural potential curve for ZKQ2]	[Lithology profile for ZKQ2]	泥岩	洪泛平原相	河道相	三角洲相	
			泥质细砂岩、粉砂岩	河道					细砂岩、粉砂岩	河道			
			泥岩	泥坪	滨浅湖相				泥岩	泥坪	泥岩		泥坪
			细砂岩、泥质细砂岩夹薄层泥岩	沙坪					细砂岩夹薄层粉砂岩	沙坪			
			泥岩	泥坪					泥岩	泥坪			
			细砂岩、泥质细砂岩	沙坪					泥岩	泥坪			
嫩江组	[Natural potential curve for ZKQ1]	[Lithology profile for ZKQ1]	中砂岩、细砂岩	沙坝	滨浅湖相	嫩江组	[Natural potential curve for ZKQ2]	[Lithology profile for ZKQ2]	中砂岩、细砂岩、粉砂岩	沙坝	滨浅湖相		
			泥岩夹薄层中砂岩	泥坪					泥岩夹薄层粉砂岩	泥坪			

图3 ZKQ1、ZKQ2 单孔沉积相分析图

Fig. 3 Sedimentary facies of boreholes ZKQ1 and ZKQ2

面轴异常点、带, 轴活化迁移明显<sup>[10-11]</sup>. 据统计西部蚀源区的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  $2.25 \times 10^{-6} \sim 22.30 \times 10^{-6}$ , 燕山期的花岗岩铀质量分数为  $3.40 \times 10^{-6} \sim 13.05 \times 10^{-6}$ . 北部蚀源区岩体铀质量分数值相对较低, 平均值为  $3.05 \times 10^{-6} \sim 10.6 \times 10^{-6}$ , 盆地北部蚀源区汇入盆地的活化铀总量较大, 表明盆地西部地区铀源丰富.

### 3.2 构造条件

泰康地区演化主要经历了断陷、拗陷以及构造反转3个构造演化阶段. 断陷发育期主要形成了以湖相、湖沼相为主的沉积系, 富含还原流体, 为铀成矿提供了良好的后生还原改造条件. 地层产状平稳, 倾斜角度约为  $2^\circ$ , 为含铀含氧水的流动提供了有利条件<sup>[12-14]</sup>. 大庆长垣在明水组末期—明水组沉积时期发生强烈的构造反转作用, 隆起区长时间剥蚀, 致使四方台组出露

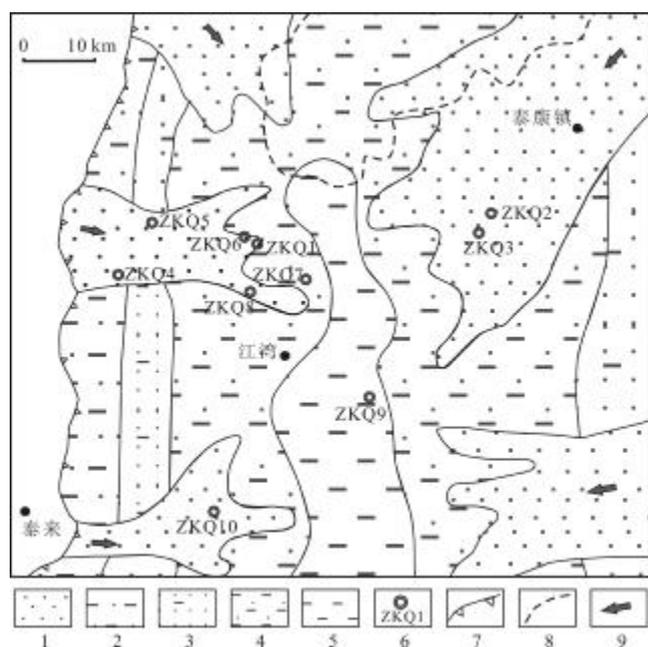


图4 泰康地区四方台组沉积相图

Fig. 4 Sedimentary facies of Sifangtai Formation in Taikang area  
 1—河道、分流河道 (river and distributary channel); 2—泛滥平原 (floodplain); 3—三角洲平原亚相(delta plain subfacies); 4—三角洲前缘亚相(delta front subfacies); 5—滨浅湖(shore-shallow lake); 6—钻孔及编号(borehole and number); 7—剥蚀边界(erosion boundary); 8—保护区范围(conservation area); 9—物源方向(source direction)

地表,形成构造天窗.含氧的大气降水通过天窗渗入四方台组地层中,形成有利于铀聚集的氧化-还原带.泰康地区部分铀异常分布于断裂附近,ZKQ1 铀工业孔岩心中见到明显的油浸现象,推测为油气等还原介质沿断裂上移,将氧化铀还原富集的结果.

本地段基底断裂较发育,部分基底断裂在明水末期仍然活动,可作为四方台组含铀含氧水排泄通道,对铀成矿极其有利.

### 3.3 古气候演化

松辽盆地白垩纪—第四纪经历了多期次的温湿、干热、半干旱、湿润古气候交替演化变迁过程.晚白垩世四方台组—明水组总体上为一套红色粉砂质泥岩、含钙质结核红色泥质砂岩夹灰色砂岩、灰绿色泥质粉砂岩,地层中孢粉主要为喜热、喜干、喜温孢粉组合,反映了干热温湿交替古气候环境.干热古气候对铀具有浓缩作用,干热—湿热过渡性古气候环境有利于铀的预富集<sup>[15]</sup>.

### 3.4 氧化-还原条件

四方台组砂体中的氧化作用主要发育于泰康地区

北部和西部地区,主要位于四方台组底部砂体中.通过岩心观察可知,泰康地区西部氧化砂体较为发育,岩性主要为黄色含砾中砂岩、含砾细砂岩、中细砂岩,东部为灰色细砂岩,发育炭屑及黄铁矿,见到大量油浸现象.泰康地区姚家组和青山口组地层中存在多个油气田,油气等还原介质沿盖层断裂向上运移至四方台组,储存在四方台组底部砂体中,为成矿提供了它生还原剂,油气提高了砂体的还原容量<sup>[16-19]</sup>.ZKQ1 工业孔与ZKQ2 矿化孔的矿化段见油浸、炭屑及星点状黄铁矿,显示出油气是该地区重要的还原剂,与铀成矿关系密切.泰康地区四方台组发育层间氧化作用,由于工作程度较低,氧化带长度并未得到控制(图6).

### 3.5 水文条件

泰康地区钻孔中含水层一般1~2层,含水层单层厚度6~25 m,累计厚度达6.50~30.00 m.地下水以层间水为主,多具承压性,富水性、渗透性均好.盆地西部发育大量火成岩,岩石中含铀量高,是地下水的补给区.四方台组目的层顶板隔水层为明水组以及四方台组稳定的洪泛泥岩,底板隔水层为嫩江组二段泥岩,使四方台组形成了稳定的泥-砂-泥地层结构.盖层构造沟通了上下含水层的水力联系<sup>[20]</sup>.地下水在地表形成沼泽、湿地及湖泊等排泄区.泰康地区最大的排泄湖为连环湖.

### 3.6 铀矿化控制因素

综上所述,泰康地区砂岩型铀矿化主要发育于四方台组底部砂体中,其主要控制因素如下.

(1)构造演化控矿:盆地沉积盖层分为断陷层、拗陷层和萎缩层3个沉积构造层,其断裂系统分为张裂-断陷期、拗陷期和萎缩期(褶皱期)断裂.铀矿化主要发育在盆地的拗陷-萎缩层.早期整体伸展拉张—中晚期的挤压萎缩—末期构造趋于平稳的地质背景,对砂岩型铀成矿极为有利.

(2)岩性-岩相组合的控制作用:四方台组主要发育三角洲平原、三角洲前缘相水下分流河道砂体,其上部明水组洪泛泥岩为顶板隔水层,底板隔水层为嫩江组二段厚层泥岩,使四方台组形成良好的“泥-砂-泥”地层结构,有利于承压水的渗入.四方台组砂体疏松,呈孔隙式胶结,渗透性较好.此外,泰康地区地层总体由西向东呈缓倾角变深,为层间氧化的持续进行提供了有利的水动力条件<sup>[21]</sup>.

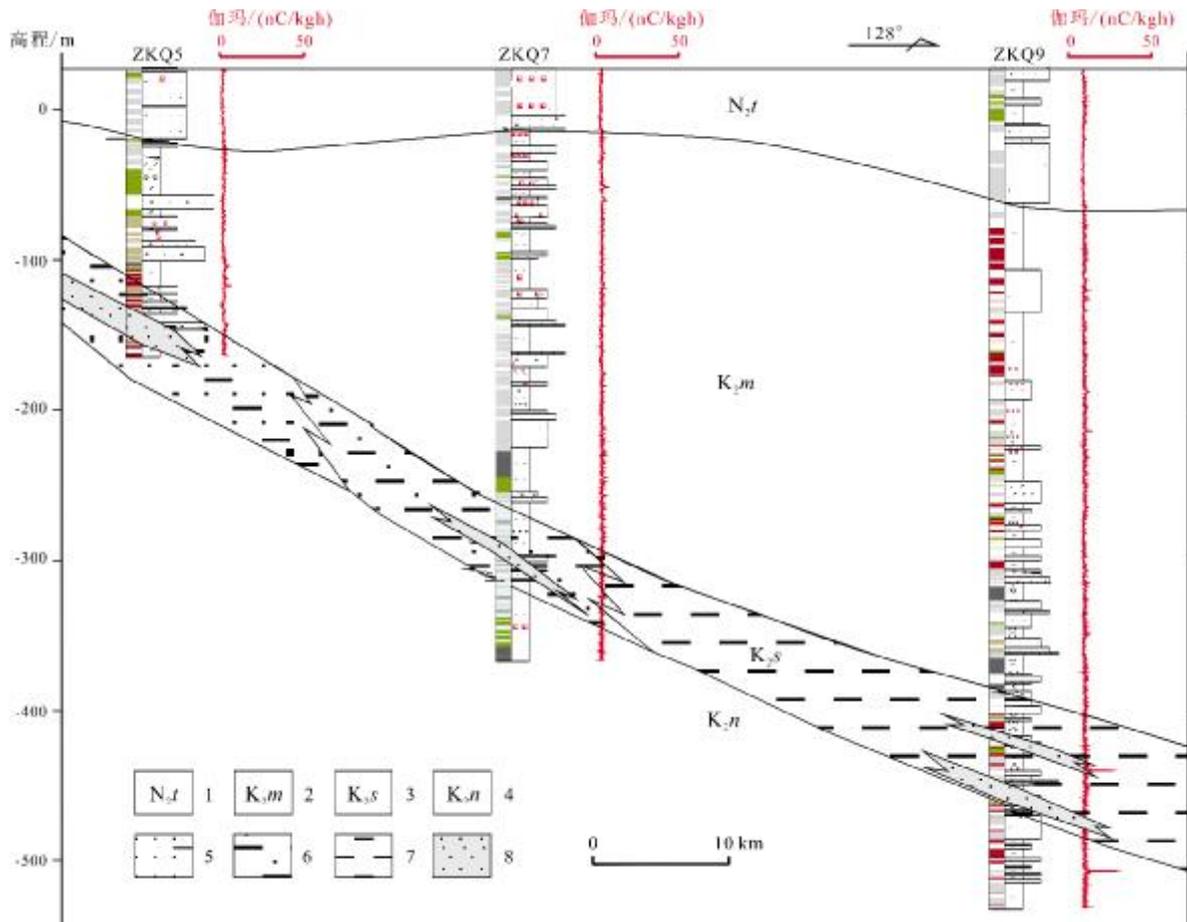


图 5 ZKQ5—ZKQ9 四方台组沉积相剖面分析略图

Fig. 5 Profiles from boreholes ZKQ5 to ZKQ9 showing the sedimentary facies of Sifantai Formation

1—泰康组 (Taikang fm.); 2—明水组 (Mingshui fm.); 3—四方台组 (Sifantai fm.); 4—嫩江组 (Nenjiang fm.); 5—三角洲平原亚相 (delta plain subfacies); 6—三角洲前缘亚相 (delta front subfacies); 7—湖泊相 (lacustrine facies); 8—分流河道 (distributary channel)

### 4 结论

(1)泰康地区具有较好砂岩型铀矿成矿所需的构造条件、铀源条件、有利的砂体条件及后生化改造条件,具有较大的砂岩型铀矿找矿潜力。

(2)四方台组中发育三角洲前缘水下分流河道砂体,垂向上具备良好的“泥-砂-泥”地层结构.来自铀源区丰富的含铀含氧水,在砂体中径流,在连环湖一带排泄,补-径-排机制完善.砂体中富含还原介质,下部油气沿断裂或不整合面运移进入砂体,增强了砂体还原能力,为铀元素的还原沉淀提供了丰富的还原物质<sup>[14-15]</sup>,新发现的铀工业矿体与油气关系密切。

(3)四方台组地层埋深适中,地层倾角较缓,有利于层间氧化的持续进行,并且在氧化-还原过渡带位置发现铀工业矿体.所以,松辽盆地泰康地区四方台组的层间氧化型铀矿具有一定的找矿前景。

### 参考文献 (References):

[1]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.  
Song Y. The post-rift tectonic inversion of Songliao Basin, NE China and its dynamic background [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2010: 1-137.

[2]焦养泉, 吴立群, 彭云彪, 等. 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, 2015, 22 (1): 189-205.  
Jiao Y Q, Wu L Q, Peng Y B, et al. Sedimentary-tectonic setting of the deposition-type uranium deposits forming in the Paleo-Asian tectonic domain, North China[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22 (1): 189-205.

[3]王丹丹, 赵松, 张文浩, 等. 松辽盆地外围通化地区高精度重磁电特征及其构造格架[J]. 中国地质, 2020, 47(4): 1056-1068.  
Wang D D, Zhao S, Zhang W H, et al. Lithofacies identification and

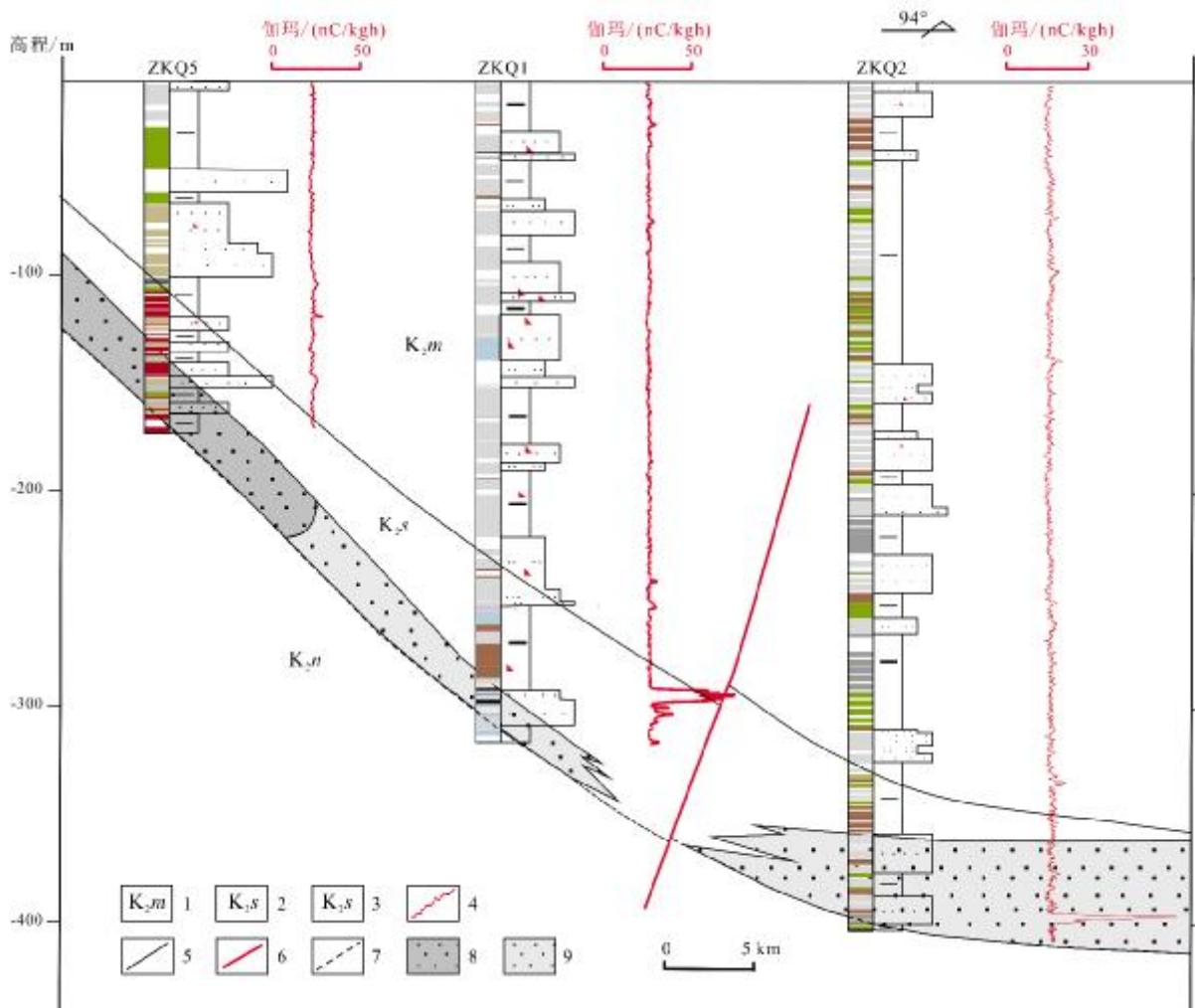


图 6 泰康地区 ZKQ5—ZKQ2 剖面图

Fig. 6 Profiles from boreholes ZKQ5 to ZKQ2 in Taikang area

1—明水组(Mingshui fm.); 2—四方台组(Sifangtai fm.); 3—嫩江组(Nenjiang fm.); 4—伽玛曲线( $\gamma$  curve); 5—不整合接触(unconformable contact); 6—断裂(fault); 7—整合接触(conformable contact); 8—氧化砂体(oxidized sandbody); 9—还原砂体(reduced sandbody)

deep structure of Tonghua area in the periphery of Songliao Basin based on high-precision gravity-magnetic electrical survey[J]. *Geology in China*, 2020, 47(4): 1056–1068.

[4]朱筱敏, 康安, 王贵文. 陆相拗陷型和断陷型湖盆层序地层样式探讨[J]. *沉积学报*, 2003, 21(2): 283–287.

Zhu X M, Kang A, Wang G W. Sequence stratigraphic models of depression and faulted-down lake basins [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(2): 283–287.

[5]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.

Ye D L. Lower cretaceous sequence stratigraphic framework and hydrocarbon accumulation in the Southeast Rise, Songliao Basin, China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2005, 40(2): 227–236.

[6]张振强, 桑吉盛, 金成洙. 松辽盆地东南隆起区反转构造对砂岩型铀成矿的作用[J]. *铀矿地质*, 2006, 22(3): 151–156, 181.

Zhang Z Q, Sang J S, Jin C Z. Inversion structure and its contribution to sandstone uranium metallogenesis in southeast uplifted domain of Songliao basin[J]. *Uranium Geology*, 2006, 22(3): 151–156, 181.

[7]张雷, 王英民, 李树青, 等. 松辽盆地北部四方台组—明水组高精度层序地层特征与有利区带预测[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2009, 40(6): 1679–1688.

Zhang L, Wang Y M, Li S Q, et al. High-resolution sequence stratigraphic characteristic and favorable hydrocarbon accumulation prediction of Sifangtai to Mingshui formation in the north of Songliao Basin[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2009, 40(6): 1679–1688.

[8]程日辉, 王国栋, 王璞珺, 等. 松科 1 井北孔四方台组—明水组沉积微相及其沉积环境演化[J]. *地学前缘*, 2009, 16(6): 85–95.

Cheng R H, Wang G D, Wang P J, et al. Sedimentary microfacies and sedimentary environment evolution of Sifangtai Formation and

- Mingshui Formation in SK- I (n)[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(6): 85-95.
- [9] 万涛, 刘招君, 胡菲, 等. 松辽盆地北部上白垩统四方台组河流相层序沉积特征[J]. *大庆石油地质与开发*, 2018, 37(5): 1-7.  
Wan T, Liu Z J, Hu F, et al. Sedimentary characteristics of the fluvial sequence of upper Cretaceous Sifangtai Formation in North Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2018, 37(5): 1-7.
- [10] 陈路路, 聂逢君, 严兆彬. 松辽盆地西部斜坡带四方台组铀成矿条件分析[J]. *世界核地质科学*, 2013, 30(2): 70-78.  
Chen L L, Nie F J, Yan Z B. Analysis on uranium metallogenic conditions of Sifangtai Formation in western slope of Songliao Basin [J]. *World Nuclear Geoscience*, 2013, 30(2): 70-78.
- [11] 封志兵, 聂逢君, 严兆彬, 等. 松辽盆地西部斜坡铀成矿条件及聚铀模式[J]. *大庆石油地质与开发*, 2013, 32(4): 36-41.  
Feng Z B, Nie F J, Yan Z B, et al. Mineralizing conditions and metallogenic model of uranium in west slope of Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2013, 32(4): 36-41.
- [12] 李娟, 舒良树. 松辽盆地中、新生代构造特征及其演化[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2002, 38(4): 525-531.  
Li J, Shu L S. Mesozoic-Cenozoic tectonic features and evolution of the Song-Liao Basin, NE China [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2002, 38(4): 525-531.
- [13] 孙永河, 白鹿, 付晓飞. 松辽盆地北部 T<sub>2</sub> 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.  
Sun Y H, Bai L, Fu X F. Genetic mechanism of T<sub>2</sub> reflector fault dense zones in Northern Songliao Basin [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2013, 38(4): 797-806.
- [14] 孙永河, 陈艺博, 孙继刚, 等. 松辽盆地北部断裂演化序列与反转构造带形成机制[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(3): 275-283.  
Sun Y H, Chen Y B, Sun J G, et al. Evolutionary sequence of faults and the formation of inversion structural belts in the northern Songliao Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(3): 275-283.
- [15] 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成矿环境与找矿方向探讨[J]. *矿床地质*, 2018, 37(1): 175-190.  
He Z B, Qin M K, Song J Y, et al. A study of metallogenic environments and prospecting direction of Jurassic sandstone-type uranium deposit in northeastern Junggar Basin [J]. *Mineral Deposits*, 2018, 37(1): 175-190.
- [16] 李亮, 王永康, 张建晔. 在油气藏周围寻找砂岩型铀矿[J]. *西安石油学院学报(自然科学版)*, 2001, 16(5): 7-10.  
Li L, Wang Y K, Zhang J Y. Exploiting the sandstone uranite mineral deposits around oil and gas reservoirs [J]. *Journal of Xi'an Petroleum Institute (Natural Science Edition)*, 2001, 16(5): 7-10.
- [17] 高瑞祺, 蔡希源. 松辽盆地油气田形成条件与分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 1-9, 529-530.  
Gao R Q, Cai X Y. Oil and gas fields distribution rules in Songliao Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 1-9, 529-530. (in Chinese)
- [18] 赵忠华. 中国北东部中生代盆地地浸砂岩型铀成矿条件及找矿方向[J]. *地质与资源*, 2003, 12(1): 36-41, 60.  
Zhao Z H. Metallogenic conditions and prospecting direction for in-situ leachable sandstone-type uranium deposits in the Mesozoic basins of northeast China [J]. *Geology and Resources*, 2003, 12(1): 36-41, 60.
- [19] 赵杰, 罗梅, 刘峰, 等. 松辽盆地北部可地浸砂岩型铀成矿条件与分布特征[J]. *成都理工学院学报*, 2002, 29(2): 137-143.  
Zhao J, Luo M, Liu F, et al. Formation conditions and distribution features of situ leachable sandstone-type uranium mineralization in the North of Songliao Basin [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2002, 29(2): 137-143.
- [20] 康德江, 庞雄奇, 吕延防, 等. 松辽盆地西斜坡水动力场与油气的聚集成藏[J]. *地球学报*, 2008, 29(2): 205-212.  
Kang D J, Pang X Q, Lü Y F, et al. Hydrodynamic field and hydrocarbon accumulation on the west slope of the Songliao Basin [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2008, 29(2): 205-212.
- [21] 焦养泉, 吴立群, 荣辉, 等. 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.  
Jiao Y Q, Wu L Q, Rong H, et al. 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*, 2018, 43(2): 459-474.