

松辽盆地南部两井地区四方台组砂岩型铀成矿条件及找矿方向

石 蕾¹, 鞠 楠¹, 张 森², 郜晓勇^{1*}, 孙求实^{1*}, 陈树旺¹, 公繁浩¹

1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心（东北地质科技创新中心），辽宁 沈阳，110034；
2. 中国地质调查局自然资源实物地质资料中心，河北 燕郊 065201

摘要：通过对松辽盆地南部两井地区四方台组铀源条件、构造特征、岩性岩相条件、含矿目的层特征、水文地质及古气候特征、钻探验证及铀矿化特征进行系统分析，认为两井地区四方台组具备砂岩型铀成矿的基本地质条件。区内铀源丰富，发育东高西低呈 NE-SW 走向的缓斜坡构造及断穿 T₂—T₀₃ 的油源断裂，辫状河沉积体系发育，具有多套良好连续性和稳定性的砂体，砂体含烃量高还原性容量大，泥-砂-泥结构稳定；地下水补—径—排体系完善；干热温湿交替的弱碱性氧化古气候环境有利于铀元素活化迁出及含氧含铀地下水的形成，有利于后生氧化叠加铀成矿；铀异常普遍发育在四方台组中下段，铀矿化信息显示及钻探验证效果明显。两井地区西南部四方台组中下段分流河道微相与河道间微相的砂泥互层界面以及岩石地球化学参数异常地带应是两井地区四方台组砂岩型铀矿找矿的重点方向。

关键词：砂岩型铀矿；成矿条件；找矿方向；四方台组；两井地区；松辽盆地

中图分类号：P619.14

收稿日期：2025-01-21

Metallogenic Conditions and Prospecting Targeting of Sandstone-type Uranium Mineralization of Sifangtai Formation, Liangjing Area, Southern Songliao Basin

Shi Lei¹, Ju Nan¹, Zhang Sen², Gao Xiaoyong^{1*}, Sun Qiushi^{1*}, Chen Shuwang¹, Gong Fanhao¹

1. Shenyang Center of Geological Survey, China Geological Survey (CGS)/Northeast China Center for Geoscience Innovation, Shenyang 110034, China;

2. Cores and Samples Center of Natural Resources, China Geological Survey, Yanjiao 065201, China)

Abstract: Based on a systematic analysis of uranium source conditions, tectonic features, ore-hosting target layer

基金项目：中国地质调查局项目（No. DD20240045）；国家重点研发计划项目（No. 2018YFC0604200）。

作者简介：石蕾（1987-），女，高级工程师，主要从事油气地质、砂岩型铀矿调查研究。Email: shih1101@163.com。

ORCID: 0000-0002-1396-7400.

通信作者：郜晓勇，Email: 38284073@qq.com; 孙求实，Email: 70416484@qq.com

characteristics, hydrogeological and paleoclimate conditions, drilling verification, and uranium mineralization features in the Liangjing area of the Southern Songliao Basin, it is inferred that the Sifangtai Formation (K_{2s}) possesses the fundamental geological conditions necessary for sandstone-type uranium mineralization in this region. The area is characterized by abundant uranium sources and a gentle slope structure trending NE-SW, with higher elevations in the east and lower elevations in the west. Oil-source faults penetrate the T₂-T₀₃ formations, facilitating fluid migration. A braided river sedimentary system is well-developed, featuring multiple sand bodies with good continuity and stability. These sand bodies exhibit high hydrocarbon content and significant reductive capacity. Stable mudstone-sandstone-mudstone sequences are present, along with a well-developed groundwater system characterized by a complete recharge-discharge-drainage mechanism. A weakly alkaline, oxidizing paleoclimate with alternating dry-heat and temperate-humid conditions promotes the activation and migration of uranium and other elements. This environment favors the formation of oxygenated uranium-bearing groundwater and the superposition of epigenetic oxidation processes, which enhance uranium mineralization. Uranium anomalies are predominantly developed in the middle to lower members of the K_{2s} Formation, with clear mineralization information and drilling verification results. The study suggests prioritizing exploration targets in the following areas: the sand-clay interbedding interface between distributary channel and inter-channel microfacies in the lower-middle section of the Sifangtai Formation, as well as zones of rock geochemical parameter anomalies. These features collectively represent optimal targets for identifying sandstone-type uranium mineralization in the Liangjing area.

Key words: Sandstone-type Uranium; metallogenic conditions; prospecting targeting; Sifangtai Formation; Liangjing area; Songliao Basin

0. 引言

松辽盆地是一个呈 NNE 向展布具有多沉积旋回的中新生代大型陆相沉积盆地,是煤炭、石油、天然气及铀等能源矿产资源的共生建造盆地,全球大部分的含油或煤沉积盆地中发现有砂岩型铀矿存在。20 世纪 90 年代我国开始了大规模的可地浸砂岩型铀找矿工作,于上世纪末发现了松辽盆地现唯一的钱家店大型砂岩型铀矿床(张金带, 2016; 韩效忠等, 2020; Chiyang Liu et al., 2020; 李胜祥, 2002; 高瑞琪等, 1997; 焦养泉等, 2022; 彭虎, 2024; 彭虎, 2023; Peng Hu et al., 2022; 张森等, 2021)。近年来,中国地质调查局等相关单位加大了对松辽盆地白垩系地层砂岩型铀找矿的投入力度,相继在盆地北部大庆长垣及南部长岭凹陷等地发现多个四方台组铀工业孔、矿化孔及异常孔,表明盆地白垩系上统四方台组具有良好的铀成矿条件及成矿潜力。根据钻井测井资料发现,两井地区具有明显的自然伽马异常,在该区 20 余个石油钻井及 3 个铀矿钻孔中见铀矿化,铀矿化层位主要位于四方台组,其次

是嫩江组，反映两井地区四方台组地层具有一定的砂岩型铀成矿潜力。

近年来，通过对松辽盆地南部中央凹陷区开展砂岩型铀矿调查选区工作，该地区首次钻获一批砂岩型铀工业孔与铀矿化孔，特别是两井地区四方台组钻探验证效果显著。鉴于此，本文以松辽盆地南部两井地区四方台组为研究目标，以铀源和含矿目的层砂岩特征为重点，系统分析了该区铀成矿环境及成矿条件，大体查明了研究区铀源、构造、沉积建造、砂体特征、水文地质及铀矿化等成矿地质特征，初步指明了该区砂岩型铀成矿类型及找矿方向，以期能为两井地区乃至整个松辽盆地四方台组砂岩型铀矿找矿突破及勘探部署提供科学依据和指导。

1. 区域地质背景

两井区块地理位置处于吉林省松原市境内，四周油田分布较密集，研究区北部为两井油田南部范围，西邻乾安油田，南为孤店油气田，东为木头油田。构造区域划分上处于松辽盆地南部中央坳陷区长岭凹陷东北部古鼻状构造与扶新隆起带南部及华字井阶地三个二级构造单元的交汇部位（熊福生等，2008），地表被第四系沉积浮土覆盖（图1）。研究区由下至上依次发育断陷期的火石岭组、沙河子组、营城组，坳陷期的登楼库组、泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组和构造反转期的四方台组、明水组及古近系、新近系，其中泉头组四段发育扶余油层是该区烃类流体的主要产层。四方台组沉积时期由于盆地东缘地区抬升强烈，垂向上出现反粒序结构呈现滨浅湖—冲泛平原—冲积扇相的沉积序列，且在冲泛平原局部发育小型残存湖泊（刘招君等，1992；郭巍等，2009；万涛等，2018）。

研究区内首次发现的砂岩型铀工业孔 Q191 位于区内西南部长岭凹陷内，该井为全井取芯的调查验证井。钻遇地层：0-8.5m 为第四系（ Q ）；8.5m-161m 为新近系泰康一大安组（ N_1-N_4 ），161m-362m 为上白垩统明水组（ K_2m ），362m-620m 为上白垩统四方台组（ K_2s ），四方台组未见底。Q191 井在 542.05m-544.45m 处见两处连续铀异常，异常岩性为四方台组含炭屑细砂岩，经验证为砂岩型铀工业孔。

此外，在对研究区油气钻井进行放射性异常筛查的过程中，笔者发现除在四方台组发现伽马测井异常外，在嫩江组、青山口组及下白垩统也发现了大量的伽马测井异常，在垂向上呈现多层次高伽马异常的特征。而深部流体在地层超压的作用下可能通过断裂与这些富铀岩体进行沟通，最终携带含矿流体进入目的层，并在遇到盖层后沿层间运移。因此认为，这些深部的含矿岩体也可能为四方台组铀成矿提供了一部分铀源。

钍铀比是反映铀成矿环境的重要参数。不同类型岩石中钍铀比值比较恒定，一般在 3~4 之间，也有学者认为在 2~5 之间，显示岩浆作用过程中钍铀的化学行为相似。钍元素一般保存比较稳定而不易流失，而铀元素易受后期环境影响发生活化、迁移流失，二者化学性质差别较大（胡鹏等，2020；佟术敏等，2023）。低钍铀比值预示后期有铀的二次迁入富集，是铀成矿的有利指示参数（Asfahaani J, et al.,2007），相反高钍铀比值则预示铀的迁移流失。

通过对研究区四方台组不同地球化学环境的砂体钍、铀含量进行分析（表 1），氧化带环境中 $w(\text{Th})$ 为 $7.91 \times 10^{-6} \sim 12.38 \times 10^{-6}$ ，平均为 10.16×10^{-6} ， $w(\text{U})$ 为 $2.23 \times 10^{-6} \sim 6.64 \times 10^{-6}$ ，平均值为 3.76×10^{-6} ， Th/U 平均值为 3.40；还原环境中 $w(\text{Th})$ 为 $5.59 \times 10^{-6} \sim 13.29 \times 10^{-6}$ ，平均为 8.27×10^{-6} ， $w(\text{U})$ 为 $1.17 \times 10^{-6} \sim 13.38 \times 10^{-6}$ ，平均值为 6.65×10^{-6} ， Th/U 平均值为 2.05；氧化还原过渡环境 $w(\text{Th})$ 为 $7.77 \sim 12.72 \times 10^{-6}$ ，平均值为 9.77×10^{-6} ， $w(\text{U})$ 为 $40.38 \sim 252 \times 10^{-6}$ ，平均值为 162.84×10^{-6} ， Th/U 平均值为 0.11。其中，钍含量在不同地化环境中变化微小，而铀含量变化较为明显，因此 Th/U 值变化也较为明显，比值呈现氧化环境>还原环境>氧化还原过渡环境的特征，说明研究区氧化环境砂体中铀元素发生了迁移、流失，砂体发生了后生蚀变作用。还原环境中的 Th/U 值为岩浆作用过程中钍铀的动态平衡值。氧化还原过渡环境中 Th/U 值较原生环境显著降低，过渡环境砂体中铀元素发生了明显的迁入、富集，反应该过程蚀变作用及水解反应强，成矿流体性质活跃。研究区已发现的含铀矿砂体大多位于此类氧化还原过渡带环境中，少数产于还原环境的灰色砂岩中，含矿砂体顶底板为棕红色细砂岩、棕红色粉砂岩或棕红色泥质粉砂岩，呈现“两红夹一灰”的沉积建造特征。

表 1 两井地区四方台组砂体 Th/U 值数据表

Table 1 The Th/U ratio of sand body in Sifangtai Formation

序号	样品号	深度/ m	沉积环境	岩性	$w(\text{U})/10^{-6}$	$w(\text{Th})/10^{-6}$	Th/U
1	Q191-1	539.10		棕红色泥质粉砂岩	6.64	10.19	1.53
2	Q191-4	539.30	氧化环境	棕红色泥质粉砂岩	2.42	12.38	5.12
3	Q191-5	539.90		棕红色泥质粉砂岩	2.23	7.91	3.55

		平均值			3.76	10.16	3.40
4	Q191-3	545.45		灰色细砂岩	1.71	8.19	4.79
5	Q191-6	544.65		灰色粉砂岩	4.01	5.73	1.43
6	Q191-7	545.15		灰色细砂岩	2.15	6.30	2.93
7	Q191-9	543.65		灰色粉砂岩	13.38	9.51	0.71
8	R36-1	290.90	还原环境	灰色细砂岩	12.99	5.59	0.43
9	R36-2	284.94		灰色细砂岩	3.47	13.29	3.83
10	R36-3	290.50		灰绿色细砂岩	7.17	7.68	1.07
11	R36-4	290		灰色泥质粉砂岩	8.29	9.87	1.19
		平均值			6.65	8.27	2.05
12	Q191-2	544.15		灰色细砂岩	113	8.43	0.07
13	Q191-8	541.60		灰色泥质粉砂岩	252	11.14	0.04
14	Q191-10	542.30		灰色粉砂岩	57.5	9.26	0.16
15	Q191-11	542.80	氧化还原过	灰褐色粉砂岩	40.38	9.08	0.22
16	Q191-12	542.10	渡环境	灰色粉砂岩	190	7.77	0.04
17	R36-5	290.20		灰色泥质粉砂岩	433	9.99	0.02
18	R36-6	289.90		灰色泥质粉砂岩	53.99	12.72	0.24
		平均值			162.84	9.77	0.11

注：本次样品所有测试均在核工业东北分析测试中心完成。

两井地区铀源丰富，不仅物源区花岗岩含铀丰度较高，而且盆地内发育的水系也可以为研究区提供铀源，为目标区铀矿的富集提供了良好的物质基础。

2.2 构造条件

松辽盆地白垩纪先后经历断陷—拗陷—反转构造期，四方台组时期由于盆地东部的反转构造作用，盆地沉积中心西移，盆缘的上白垩统裸露地表，东部反转构造大部被剥蚀成构造天窗，如四方台、钱家店等地区（张振强等，2006），使四方台组地层直接暴露于地表，有利于地表的含铀含氧水的垂直和沿沉积地层顺层渗入，形成潜水氧化型及层间氧化带型铀矿化。反转过程中，除为来自蚀源区的含铀含氧水顺层渗入砂岩提供了动力条件，还能使含矿目的层产生大量的断裂及微裂隙，为油气或热液运移提供良好的通道，大大提高含矿目的层中的还原容量。

新运动构造时期，断块发生大幅度升降和强烈的火山活动，沟通了深部的生油岩与浅层的储集层，使得油气和 CO₂ 沿断裂向上运移产生酸性蚀变，导致岩石中还保留大量的烃类等还原性物质（表 2），有利于铀的富集（桑吉盛等，2004）。掀斜运动后的两井地区正处于盆缘部位，区内东高西低整体为一呈 NE-SW 走向的缓斜坡构造带，发育断穿青山口组至四方台组（T₂—T₀₃）的油源断裂（图 2），东部断裂整体向西倾斜，西部长岭凹陷内断裂向东呈小角度倾斜，这种深层断裂断距大、倾角高，底部断入油源区，顶部断入目的层，为还原流体运移提供了直接的通道（王胜男等，2014；付广等，2010）。在盆缘抬升的同时，也为盆地提供充足的物质，此时沉积物供应率大于盆地的沉降速率，盆地趋向淤浅。综合以上，松辽盆地东南部盖层的掀斜运动、剥蚀天窗、活动断裂等新构造运动发育，是寻找可地浸砂岩型铀矿的有利地段。

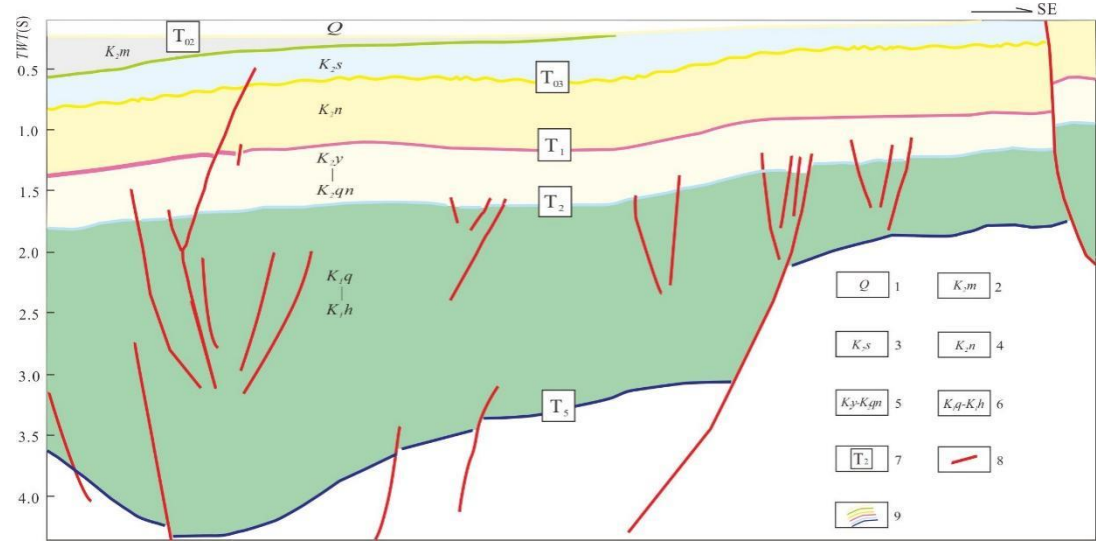


图 2 松辽盆地南部两井地区南东向地质剖面（剖面位置见图 3 绿色曲线）

Fig.2 Southeast Geological Section of Liangjing area, South Songliao Basin (See the green solid line in Fig.3 for the profile location)

1 第四系 2 明水组 3 四方台组 4 嫩江组 5 姚家组-青山口组 6 泉头组-火石岭组 7 反射层 8 断裂 9 地层界线

表 2 两井地区四方台组细砂岩烃含量表

Table 2 Hydrocarbon content of fine sandstone in Sifangtai Formation in Liangjing Area

样品号	岩性	烃含量（μL/kg）						
		甲烷	乙烷	丙烷	异丁烷	正丁烷	异戊烷	正戊烷
Q191-3	灰色细砂岩	1492	204	54.85	2.59	12.06	2.29	2.62
Q 191-7	灰色细砂岩	1441	198	57.74	4	13.4	3.45	2.97
R36-1	灰色细砂岩	1292	214	61.44	3.89	16.67	3.2	3.41
R36-3	灰绿色细砂岩	1335	181	57.95	6.65	15.21	7.23	4.03

2.3 沉积建造条件

两井地区四方台组地层下与嫩江组、上与第三系成微角度不整合接触，沉积厚度一般为0-283m，埋深在 180-750m 范围内，向西北长岭凹陷方向埋深越深。研究区主要发育辫状河三角洲平原亚相沉积，进一步细分为分流河道微相及河道间微相沉积（图 3）。分流河道沉积具有一般河道的特征，以砂质沉积为主，沉积物粒度一般，分选较好。河道间沉积包括天然堤、决口扇、分流间湾等沉积微相，沉积物粒度更细，沉积序列为泥岩、粉砂岩或砂泥薄互层。四方台组主要为红色夹灰色细碎屑岩夹泥岩沉积，具有分布广泛的稳定砂体，岩性为杂色砂、泥岩互层夹有紫红色、灰色砂岩或砂砾岩；砂岩块状、分选中等、红色矿物多，使岩石成红色，具斜层理。泥岩棕红色常有灰绿掺杂成花斑杂色，富含钙质，一般均呈团块。总体上呈较明显的下粗上细的正韵律旋回沉积，形成多套“泥-砂-泥”结构。砂体厚度大，单层砂体厚 1-20 米，砂体连续、稳定、较疏松，局部可见类化石碎片、黄铁矿化和炭化植物碎屑。

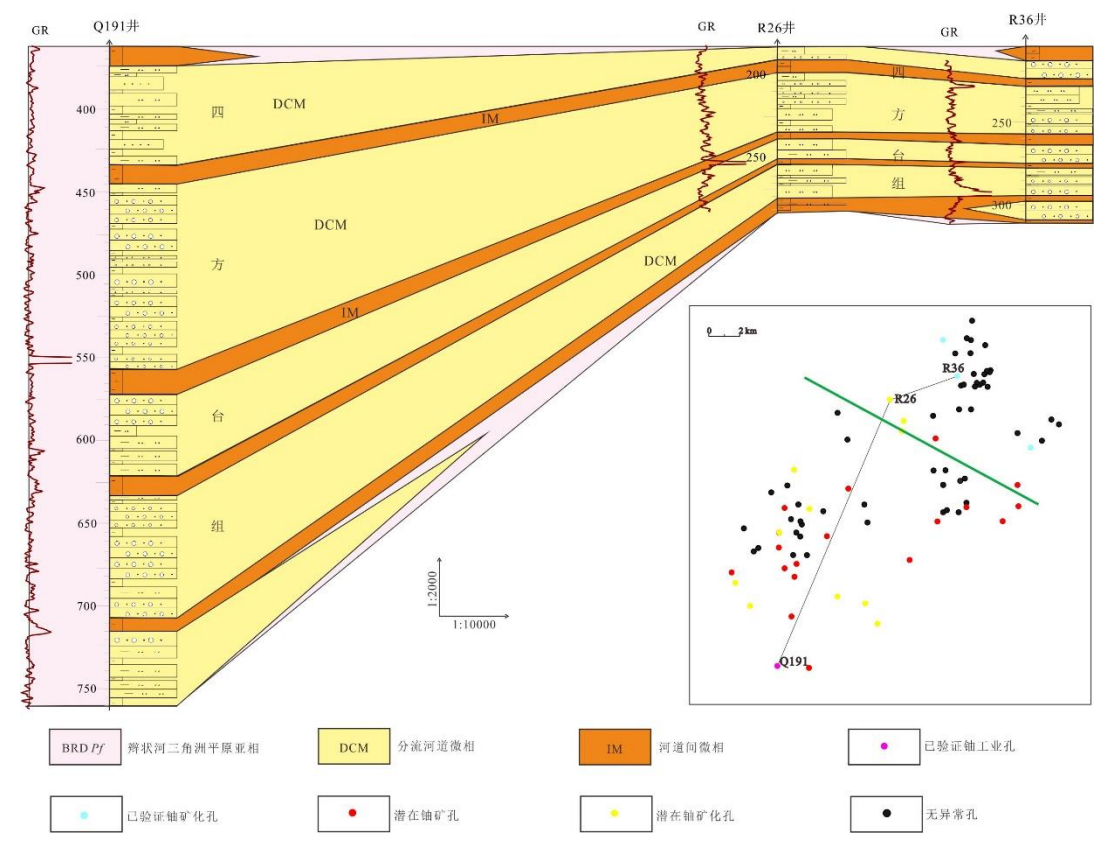


图 3 松辽盆地南部两井地区沉积相联井剖面图

Fig 3 Sedimentary facies profile of joint wells in Liangjing area in southern of Songliao Basin

根据铀异常与沉积相的空间关系，发现油气钻孔中 GR 异常大部分发育在四方台组中下段分流河道与河道间的接触带，分流河道砂体提供运移通道与储集空间，河道间泥岩或粉砂

质泥岩构成氧化还原障。在多个铀矿验证孔中见到的铀矿点、铀矿化也受控于辫状河和辫状河三角洲分流河道这一沉积体系中，相控明显。在实际勘探实践中，两井地区四方台组砂岩型铀找矿目标应以四方台组中下段为主，分流河道微相与河道间微相的砂泥互层界面可能需要重点关注，找矿类型以层间氧化带为主。

2.4 含矿目的层砂岩特征

岩石原生地球化学类型受古气候条件和沉积、成岩环境以及地层中所含有机质等控制，不同颜色反映出不同的地球化学特征，可划分为原生、后生岩石地球化学环境。两井地区已查证的铀矿孔中铀矿层、矿化层均发育在四方台组中下部的辫状河沉积体系中，砂岩碎屑成分主要以岩屑、长石为主，分选中等，磨圆中等到好，发育平行层理和交错层理，具冲刷面。胶结较致密，滴酸起泡，局部见炭屑、黄铁矿及贝类化石，氧化-还原过渡带发育，后生蚀变特征明显（图 4）。

通过沉积岩的主量元素化学成分（表 3）可以区分岩石的物源。依据 $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}) - \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O}$ 图版，研究区四方台组砂岩主要为岩屑砂岩，其次是长石砂岩（图 5）。在 F1-F2 判别函数图解中，研究区四方台组砂岩绝大部分落在长英质火成岩物源区，少量砂岩落入石英沉积物物源区（图 6），表明四方台组砂岩主要来自酸性火山岩，如花岗岩、花岗闪长岩等，且有少部分砂岩为再旋回砂岩。此外，砂岩中碱金属含量较低， $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 为 4.33%~6.84%，且 $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ ，反映砂岩中长石组分以钾长石为主，具有明显富钾特征，表明蚀源区已演化为富钾的地质体，其中的铀相对富集。

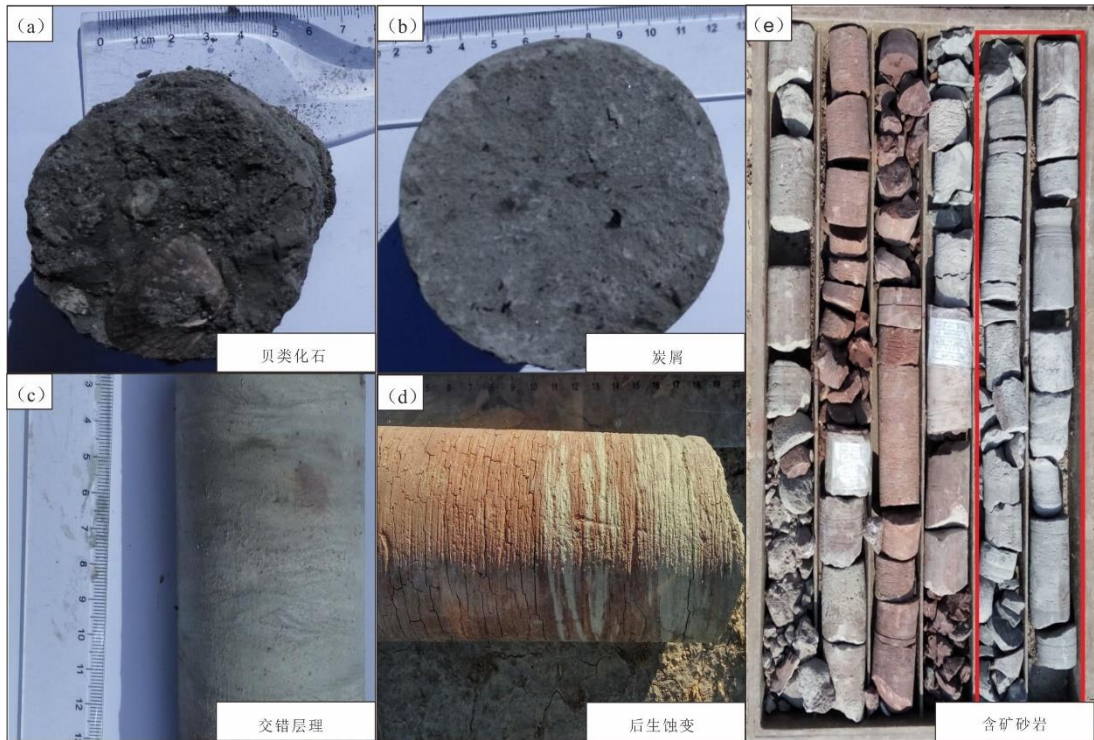


图 4 松辽盆地南部两井地区四方台组砂岩钻孔岩心

Fig.4 Sandstone drilling cores in of K₂S in Liangjing area in southern of Songliao Basin

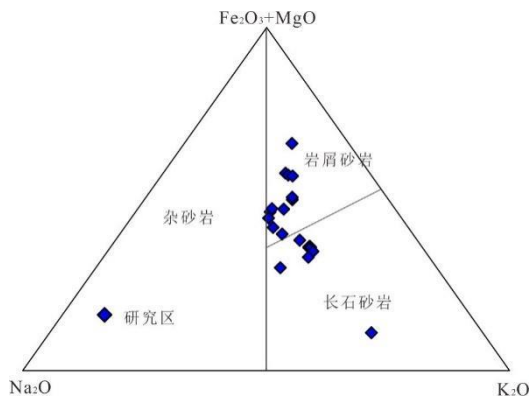


图 5 四方台组砂岩类型的地球化学判别

Fig.5 Types of sandstones determined according to geochemical data from the Sifangtai Formation

据 Blatt, H et al., (1980)

其中 $F1 = -1.773TiO_2 + 0.607Al_2O_3 + 0.760Fe_2O_3^T - 1.500MgO + 0.616CaO + 0.509Na_2O - 1.224K_2O - 9.090$; $F2 = 0.445TiO_2 + 0.070Al_2O_3 - 0.250Fe_2O_3^T - 1.142MgO + 0.438CaO + 1.475Na_2O + 1.426K_2O - 6.861$

四方台组砂岩主量元素含量以 SiO_2 (63.26%-80.94%, 平均 72.22%) 含量最高, Al_2O_3 (8.170%-17.24%, 平均 13.04%) 和 CaO (1.98%~8.33%, 平均 4.28%) 次之。较高的 SiO_2 和 Al_2O_3 含量反映四方台组物源母质相对富含石英、长石矿物, SiO_2/Al_2O_3 比值平均为 5.77, 反映了砂岩成分成熟度偏低。

表 3 两井地区四方台组砂岩主量元素含量

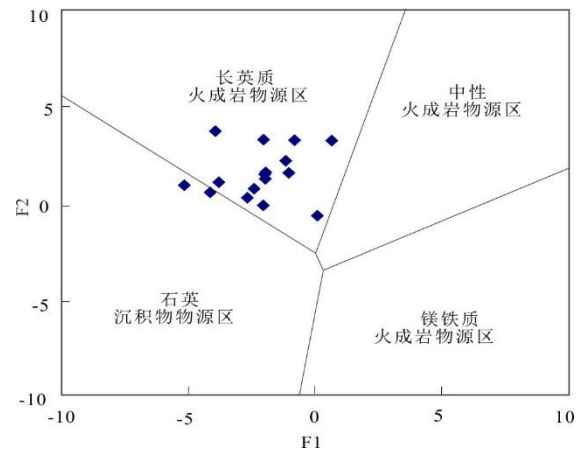


图 6 研究区砂岩物源判别图

Fig.6 Provenance discrimination diagrams for study area

据 Roser and Korsch(1988)

Table.3 Relative contents of major elements of sandstones from K ₂ s Formation sandstone in Liangjing Area												
	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W		
样品编号	(SiO ₂)	(Fe ₂ O ₃ ^T)	(Al ₂ O ₃)	(CaO)	(MgO)	(MnO)	(Na ₂ O)	(K ₂ O)	(TiO ₂)	(P ₂ O ₅)	LOI	CIA
	/%	/%	/%	/%	/%	/%	/%	/%	/%	/%		
Q191-1	66.73	3.60	13.24	8.33	1.58	0.09	2.22	3.41	0.43	0.07	9.39	49
Q191-2	70.57	2.17	13.06	6.52	1.31	0.06	2.54	3.16	0.46	0.10	7.53	52
Q191-3	80.94	1.59	9.51	1.98	0.64	0.03	1.82	3.19	0.18	0.05	2.44	58
Q191-4	63.64	6.48	16.32	4.41	2.65	0.04	1.77	3.37	0.66	0.07	9.64	63
Q191-5	73.18	2.14	11.84	5.81	1.08	0.05	2.40	2.63	0.46	0.22	6.82	52
Q191-6	78.01	2.07	11.14	2.37	0.78	0.03	1.99	3.13	0.28	0.06	3.40	60
Q191-7	80.91	1.59	8.70	3.55	0.57	0.04	1.55	2.78	0.17	0.06	3.87	52
Q191-8	69.72	4.07	14.33	3.63	2.16	0.04	2.03	3.02	0.61	0.08	8.23	62
Q191-9	75.12	2.41	12.90	2.56	1.41	0.02	2.39	2.50	0.46	0.07	5.49	63
Q191-10	74.42	2.42	12.01	4.07	1.25	0.05	2.52	2.59	0.45	0.08	6.52	57
Q191-11	71.79	2.69	13.25	4.90	1.43	0.05	2.45	2.66	0.50	0.12	7.24	57
Q191-12	71.80	2.81	13.25	4.37	1.54	0.06	2.33	3.06	0.51	0.11	7.90	58
R36-2	74.50	1.66	13.10	3.38	0.68	0.03	2.82	3.28	0.37	0.08	3.80	58
R36-3	73.12	2.31	12.60	3.45	1.06	0.05	2.40	4.45	0.31	0.08	5.03	55
R36-4	73.29	3.10	12.33	3.92	1.44	0.08	2.00	3.05	0.39	0.15	6.71	58
R36-5	63.26	4.53	16.87	6.27	2.27	0.10	2.13	3.48	0.65	0.09	10.71	59
R36-6	66.69	4.06	17.24	3.29	2.34	0.05	2.05	3.25	0.65	0.10	8.65	67

环境地球化学指标参数在不同氧化还原分带中有较明显差别，表现出较好的分带性。本次样品的环境地球化学分析结果见表 4。砂体中有机碳（TOC）含量、硫（全 S、S²⁻）含量与 Fe₂O₃/FeO 值在一定程度上可以反映砂体的还原容量，还原作用是铀成矿过程中必不可少的条件之一（赵凤民，2017；董方升等，2023）。

根据岩石原生地球化学类型，将岩石还原能力分为 3 个等级，分别为强还原能力（w_{TOC}>0.30%）、中等还原能力（0.05%<w_{TOC}<0.30%）和弱还原能力（w_{TOC} <0.05%）（权志高，2003）。研究区四方台组氧化带砂体有机碳 w_{TOC} 为 0.11%~0.12%，平均值为 0.11%；过渡带（含矿层）内为 0.32%~0.53%，平均值为 0.40%，过渡带呈强还原能力；原生还原带

内为 0.07%~0.18%，平均值为 0.12%，为中等还原能力。有机碳 w_{TOC} 含量在过渡环境（含矿层）中明显高于氧化环境和还原环境（图 7a），氧化环境含量略低于还原环境（无矿层），说明层间氧化带受到烃类流体或还原热液等后生改造作用明显，氧化还原作用较强烈，增强了地层的还原能力，与铀成矿关系密切。

全 S 在氧化带内的变化范围为 0.03%~0.075%，平均值为 0.05%；过渡带内为 0.435%~0.947%，平均值为 0.74%；还原带内为 0.015%~0.149%，平均值为 0.06%（图 7b）。 S^{2-} 在氧化带内的变化范围为 0.011%~0.044%，平均值为 0.03%；过渡带内为 0.048%~0.280%，平均值为 0.18%；还原带内为 0.004%~0.059%，平均值为 0.02%（图 7c）。FeO 在氧化带内的变化范围为 0.87%~1.13%，平均值为 0.83%；过渡带内为 1.13%~1.54%，平均值为 1.30%；还原带内为 0.69%~1.28%，平均值为 0.86%（图 7e）。与有机碳相同，全 S、 S^{2-} 、FeO 在整体上表现出过渡带还原能力明显高于氧化带与还原带的特征，而氧化带与还原带相差不多大，呈略高或略低态势。

Fe_2O_3 在氧化带内的变化范围为 1.82%~5.59%，平均值为 3.60%；过渡带内为 1.43%~3.58%，平均值为 2.36%；还原带内为 0.41%~2.51%，平均值为 1.28%（图 7d）。整体表现出还原能力从氧化带-过渡带-还原带依次增强的规律。

$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 氧化带内的变化范围为 3.49%~5.27%，平均值为 4.13%；过渡带（含矿层）内为 1.26%~2.73%，平均值为 1.80%；还原带（无矿层）内为 0.54%~2.99%，平均值为 1.52%（图 7f）。 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 值在氧化环境中显著高于过渡环境，过渡环境又高于还原环境，呈氧化带-过渡带-还原带依次降低的规律。

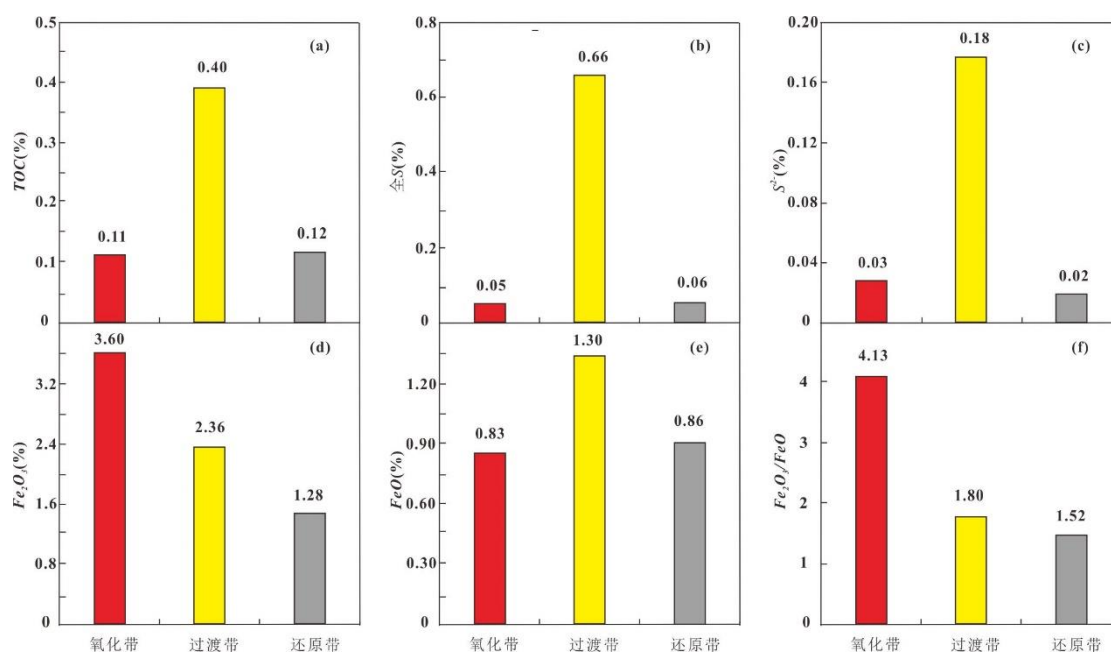


图 7 氧化还原分带环境地球化学指标直方图

Fig.7 The histograms of environmental geochemical index in redox zoning

研究区目的层砂体有机碳、硫与黄铁矿含量在过渡环境（含矿层）中最高，在氧化环境与还原环境（无矿层）中含量相当，反映含矿层砂体的还原容量较大，后生蚀变作用明显，有利于铀的进一步还原沉淀和富集成矿。由此推断，异常高的有机碳、硫与黄铁矿含量可以作为本区铀矿找矿直接的岩石地球化学标志，证实了还原作用是铀成矿过程中必不可少的条件。同时，Fe₂O₃ 含量及 Fe₂O₃/FeO 值也能够为层间氧化带的识别及空间分布提供指示作用。

表 4 氧化还原分带环境地化指标

Table 4 The data of environmental geochemical index in redox zoning

样品编号	层间氧化分带	W (FeO)	W (Fe ₂ O ₃)	W (TOC)	W (全 S)	W (S ²⁻)	Fe ₂ O ₃ /FeO
		/%	/%	/%	/%	/%	
Q191-1	氧化带	0.87	3.04	0.11	0.075	0.044	3.49
Q191-4		1.13	5.95	0.12	0.053	0.029	5.27
Q191-5		0.50	1.82	0.11	0.03	0.011	3.64
Q191-8	过渡带	1.28	3.10	0.32	0.453	0.16	2.42
Q191-10		1.13	1.43	0.39	0.655	0.218	1.27
Q191-11		1.24	1.61	0.33	0.632	0.216	1.30
Q191-12		1.32	1.66	0.53	0.824	0.28	1.26
R36-5	还原带	1.31	3.58	0.47	0.947	0.048	2.73
R36-6		1.54	2.80	0.33	0.435	0.147	1.82

Q191-3		0.94	0.73	0.17	0.046	0.007	0.78
Q191-6		0.89	1.31	0.11	0.028	0.015	1.47
Q191-7		0.80	0.87	0.08	0.033	0.004	1.09
Q191-9	还原带	1.28	1.49	0.18	0.149	0.059	1.16
R36-1		0.76	0.41	0.08	0.015	0.005	0.54
R36-2		0.69	1.08	0.07	0.032	0.011	1.57
R36-3		0.70	1.80	0.12	0.048	0.016	2.57
R36-4		0.84	2.51	0.13	0.115	0.036	2.99

2.5 水文地质条件及古气候特征

松辽盆地是一个大型的渗入型承压水盆地，存在良好的地下水“补-径-排”水文地质条件，为层间氧化带的形成奠定了基础（刘杰等，2017；佟术敏等，2023）。地下水的补给主要为垂向和侧向两种方式，大气降水是地下水重要的垂向补给形式。研究区由盆地东部、北部向西南部盆地中心径流，上部接收大气降水补给后可形成一定规模的基岩裂隙水，通过渗透层下渗弹性补给。受盆地地质构造和地形地貌的影响，地下水总的径流方向是东北指向西南。本区排泄方式主要包括蒸发、NE 或 E-向 WS 或 W 向的径流排泄或垂向越流补给其他含水层，水化学类型以 Ca-HCO_3 、 CaNa-HCO_3 型水为主，属低矿化度弱碱性水，而水中铀的含量往往与 Ca^{2+} 、 HCO_3^{3-} 关系密切，表明该区具有有利的水文地球化学背景（钟延秋等，2010；开伟萌等，2021；魏云杰等，2004；楼章华等，2006；楼章华等，2001）。

研究区四方台组砂岩基本形成于干旱-半干旱的气候，但有一件样品落入半潮湿气候区域，样品成分成熟度偏低（图 8a）。在古气候判别图版（Nesbitt et al., 1984）CIA-C 中（图 8b），C 反映气候的干燥或潮湿程度，CIA 反映物源区化学风化作用强度。四方台组砂岩样品处于干旱-半干旱半潮湿气候区域，以干旱气候为主；风化程度方面大部分样品落于初始化学风化区域，少部分为中等化学风化。综合看来，四方台组砂岩绝大部分形成于干旱-半干旱气候，极少部分形成于半潮湿气候，并具有较低的化学风化程度。干旱-半干旱气候环境下的沉积原岩多以红色为主，并易于造成蚀源区铀源层的强烈剥蚀和氧化，有利于铀的淋滤、迁出及含氧含铀地下水的形成而不被有机质所吸收，并能在渗透性好的砂岩中发育层间氧化带和铀的后生富集（王世辉等，2007）。

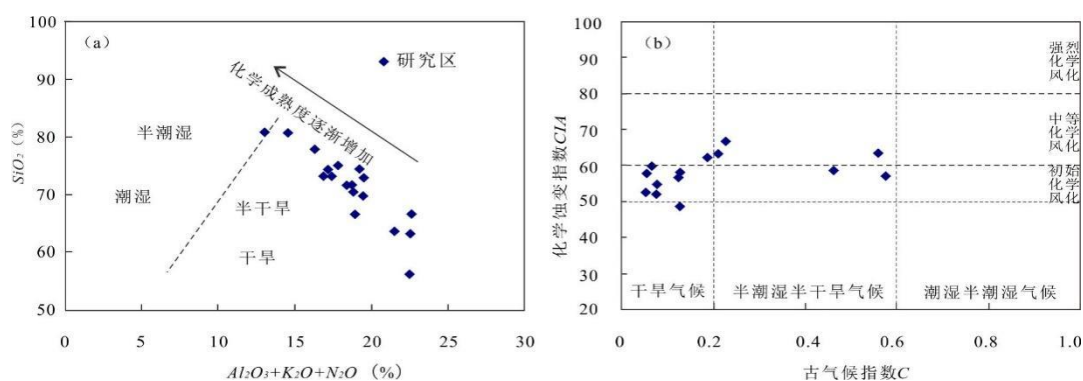


图 8 四方台组砂岩形成的气候背景

Fig.8 Discrimination diagrams for climate conditions during the sedimentation of sandstones in the Sifangtai Formation

8(a)据 Suttner and Dutta(1986), 7(b)据 Nesbitt et al (1984)。注: $C = \frac{\sum(\text{Fe}+\text{Mn}+\text{Cr}+\text{Ni}+\text{V}+\text{Co})}{\sum(\text{Ca}+\text{Mg}+\text{Sr}+\text{Ba}+\text{K}+\text{Na})}$, $\text{CIA} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}} \times 100$

2.6 铀矿化发育特征

通过对两井地区油田钻孔资料整理分析, 在 32 口石油钻井中发现自然伽马异常。异常埋深为 225m~710m, 异常厚度为 0.2m~3.56m, 异常强度一般为 300 API~1600API, 最大值为位于研究区西北部的 Q119-2 井 GR 值为 1747API, 平均为 890API; 其中强度大于 500API 的钻孔有 13 个。在已验证的 4 口钻孔中均在四方台组中下部发现铀异常, 包括 1 个工业铀矿孔和 3 个铀矿化孔 (图 2), 验证效果明显。验证孔含矿主岩以灰色细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩为主, 含矿层岩中常见长条状植物炭屑、黄铁矿及钙质胶结。其中位于研究区西南部的 Q191 钻孔为工业铀矿孔, 平均品位 0.0226%, 异常厚度 2.40m, 埋深 542.05m~544.45m, 含矿主岩为灰色粉细砂岩 (图 4e), 具有一定渗透性, 局部见炭屑及棕红色氧化残留钙质胶结。顶底板为泥质结构块状构造的棕红色粉砂质泥岩, 较致密, 推测为隔水层, “泥-砂-泥” 结构稳定。

3. 成矿模式及找矿方向

3.1 成矿模式

两井地区四方台组 (K_2S) 沉积期为干热温湿交替的古气候环境下沉积的红夹灰的碎屑岩建造, 主要发育辫状河-滨浅湖相沉积体系, 砂体较发育, 单层砂体厚度大, “泥-砂-泥” 结构稳定; 白垩纪晚期的反转构造作用导致研究区形成东高西低的缓坡带, 区内遭受了不同程度的剥蚀, 东部缺失明水组及古近系、新近系地层, 而有利含矿目的层四方台组出露地表。地表含铀含氧水顺势渗入至四方台组承压层间的水中, 从而发育层间氧化作用。同时, 沿不整合面、断裂构造等疏导体系向上运移、逸散的烃类流体进入到含矿建造中与含铀含氧水相遇发生氧化还原反应, 在氧化还原障附近将 U^{6+} 还原成稳定的 U^{4+} , 进而形成铀矿体 (图 9)

（赵兴齐等，2021；廉康等，2020）。进入到目的层的烃类流体增大了砂体的还原容量，有利于砂岩型铀成矿。

此外，铀在成矿之后可能还要经历叠加改造作用，使铀进一步富集，成矿演化变得复杂（焦养泉等，2021）。地表含铀含氧水的持续注入，会对早期形成的铀矿体进一步氧化改造，使铀元素向深部迁移；同时深部的还原流体如油气等持续向目的层砂体进入，同样对早期形成的铀矿体进行叠加改造，使铀矿体置于还原环境中，避免再次活化迁移，对早期形成的铀矿体起到保护作用（赵兴齐等，2021）。

分析认为，研究区已发现的含铀矿孔氧化带分带特征明显，均为“两红夹一灰”的沉积建造格局。含矿砂岩段顶底皆为泥岩、粉砂质泥岩或泥质粉砂岩，透水层与隔水层互层；含铀含氧流体顺地层倾角沿透水层延伸，铀在氧化带前锋富集，形成“卷型矿体”，并在区域内具有一定的连续性，矿体受地层产状控制明显。因此，两井地区四方台组砂岩型铀成矿模式主要为层间氧化带型。

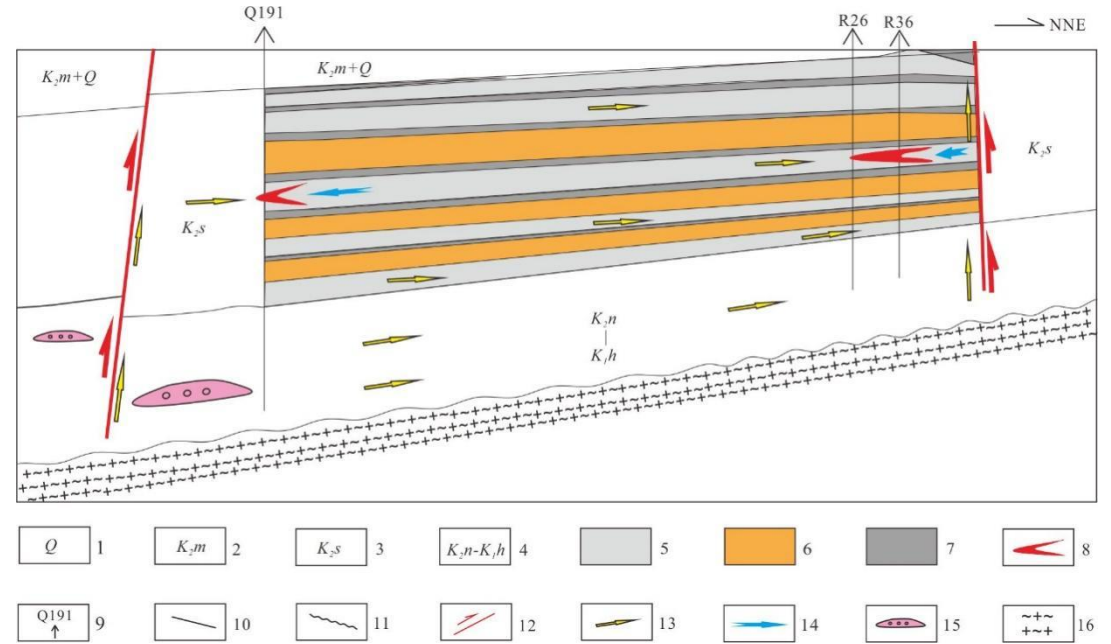


图9 松辽盆地南部两井地区砂岩型铀成矿预测模型（据赵兴齐等，2021 修改）

Fig. 9 Prediction model of sandstone-type uranium mineralization in Liangjing area of the southern Songliao Basin (modified after Zhao et al.,2021)

1 第四系 2 明水组 3 四方台组 4 嫩江组-火石岭组 5 灰色系砂岩 6 红色系砂岩 7 隔水层 8 铀矿化体 9 钻孔及编号 10 地层界线 11 不整合面 12 断裂构造 13 油气运移方向 14 含油含氧水深入方向 15 油气藏 16 盆地基底

3.2 找矿方向

综上所述，两井地区四方台组具有以下有利铀成矿条件：丰富的铀源条件、稳定的缓斜坡构造条件和有利的辫状河沉积体系砂体、补—径—排体系发育、富含有机质及烃类等还原

性流体、氧化还原过渡带发育、铀矿化发育特征明显、发现多个铀矿孔和铀矿化孔，因此认为两井地区四方台组具有较好的砂岩型铀矿成矿条件及找矿潜力。该区砂岩型铀矿找矿主攻方向应为四方台组中下段砂体铀含量高、还原性容量大、铀矿化发育明显的西南部地下水径流区，即分流河道微相与河道间微相的砂泥互层界面以及岩石地球化学参数异常地带应是两井地区四方台组砂岩型铀矿找矿的重点方向。找矿类型以层间氧化带型为主。

4. 结论

(1) 两井地区四方台组时期受反转构造作用控制，形成的缓斜坡和剥蚀天窗有利于地表含铀含氧水的垂直和沿沉积地层顺层渗入，为层间氧化带及潜水氧化带的发育创造了有利的建造、构造条件。

(2) 区内铀源丰富，地下水“补-径-排”水动力体系完善，处于干热温湿交替的弱碱性氧化古气候环境，发育后生含铀含氧水的氧化和有机质的还原两种后生蚀变。四方台组以辫状河相三角洲平原相沉积为主，泥-砂-泥结构稳定，砂体厚度大及还原容量大，赋含炭屑、黄铁矿及烃类等有机质，为层间氧化带型铀成矿奠定了物质基础。

(3) 两井地区四方台组砂岩型铀矿找矿以层间氧化带型为主，四方台组中下段分流河道微相与河道间微相的砂泥互层界面为主要找矿目标层位。区内砂体铀含量高、还原性容量大、铀矿化发育明显的西南部应是两井地区砂岩型铀矿找矿的重点方向。

(4) 通过分析铀源、构造、沉积建造、含矿层位、水文地质及古气候、铀矿化特征等成矿条件，综合地质特征、成矿规律等内容，建立了两井地区四方台组铀矿成矿模式，对松辽盆地南部砂岩型铀矿找矿具有重要指示意义。

参考文献(References):

- Asfahani, J., Aissa, M., Al-Hent, R., 2007. Uranium migration in a sedimentological phosphatic environment in northern Palmyrides, Al-Awaded Area, Syria. *Applied Radiation and Isotopes*, 65(9):1078-1086.
- Blatt, H., Middleton, G., Murray, R., 1980. *Origin of Sedimentary Rocks*. Prentice Hall, New Jersey.
- Chi, Y., Liu, X. W., Qiu, B. L., et al., 2007. Characteristics and dynamic settings of the Central-east Asia multi-energy minerals metallogenetic domain. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 50(2):1-18.
- Dong, F. S., Peng, H., Zhang, C. Y., et al., 2023. Oxidation and geological characteristics of uranium mineralization in Heishui area, Pingzhuang Basin. *Geological Bulletin of China*, 42(5):687-699 (in Chinese with English abstract).
- Fu, G., Wang, Y. G., Yuan, D. W., 2010. Source faults of F, Y oil layer in Sanzhao Depression and its control to oil accumulation. *Acta Petrolei Sinica*, 31(05):762-766+773 (in Chinese with English abstract).
- Gao, R. Q. Cai, X. Y., et al., 1997. *Formation Conditions and Distribution Rules of Oil and Gas Fields in Songliao Basin*. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese with English abstract).
- Guo, W., Yu W. X., Liu, Z. J., et al., 2009. Burial history of southern Songliao Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* 39(03):353-360(in Chinese with English abstract).

- Hu, P., Yan, Q. S., Ye, S. X., et al., 2020. Application of the thorium-uranium ratio in identifying uranium metallogenic environment: An example of the Shulouqiu uranium deposit in northern Guangdong Province. *Geology and Exploration*, 56(1):0037-0048 (in Chinese with English abstract).
- Han, X. Z., Wu, Z. J., Lin, Z. X., et al., 2020. Constraints of Sedimentary Facies of the Targeting Layers on Sandstone-type Uranium Mineralization in Major Uranium-producing Basins in Northern China: A Brief Discussion. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(04):697-709 (in Chinese with English abstract).
- Jiao, Y. Q., Wu, L. Q., Rong, H., et al., 2021. Review of Basin Uranium Resources in China. *Earth Science*, 46 (08): 2675-2696 (in Chinese with English abstract).
- Jiao, Y. Q., Wu, L. Q., Rong, H., et al., 2022. Sedimentation, liagenesis and Uranium Mineralization: Innovative biscoveries and Cognitive Challenges in Study of Sandstone-Type Uranium Deposits in China. *Earth Science*, 47(10):3580-3602 (in Chinese with English abstract).
- Kai, W. M., Liang, X. J., Xiao, C. L., et al., 2021. Research on the identification and risk of shallow groundwater pollution sources in songyuan city. *China Rural Water and Hydropower*, (11):63-68 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. X., 2002. Geological Evolution History and Prospecting Direction of Sandstone Type Uranium Deposits in Songliao Basin. Beijing, Beijing Institute of geology of nuclear industry (in Chinese with English abstract).
- Lian, K., Zhao, X. Q., Wang, J.B., et al., 2020. Condition and Potential of Sandstone-type Uranium Meatallization in Yuqia Area, Northern Qaidam Basin. *Uranium Geology*, 36 (03): 145-155 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Wang, M. M., Qiu, Y. B., et al., 2017. Sedimentary facies and its control on uranium mineralization of down section of Badaowan Formation in Kujertai uranium mineral deposit. *China Mining Magazine*, 26(Sup)231-236(in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. J., Wang, D. P., Liu, L., et al., 1992. Sedimentary characteristics of the Cretaceous in Songliao Basin. *Acta Geological Sinica*, (04):327-338 (in Chinese with English abstract).
- Lou, Z. H., Cheng, J. R., Jin, A. M., 2006. Origin and Evolution of the Hydrodynamics in Sedimentary Basins—A case study of the Songliao Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, (02):193-201 (in Chinese with English abstract).
- Lou, Z. H., Jin, A. M., Zhu, R., et al., 2001. Formation and Evolution of the Hydrodynamic Field in the Songliao Basin. *Acta Geological Sinica*, (01):111-120 (in Chinese with English abstract).
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1984. Prediction of Some Weathering Trends of Plutonic and Volcanic Rocks Based on Thermodynamic and Kinetic Considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(7):1523-1534.
- Peng H., Jiao, Y.Q., Dong, F.S., et al., 2022. Relationships between uranium occurrence, pyrite and carbonaceous debris in Fuxin Formation in the Songliao Basin: Evidenced by mineralogy and sulfur isotopes [J]. *Ore Geology Reviews*. 140(1): 104580.
- Peng, H., Jiao, Y.Q., Rong, H., et al., 2023. Spatial-Temporal Coupling of Key Ore-Controlling Factors for Sandstone-Type Uranium Deposits in Tiefa Area, Songliao Basin. *Earth Science*, 49(9): 3182-3198. doi: 10.3799/dqkx.2023.073(in Chinese with English abstract).
- Peng, H., Jiao, Y.Q., Rong, H., et al., 2024. Spatial-Temporal Coupling of Key Ore-Controlling Factors for Sandstone-Type Uranium Deposits in Tiefa Area, Songliao Basin. *Earth Science*, 49(9):3182-3198(in Chinese with English abstract).
- Pan, S. X., Wei, P. S., Wang, T. Q., et al., 2011. Discovery of Easter Provenance in Songliao Basin and Its Implications on Petroleum Geology. *Natural Gas Geoscience*, 22(06):1021-1027 (in Chinese with English abstract).
- Quan, Z. G., 2003. The Division of Interl Formation Oxidized Zone Margins and Appraise of the Uranium Minerogenic Capacity. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 18(4):225-228 (in Chinese with English abstract).

- Roser, B.P., Korsch, R.J., 1988. Provenance Signatures of Sandstone-Mudstone Suites Determined Using Discriminant Function Analysis of Major-Element Data. *Chemical Geology*, 67(1-2):119-139.
- Sang, J. S., Zhang, Y. B., Chen, W. Y., et al., 2004. Neotectonic movement and its relation to uranium metallogenesis in central-southern Songliao basin and its adjacent areas. *Uranium Geology*, (04):219-224 (in Chinese with English abstract).
- Suttner, L. J., Dutta, P.K., 1986. Alluvial Sandstone Composition and Paleoclimate, I. Framework Mineralogy. *Journal of Sedimentary Research*, 56(3):329-345.
- Tong, S. M., Feng, Z.B., Zhang T. T., et al., 2023. Conditions and prospecting direction of uranium metallization in Sifangtai Formation in West of Kailu Depression, Songliao Basin. *Mineral deposits*, 42 (06): 1247-1265 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, F. S., Shi, G., Sun, Y. M., et al., 2008. Research on Sedimentary Microfacies of Fourth Section of Quantou Formation in Liangjing Gudian Area of Songliao Basin. *Journal of Peking University (NATURAL SCIENCE EDITION)*, (02):185-192 (in Chinese with English abstract).
- Wan, T., Liu, Z.J., Hu, F., et al., 2018. Sedimentary Characteristics of the Fluvial Sequence of upper Cretaceous Sifangtai Formation in north Songliao Basin. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 37(05):1-7 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. N., Fu, X. D., Zhao, C., et al., 2014. Reservoir forming mechanism and its main controlling factors of Fuyu layer in Liangjing area, southern Songliao basin. *Reservoir Evaluation and Development*, 4(02):24-28 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. H., Zhong, Y. Q., Tang, J. S., et al., 2007. An analysis of metallogenic geologic condition of leaching sandstone type uranium deposit in the Bei'an area, northern part of Songliao Basin. *Jilin Geology*, (02):16-22 (in Chinese with English abstract).
- Wei, Y. J., Xu, M., Yao Y. F., et al., 2004. Characteristic of hydrodynamic field and study on basic pattern of uranium metallogenesis in Songliao basin. *Uranium Geology*, (06):358-363 (in Chinese with English abstract).
- Yu, R. A., Sima, X. Z., Liu X. X., et al., 2019. Geological conditions of Uranium mineralization in coalfield area of Ordos basin. *Geological Review*, 65 (S1): 191-192 (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(06):321-332 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S., Liu, c., Hu, H. T., et al., 2021. Geochemical Characteristics and Provenance of Sandstones from Yaojia Formation in Central Depression of Southern Songliao Basin. *Geology and Resources*, 30 (05): 544-554 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. Q., Sang, J. S., Jin, C. Z., et al., 2006. Inversion structure and its contribution to sandstone uranium metallogenesis in southeast uplifted domain of Songliao basin, *Uranium Geology*, (03):151-156+181 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, F. M., 2017. Recognition on the Role of Reducing Action in Uranium Metallization. *Uranium Geology*, 33(4):193-214 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X. Q., Cui, S. K., Cai, Y., et al., 2021. Metallogenic Conditions and Prospecting Targeting of Sandstone-type Uranium Mineralization in Mahai Area, Northern Qaidam Basin. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(05):593-604 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, Y. Q., Li, J., Jiang, L. N., et al., 2010. Analysis on metallogenic condition of leaching sandstone uranium deposit in west slope of the north of Songliao Basin. *Jilin Geology*, 29(03):29-34+58 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X. M., Kang, A., Wang, G. W., 2003. Sequence Stratigraphic Models of Depression and Faulted-down Lake Basins. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21 (2):283-287 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 董方升, 彭虎, 张成勇, 等, 2023. 平庄盆地黑水地区氧化作用与铀成矿地质特征. 地质通报, 42(5):687-699.
- 付广, 王有功, 袁大伟, 2010. 三肇凹陷扶杨油层源断裂的再认识及其对成藏的控制作用. 石油学报, 31(05):762-766+773.
- 高瑞祺, 蔡希源, 等, 1997. 松辽盆地油气田形成条件与分布规律. 北京: 石油工业出版社.
- 郭巍, 于文祥, 刘招君, 等, 2009. 松辽盆地南部埋藏史. 吉林大学学报(地球科学版), 39(03):353-360.
- 胡鹏, 闫秋实, 叶松鑫, 等, 2020. 钍铀比值在判别铀成矿环境中的应用研究——以粤北书楼丘铀矿床为例. 地质与勘探, 56 (01): 37-48.
- 韩效忠, 吴兆剑, 林中湘, 等, 2020. 浅论中国北方主要产铀盆地含矿目标层沉积相对砂岩型铀矿的制约. 大地构造与成矿学, 44(04):697-709.
- 焦养泉, 吴立群, 荣辉, 等, 2021. 中国盆地铀资源概述. 地球科学, 46 (08): 2675-2696.
- 焦养泉, 吴立群, 荣辉, 等, 2022. 沉积、成岩与铀成矿: 中国砂岩型铀矿研究的创新发现与认知挑战. 地球科学, 47 (10): 3580-3602.
- 开伟萌, 梁秀娟, 肖长来, 等, 2021. 松原市浅层地下水污染源识别及风险研究. 中国农村水利水电, (11):63-68.
- 李浩, 陆建林, 左宗鑫, 等, 2015. 长岭断陷南部断陷层湖相优质烃源岩发育控制因素. 石油与天然气地质, 36(002):209-218.
- 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. 北京, 核工业北京地质研究院.
- 康康, 赵兴齐, 王继斌, 等, 2020. 柴达木盆地北缘鱼卡地区砂岩型铀成矿条件及成矿潜力分析. 铀矿地质, 36 (03): 145-155.
- 刘杰, 王毛毛, 邱余波, 等, 2017. 库捷尔太铀矿床八道湾组下段沉积相对铀成矿的控制. 中国矿业, 26(增刊 2):231-236.
- 刘招君, 王东坡, 刘立, 等, 1992. 松辽盆地白垩纪沉积特征. 地质学报, (04):327-338.
- 楼章华, 程军蕊, 金爱民, 2006. 沉积盆地地下水动力场特征研究——以松辽盆地为例. 沉积学报, (02):193-201.
- 楼章华, 金爱民, 朱蓉, 等, 2001. 论松辽盆地地下水动力场的形成与演化. 地质学报, (01):111-120.
- 潘树新, 卫平生, 王天琦, 等, 2011. 松辽盆地东部物源的发现及其石油地质意义. 天然气地球科学, 22(06):1021-1027.
- 彭虎, 2023. 松辽盆地东南缘砂岩型铀矿关键控矿要素时空耦合配置与“源—汇”系统重建. 中国地质大学, DOI:10.27492/d.cnki.gzdzu.2023.000177.
- 彭虎, 焦养泉, 荣辉, 等, 2024. 松辽盆地铁法地区砂岩型铀矿关键控矿因素的时空耦合. 地球科学, 49 (09): 3182-3198.
- 权志高, 2003. 层间氧化带边界类型划分与铀成矿潜力评价. 地质找矿论丛, 18(4):225-228.
- 佟术敏, 封志兵, 张婷婷, 等, 2023. 松辽盆地开鲁坳陷西部四方台组铀成矿条件及找矿方向. 矿床地质, 42 (06): 1247-1265.
- 桑吉盛, 张永保, 陈为义, 2004. 松辽盆地中南部及其邻区新构造运动与铀成矿. 铀矿地质, (04):219-224.
- 熊福生, 史调, 孙永梅, 等, 2008. 松辽盆地两井孤店地区泉头组四段沉积微相研究. 北京大学学报(自然科学版), (02):185-192.
- 万涛, 刘招君, 胡菲, 等, 2018. 松辽盆地北部上白垩统四方台组河流相层序沉积特征. 大庆石油地质与开发, 37(05):1-7.
- 王胜男, 付宪弟, 赵程, 等, 2014. 松辽盆地南部两井地区扶余油层油藏成藏机制及主控因素. 油气藏评价与开发, 4(02):24-28.
- 王世辉, 钟延秋, 唐金生, 等, 2007. 北安地区可地浸砂岩型铀矿成矿地质条件分析. 吉林地质, (02):16-22.
- 魏云杰, 许模, 姚毅锋, 等, 2004. 松辽盆地地下水动力场特征及铀成矿基本格架研究. 铀矿地质, (06):358-

363.

- 俞初安, 司马献章, 刘晓雪, 等, 2019. 鄂尔多斯盆地煤田区铀矿成矿地质条件. 地质论评, 65 (S1): 191-192.
- 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(06):321-332.
- 张森, 刘超, 胡慧婷, 等, 2021. 松辽盆地南部中央凹陷区姚家组砂岩地球化学特征及沉积物源. 地质与资源, 30 (05): 544-554.
- 张振强, 桑吉盛, 金成洙, 2006. 松辽盆地东南隆起区反转构造对砂岩型铀矿成矿的作用. 铀矿地质, (03):151-156+181.
- 赵凤民. 2017. 重新认识还原作用在铀成矿中的贡献. 铀矿地质, 33(4):193-214.
- 赵兴齐, 崔守凯, 蔡亚, 等, 2021. 柴达木盆地北缘马海地区砂岩型铀成矿条件及找矿方向. 地球学报, 42(05): 593-604.
- 钟延秋, 李佳, 姜丽娜, 等, 2010. 松辽盆地北部西斜坡地浸砂岩型铀矿成矿条件分析. 吉林地质, 29(03):29-34+58.
- 朱筱敏, 康安, 王贵文, 2003. 陆相坳陷型和断陷型湖盆层序地层样式探讨. 沉积学报, 21 (2): 283-287.