

开鲁盆地龙湾筒凹陷构造特征及砂岩型铀矿 找矿前景探讨

谈顺佳^{1, 2, 3)}, 于常青^{3)*}, 聂逢君^{1, 4)}, 陈振岩⁵⁾, 严兆彬^{1, 4)}, 里宏亮⁵⁾

1) 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西南昌 330013;

2) 东华理工大学地球物理与测控技术学院, 江西南昌 330013;

3) 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 4) 东华理工大学地球科学学院, 江西南昌 330013;

5) 中石油辽河油田新能源开发有限公司, 辽宁盘锦 124000

摘 要: 可地浸砂岩型铀矿指赋存于沉积盆地砂岩中的后生型铀矿床, 分布范围较广, 并且此类铀矿资源在世界铀资源所占份额越来越大, 是我国目前主要的工业铀矿化类型。松辽盆地是我国北方六大中生代盆地之一, 砂岩型铀矿成矿条件潜质好。一直以来是诸多铀矿地质研究者所关注的盆地, 其中以开鲁盆地最为典型, 特别是钱家店凹陷, 其含铀层位的地球物理特征明显, 与油伴生, 成矿远景好。本文主要对与钱家店凹陷毗邻的松辽盆地西南部的开鲁盆地哲中凹陷中的龙湾筒凹陷进行地球物理资料深入分析研究, 利用三维地震资料, 通过对含铀目的层地震属性特征的处理分析, 对研究区的构造形态、目的层物性变化及铀成矿前景进行初步预测, 圈定了有利铀成矿潜力区域, 为后续铀矿勘探和研究提供参考。

关键词: 铀矿资源; 开鲁盆地; 龙湾筒凹陷; 地球物理; 前景预测

中图分类号: P619.14; P631.4 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2021.111003

Structure Characteristics and Uranium-bearing Prospect of Longwantong Sinking, Kailu Basin

TAN Shun-jia^{1, 2, 3)}, YU Chang-qing^{3)*}, NIE Feng-jun^{1, 4)},
CHEN Zhen-yan⁵⁾, YAN Zhao-bin^{1, 4)}, LI Hong-liang⁵⁾

1) State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013;

2) School of Geophysics and Measurement-control Technolog, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013;

3) Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

4) School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013;

5) New Energy Development Co., Ltd., Liaohe Oilfield of CNPC, Panjin, Liaoning 124000

Abstract: In-situ leachable sandstone-type uranium deposits are epigenetic uranium deposits occurring in sandstones in sedimentary basins. These uranium deposits are widely distributed, and account for a significant share of the world's uranium resources. At present they are the main industrial uranium mineralization type in China. The Songliao basin is one of the six major Mesozoic and Cenozoic basins in North China. Within the Songliao basin is the Kailu Basin, which is a typical basin for uranium deposits, particularly the Qianjiadian deposit. The uranium bearing horizon in the basin has evident geophysical characteristics, and has a good metallogenic prospect. Moreover, it is also associated with oil. This study discusses the Kailu basin in the southwest Songliao basin in Longwantong sinking. Uranium mineralization and prospect was analyzed using geophysical data. To determine the morphology and physical properties of the uranium deposit, an analysis was conducted with 3D seismic data based on the uranium objective layer and seismic characteristics. Delineating the

本文由国家重点研发计划项目“北方砂岩型铀能源矿产基地深部探测技术示范”(编号: 2018YFC0604203)和国家自然科学基金项目(编号: U2067202)联合资助。

收稿日期: 2021-07-23; 改回日期: 2021-11-01; 网络首发日期: 2021-11-12。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 谈顺佳, 男, 1988 年生。博士研究生。主要从事勘探地球物理研究工作。E-mail: tshj123@yeah.net。

*通讯作者: 于常青, 男, 1962 年生。博士, 研究员。长期从事油气勘探的研究工作, 主要研究领域为地震资料处理解释、地震储层预测及综合评价、深部地球物理研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: geoyucq@qq.com。

potential locations for uranium mineralization provides a reference for subsequent uranium exploration and research in this area.

Key words: uranium resources; Kailu Basin; Longwantong sinking; geophysics; prospect forecast

能源的消耗和再生已经成为衡量国家的生产生活水平的重要标志。随着国家经济的发展,煤炭、石油和天然气的供需矛盾突出,其他能源很难在短期内大规模进行工业生产,相对而言,核能是一种在技术上成熟、安全、并且经济、清洁、最具潜力和发展前途的新能源,因此作为核电发展的原料,铀资源的稳定供应是核电发展的重要基础和前提(聂逢君等, 2013; 谈顺佳等, 2015)。铀矿资源一直是国家战略储备需求特种资源,在国家和行业内的大力支持下,不管是砂岩型还是花岗岩型等铀矿床,在勘查和开发中都取得了很大的进步。20 世纪 50 年代,我国开展了大量铀矿找矿勘探工作,发现了多种类型的铀矿床,其中花岗岩型和砂岩型是突破最早的两种类型(刘兴忠, 1982)。而砂岩型铀矿作为铀矿的重要组成部分,在我国的北方大、中型中生代盆地具有巨大的资源潜力,且以可地浸砂岩型铀矿为主。20 世纪 90 年代我国引进前苏联可地浸砂岩型铀矿成矿理论后,以层序地层学、沉积体系及盆地动力学理论为基础(孟兆涛, 2011; 聂逢君等, 2021),先后投入了巨大的人力物力从事砂岩型铀矿勘查研究工作,分别在松辽盆地、二连盆地、伊犁盆地、吐哈盆地、鄂尔多斯盆地找到了砂岩型铀矿。砂岩型铀矿采用可地浸开采技术,不仅保护了采矿区的环境,且大大降低了采冶成本,还使得开采大量的低品位矿石成为可能,扩大了砂岩型铀矿的经济规模(肖新建等, 2003)。结合地球物理、地球化学以及遥感等勘查方法技术的优势,成矿作用过程的复杂性决定了地球物理场的复杂多变性,因而针对砂岩型铀矿的成矿特点,建立一套快速有效勘查方法技术系统,具有很强的现实意义(吴慧山和谈成龙, 1997; 谈顺佳等, 2015)。

前人对研究区油气地质进行了较为详细的研究,其利用层序地质学,测井地质分析的方法,对含油层次类型做了较系统地研究,总结出研究区的地层划分以及含油地层做了刻画,对烃源岩丰度和演化过程,油气来源都做了详细的研究,提出了油气的有利聚集区。并且为了满足油气勘探的需求,辽河油田利用三维地震资料对其进行了构造研究,对构造演化进行了重点分析,为龙湾筒凹陷的有利区带优选和资源评价提供了基础资料,这也为后续开展铀矿勘查以及“油铀”兼探提供了思路,为该区合理的开采提供了依据(许晓宏等, 2000; 王建荣, 2000; 王志高和徐怀民, 2004; 徐乐意等, 2008; 王

成, 2015; 任平, 2015; 李明, 2014, 2016; 姜立, 2019a)。而对于研究区的碎屑岩储层的沉积模式和储层特征,徐小林和赵国柱等都做了些研究,其建立该区扇三角洲-滑塌浊积扇沉积模式,并表明龙湾筒凹陷的碎屑岩以砾岩、砂岩和泥岩为主,其储层的储集空间类型主要有粒间孔隙、粒内孔隙和裂缝,最有利的储集空间是粒间孔隙。龙湾筒凹陷九佛堂组碎屑岩分布广泛,且具有形成中小型油藏的能力,是辽河油区外围盆地勘探的新领域(周超等, 1999; 徐小林等, 2010; 赵国柱等, 2008; 胡启明, 2013; 姜立, 2019b)。针对砂岩型铀矿的地球物理勘探,主要在地震和测井方面,不少学者也做了相应的研究,其中李贺岩等使用了模型正演和照明分析方法进行了地震采集参数的优化,使得在龙湾筒凹陷的低信噪比地区的地震记录提高了剖面的效果。吴曲波等、雷安贵等对砂岩型铀矿的三维地震勘探进行了研究,调整测试各种参数,使得三维地震勘探采集的数据提高,为今后在砂岩型铀矿勘探中提供重要参考(秦积庚和谭庆江, 1990; 孟恩等, 2005; 李贺岩等, 2011; 谈顺佳等, 2015; 郑晓杰等, 2020; 雷安贵等, 2020; 吴曲波等, 2020)。

综上,笔者通过对研究区收集的三维地震资料进行处理解释,分析其地球物理响应特征,分析研究区的构造特征,提出该区可能的有利含铀砂岩体分布规模,并为后续相关单位部署地质钻孔提供更有利的地球物理证据参考。

1 研究区地质与地球物理概况

龙湾筒凹陷位于内蒙古自治区科尔沁左翼后旗,地跨通辽市、库伦旗,全区面积 1310 km²,属于松辽盆地西南部中开鲁盆地的三级构造单元之一,其大地构造以及盆地演化过程与松辽盆地有相似之处。松辽盆地按基地构造性质可分为七个一级构造单位,它们是北部倾没区、西部斜坡区、东北隆起区、中央拗陷区、东南隆起区、西南隆起区和开鲁拗陷区(许坤和李瑜, 1995; 赵忠华等, 1998; 聂逢君等, 2017)。研究区位于赤峰—开原断裂以北,西拉木伦河断裂的南北两侧,西面受限于红山—八里罕断裂北段(图 1a)。赤峰开原断裂位于辽河外围中生代盆地群分布的中部,沿华北板块北部边界分布,为华北板块与兴蒙造山带的分界线。西拉木伦河断裂时北部东西向阶梯带在地表的反映,点列以北的早白垩世断陷盆地群被晚白垩世的地层所覆盖。红

山—八里罕断裂呈北东向分布, 与上地幔隆起的西坡对应, 向北与嫩江断裂相接, 向南与太行山东麓断裂带相连, 是中国重要的梯度带的边缘, 控制着中国第二沉降带的分布。另外, 区内还发育通辽—凌海隐伏断裂, 该断裂位于钱家店凹陷西侧和医巫闾山隆起的西侧, 从开鲁盆地的中部北东—南西向错断穿过, 断裂两侧, 早白垩世断陷的走向和发育特征于断裂的两侧不同(罗毅等, 2012)。另据资料显示, 开鲁(拗陷)盆地内部划分出 5 个二级构造单元, 由西北往东南依次是西缘斜坡带(3000 km²)、陆家堡拗陷(2500 km²)、舍伯吐隆起(11 200 km²)、哲中拗陷(9300 km²)、哲东南隆起(7800 km²)。哲中拗陷进一步划分为奈曼凹陷、八仙筒凹陷、茫汉凹陷和龙湾筒凹陷(图 1b), 图中的蓝色方框即为本次研究

的区域, 即三维地震资料的区域。其龙湾筒凹陷的构造单元划分图, 如图 1c 所示。凹陷的走向以 NNE 向为主, 长约 68 km, 宽 14~40 km, 构造面积 1420 km²(许晓宏等, 2000)。

研究区的演化和发育特征和松辽盆地非常相似, 演化过程经历了初始张裂、伸展断陷、热降拗陷、褶皱萎缩和差异升降五个阶段(张训华, 1994; 李志安, 1995; 刘翠荣和陈发景, 1996; 高瑞祺和蔡希源, 1997), 开鲁盆地地层简表如表 1 所示。研究区出露的岩浆岩以海西期、燕山期酸性、中酸性侵入岩和火山岩为主, 其次为燕山期中性火山岩、基性超基性侵入岩及新近纪、第四纪玄武岩等。东部和南部地区以海西期侵入岩为主, 其次为燕山期侵入岩(图 2 所示)。海西期主要为海西中期(γ_4^2)、海西

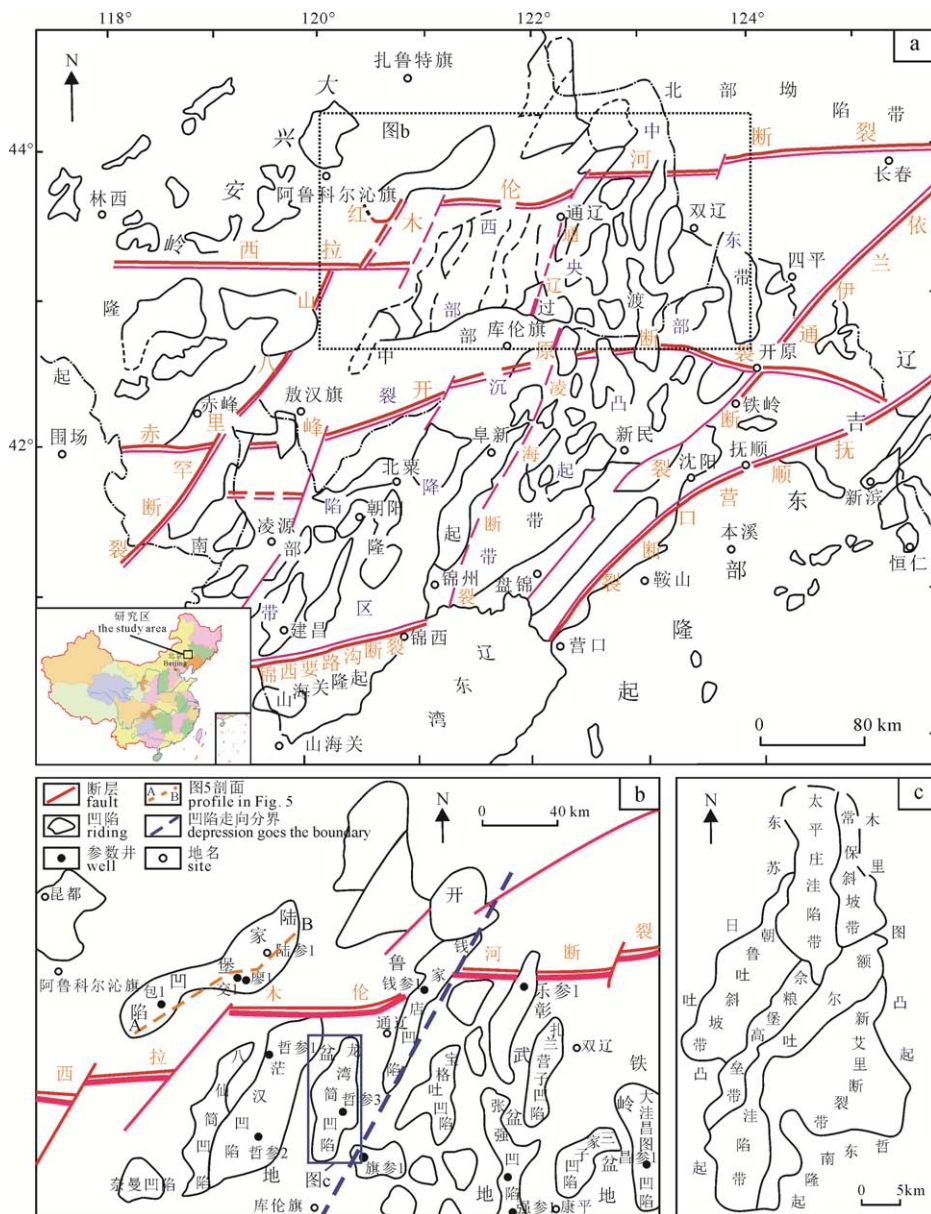


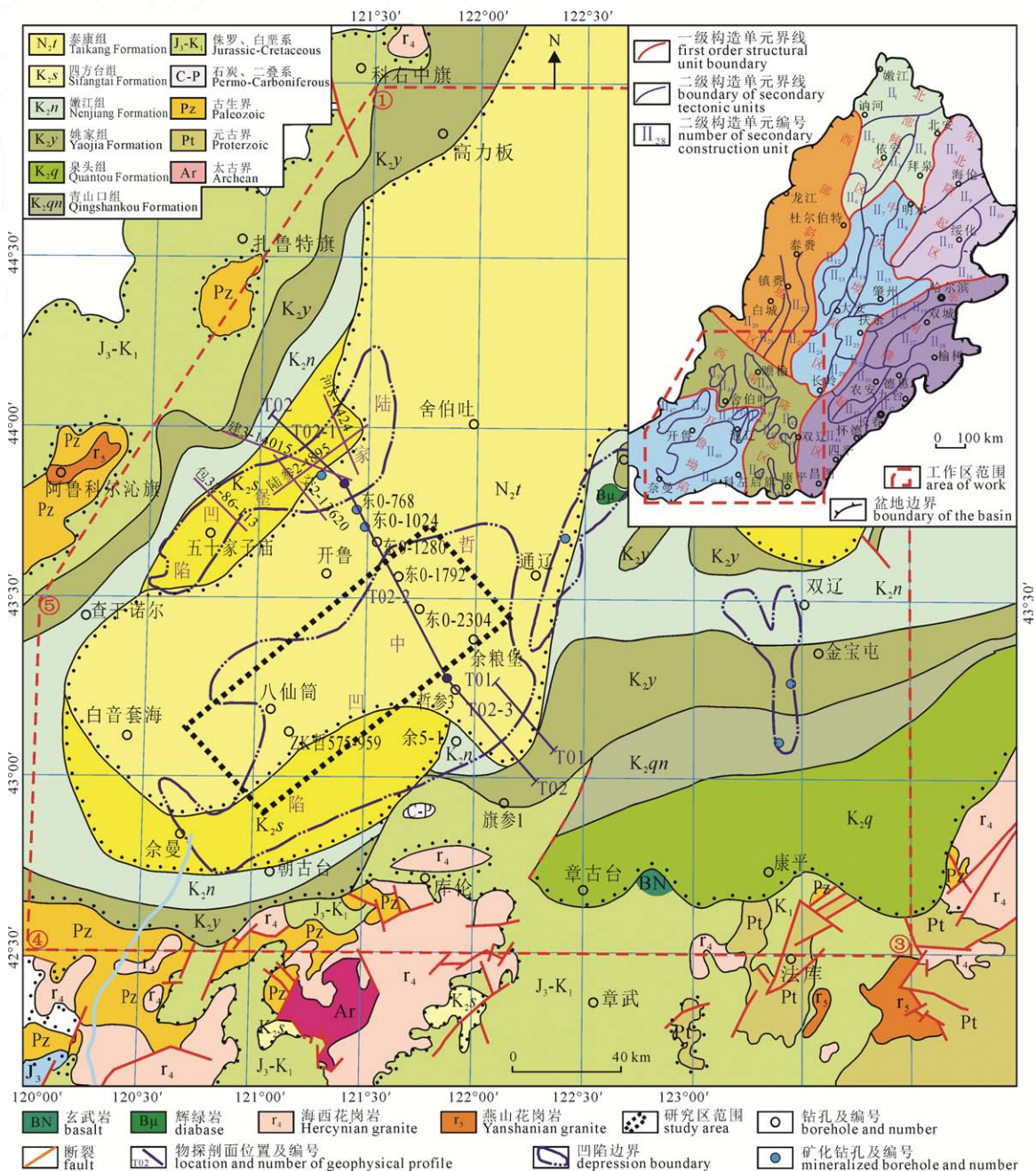
图 1 辽西及邻区中生代构造分区(a), 开鲁盆地区域构造(b)及龙湾筒内部构造单元的划分(c)
(据郑纪伟, 2010; 徐小林等, 2010 修改)

Fig. 1 Mesozoic tectonic division of western Liaoning and adjacent areas (a), regional tectonics of Kailu Basin (b), division of structural units inside Longwantong (c) (modified after ZHENG, 2010; XU et al., 2010)

晚期(γ_4^3), 常呈岩基状产出, 系多次侵入的复式花岗岩体。燕山期主要为燕山早期(γ_5^2)、燕山晚期(γ_5^3), 岩性规模较小, 分布零星, 往往受与断裂有关的裂隙控制。海西期花岗岩岩性为黑云母花岗岩等, 该类岩体在兴隆—协带和架玛吐一带出露。此外, 在钻探揭露过程中钻遇有辉绿岩, 常呈岩脉产出, 侵入到姚家组、嫩江组及嫩江组顶部, 应属燕山晚期岩浆活动产物。西部岩浆岩以燕山期酸性、中酸性

侵入岩为主, 其次为海西晚期(γ_4^3)侵入岩, 如阿鲁科尔沁期附近的燕山期岩体, 有较大面积的分布(张明瑜等, 2005)。

查阅相关资料, 本区针对铀矿研究的地球物理成果并不是很多, 大多数都是对盆地的结构和地层进行探讨(王建荣, 2000; 王志高和徐怀民, 2004; 徐乐意等, 2008; 王成, 2015; 任平, 2015; 李明, 2014, 2016; 姜立, 2019a), 并没有针对含铀储层的地球



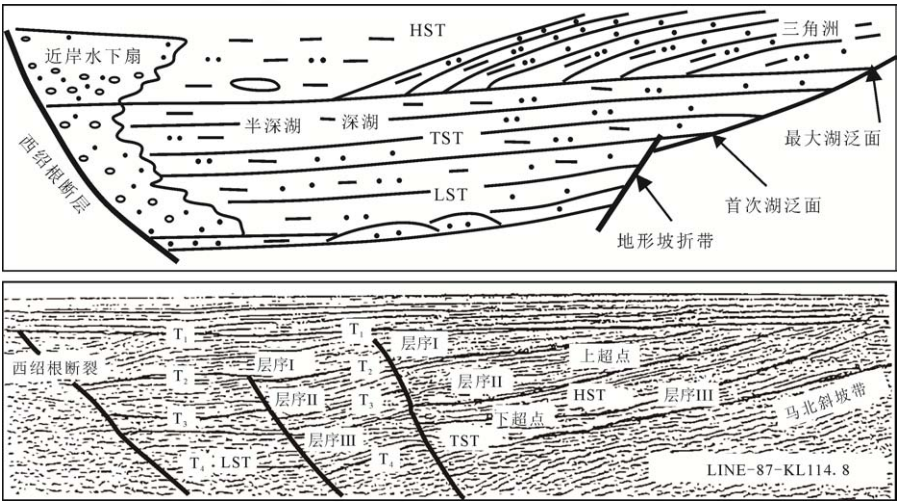
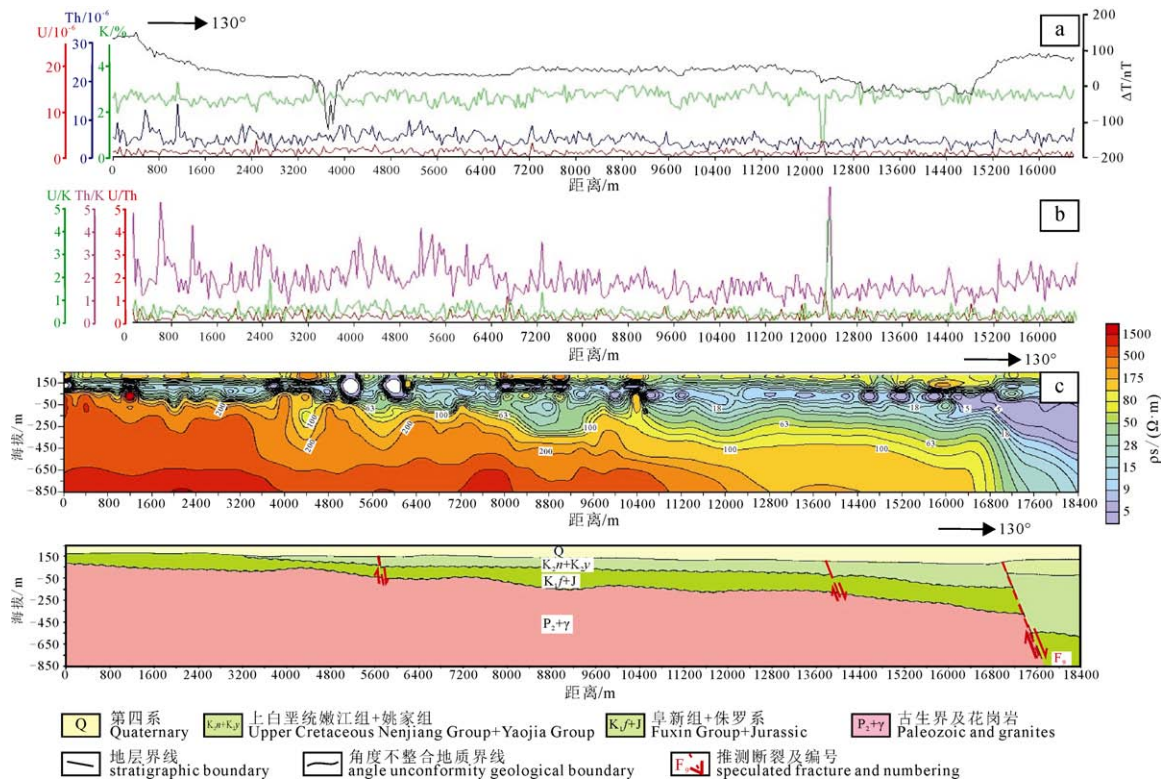
II₃₃—白音花凹陷; II₃₄—三棵树鼻状隆起; II₃₅—瞻榆凹陷; II₃₆—陆家堡凹陷; II₃₇—乌兰花凸起; II₃₈—钱家店凹陷;
II₃₉—架玛吐凸起; II₄₀—哲中凹陷; II₄₁—大林凹陷; II₄₂—巴彥塔拉凸起; II₄₃—金宝屯凹陷; II₄₅—呼勒斯诺尔凹陷;
II₄₆—张强凹陷; II₄₇—西缘斜坡区; II₄₈—舍伯吐凸起; II₄₉—哲东南凸起。
II₃₃—Baiyinhu depression; II₃₄—Sankeshu nose-like uplift; II₃₅—Zhanyu depression; II₃₆—Lujiapu depression; II₃₇—Orchid bulge;
II₃₈—Qianjiadian depression; II₃₉—Jiamatu bulge; II₄₀—Zhezhong depression; II₄₁—Dalin depression; II₄₂—Bayantala bulge;
II₄₃—Jinbaotun depression; II₄₅—Hulesinuor depression; II₄₆—Zhangqiang depression; II₄₇—West margin slope area;
II₄₈—Shebotu bulge; II₄₉—Zhe southeast bulge.

图2 通辽地区地质图(据张明瑜等, 2005 修改)

Fig. 2 Geological map of Tongliao area (modified after ZHANG et al., 2005)

表 1 开鲁盆地地层简表(据于文斌, 2009 修改)
Table 1 Brief table of Kailu Basin strata (modified after YU, 2009)

地层				符号	厚度 /m	岩性特征	古气候	沉积相	演化 阶段
系	统	组	段						
第四系				Q	0~143	上部为黄土或黑色腐殖土，中部为灰黄色松散砂层，下部为砂砾层	干温湿	冲积 洪积	
新近系	上新统	泰康组		N ₂ t	0~165	上部为灰黄、灰绿、棕黄色泥岩、砂砾岩；下部为黄灰色砂岩、砂砾岩	温湿	河流	差异 升降
	中新统	大安组		N ₁ d	0~123	上部为泥岩夹粉砂岩；下部为厚层灰、深灰色中砂岩、粗砂岩、砂砾岩、砾岩	半潮湿	河流	
古近系	渐新统	依安组		E ₃ y	0~244	上部杂色砂砾岩、砂岩夹灰色泥岩；下部灰黄色含砾砂岩夹灰、灰黑色泥岩及薄层褐煤	温湿	河流- 湖沼相	
白垩系	上统	明水组	明二段	K ₂ m ²	0~333	棕红、灰绿、灰色泥岩、砂质泥岩与灰绿色砂岩互层，韵律明显	干旱 ↑ 温湿	河流	褶皱 萎缩
			明一段	K ₂ m ¹	0~243	灰绿色砂岩、泥质砂岩与灰黑色泥岩构成正韵律			
		四方台组		K ₂ s	0~413	棕红色泥岩、粉砂质泥岩与灰白、灰绿色粉砂岩、砂岩互层。底部见杂色砂砾岩	干热	河流	
	中统	嫩江组	嫩五段	K ₂ n ⁵	0~116	杂色泥岩夹灰、灰绿色砂岩及粉砂岩	干热 ↑ 湿温	河流	热 降 坳 陷
			嫩四段	K ₂ n ⁴	20~100	由灰绿、灰白色砂岩、粉砂岩与灰绿色泥岩互层构成，下部出现暗色泥岩层		河流- 滨浅湖	
			嫩三段	K ₂ n ³	0~131	灰色砂岩、粉砂岩和浅灰色泥岩			
		嫩二段	K ₂ n ²	50~252	灰黑、深灰色泥页岩，局部夹薄层泥质粉砂岩、粉砂岩，底部有厚 8~15 m 的油页岩，为区域上的最重要的标志层	湿温	浅湖- 深湖		
		嫩一段	K ₂ n ¹	200	主要由砂岩、砂砾岩夹泥岩组成，部分地区为黑色泥页岩和油页岩，下部夹少量灰绿色粉砂质泥岩、粉砂岩		三角洲- 半深湖		
		姚家组	姚上段	K ₂ y ²	65~135	上部为砖红色、紫红色泥岩；下部以灰色细砂岩为主，见中砂岩、粗砂岩、泥岩，底部见泥砾岩	半干热	河流	
			姚下段	K ₂ y ¹	43~275	上部为砖红色、紫红色泥岩及浅黄、褐红色中粗砂岩；中部为灰色细砂岩、中砂岩和粗砂岩，夹砖红色、紫红色、灰紫色泥岩透镜体；下部为褐黄色中粗砂岩			
下统	青山口组	青二、三段	K ₂ qn ²⁺³	150~380	灰、灰绿色泥岩与黑褐色油页岩不等厚互层，上部发育棕红色泥岩	温湿	滨浅湖- 半深湖	伸 展 断 陷	
		青一段	K ₂ qn ¹	50~120	为黑色油页岩，顶部少量灰黑色泥岩，梨树断陷为灰绿色、紫红色泥岩，含黄铁矿结核，局部介形虫化石富集成层				
	泉头组	泉四段	K ₂ q ⁴	80~200	灰白色粗砂岩-粉砂岩，浅灰色细砂岩、粉砂岩与棕红色、紫红色泥岩互层	干热	曲流河		
		泉三段	K ₂ q ³	200~650	紫红色泥岩夹灰白、浅灰色中砂岩、粉砂岩		河流		
		泉二段	K ₂ q ²	40~350	以紫红色泥岩为主，夹浅灰、灰白色细砂岩、粉砂岩，局部地区砂质成分增多		河流- 浅水湖泊		
		泉一段	K ₂ q ¹	0~550	紫红、暗紫色泥岩与灰白色、浅灰色砂砾岩、粗砂岩、粉砂岩呈不等厚互层		冲积扇- 河流		
	阜新组		K ₁ f	0~1500	为一套灰白色含砾砂岩夹灰、灰绿、灰黑色泥岩及灰紫、暗紫色砂质泥岩	半干热	冲积扇- 浅湖		
	沙海组		K ₁ sh	300~600	上部为灰黑色泥岩与灰白色砂岩互层。下部为凝灰岩、凝灰质砂岩、火山岩、角砾岩与浅灰色砂砾岩、砂岩、灰黑色泥岩互层，多处见煤线	湿温	湖沼		
九佛堂组		K ₁ jf	0~900	深灰、灰黑色泥岩、粉砂质泥岩夹灰、灰白色砂砾岩，偶见凝灰质砂砾岩、凝灰质泥岩	湿温	湖沼- 深湖			
义县组		J ₃ y	> 1200	凝灰角砾岩、凝灰岩、安山岩、玄武岩夹凝灰质砾岩	半干热	火山喷发- 滨浅湖			
基 底				Pz γ	前古生代中深变质岩系、浅变质岩系和同期花岗岩				初 始 张 裂



物理特征进行详细分析。核工业 243 大队利用可控源音频大地电磁测深(CSAMT), 1:10000 地面伽玛能谱和高精度磁测数据联合制作了跨开鲁盆地 5 个二级构造单元的综合剖面。CSAMT 的点距为 200 m, 伽玛能谱和高精度磁测点距为 40 m。共测制剖面 2 条。根据对 T02-1 剖面的解释, 剖面西起开鲁盆地

的西缘斜坡, 跨过陆家堡坳陷, 舍伯吐隆起、哲中坳陷和哲东南隆起 5 个二级构造单元, 在盆地的结构研究中具有很好的代表性, 如图 3 所示。

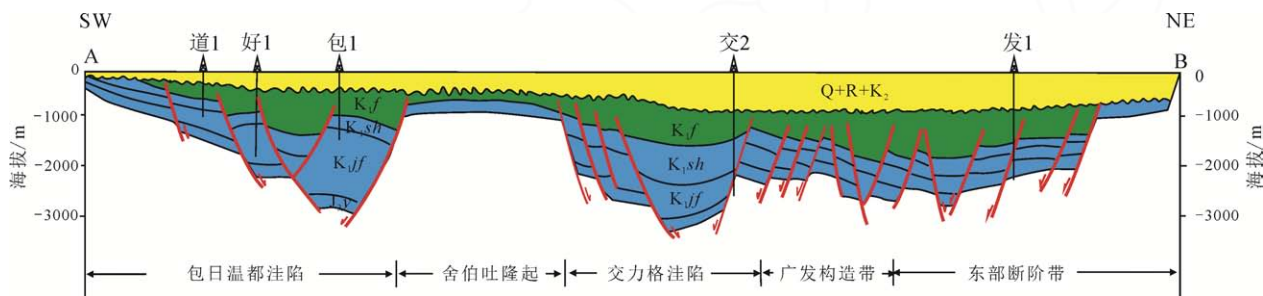
石油部门在开鲁盆地做了大量的地震勘探工作, 通过地震资料对盆地的结构和油气的生储盖组合关系做过详细的研究。图 4 为朱筱敏等(2002)

在开鲁盆地陆西凹陷所做的层序地层划分。从地震剖面上可知, 陆西凹陷的“断-坳”双层结构十分明显, T_1 之下为断陷期早白垩世地层, 多数断层终止在 T_1 上, 一些断层活动终止在 T_2 上, 表明断陷期, 断层活动, 北西边的陡坡发育近岸水下扇; 而南东边的缓坡上发育三角洲沉积, 凹陷中心主要是深湖-半深湖相沉积。从图中总体看出, 地震同相轴连续且平直, 无上超、下超、削截现象, 推断沉积以河流相或湖泊相为主, 这与电法所获得的解释基本一致。开鲁盆地西部坳陷中的断层多数为正断层, 多组倾向相反的正断层活动造成了盆地的堑垒式结构(图 5), 因此, 在舍伯吐隆起的地垒处, 基底埋深不到 1000 m, 而它两侧的包日温都洼陷和交力格洼陷的地堑处, 基底埋深超过 3000 m。另外, 凹陷边缘和部分中心地带明显发育断层, 根据地层错断关系分析判断, 大部分为正断层, 而且最要发育在早白垩世时期, 有些断层在晚白垩世以后重新活动, 这为盆地中油气的上升运移提供了良好的通道, 砂岩型铀矿的油气还原作用可能与这些断层的活动有关。这为本文龙

湾筒凹陷区的地震资料研究以及含铀前景预测提供了参考。

2 构造特征分析

地震勘探作为一种高精度的物探方法, 可以在主要层段和构造段通过高分辨率的地震响应, 清晰地看到地层的错段以及断裂情况, 已经成为了地质构造和层位分析的重要手段(肖玲, 1982; 陈程, 2018), 而三维地震勘探可以更好地分析和刻画构造特征, 并在利用诸多的方法进行特殊的分析, 在实际应用中取得了很好效果(董文等, 2011; 林羽和王燕, 2013; 何鑫, 2015)。近些年来, 为了提高砂岩型铀矿的找矿效果, 解决地层、岩性、岩相划分和断裂构造解释等问题, 地震勘探方法已应用于铀矿勘查工作中, 并取得了可观的地质效果, 其中以开鲁盆地钱家店凹陷最为典型, 如图 6 所示, 为过 Q7 井的典型三维地震剖面。从图中可以看出, 区内构造发育, 主断裂和次级断裂比较丰富, 构造断裂控制下形成了通道, 有助于下层的流体运移至上层, 在特定的盖层下, 形成良好成矿区域。

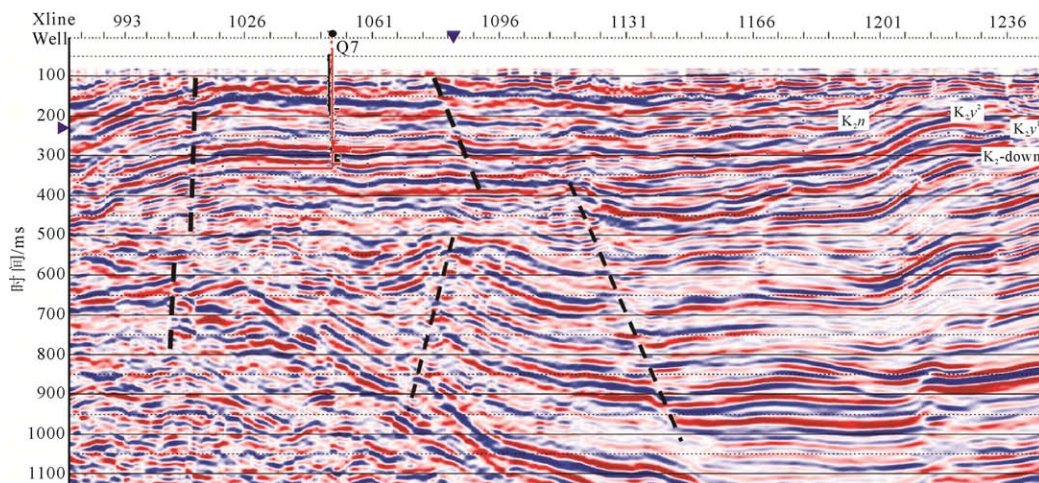


J_{3y}—义县组; K_{1jf}—九佛堂组; K_{1sh}—沙海组; K_{1f}—阜新组; Q+R+K₂—上白垩+古近系+第四系。

J_{3y}—Yixian Formation; K_{1jf}—Jiufotang Formation; K_{1sh}—Shahai Formation; K_{1f}—Fuxin Formation; Q+R+K₂—Upper Cretaceous + Paleogene + Quaternary.

图 5 沿陆家堡坳陷走向的综合解释剖面(据吴兆剑等, 2018 修改)

Fig. 5 Comprehensive interpretation section along the strike of Lujiapu depression (modified after WU et al., 2008)



K_{2n}—嫩江组; K_{2y2}—姚家组上段; K_{2y1}—姚家组下段; K_{2-down}—上白垩基底。

K_{2n}—Nenjiang Formation; K_{2y2}—Upper member of Yaojia Formation; K_{2y1}—Lower member of Yaojia Formation; K_{2-down}—bottom of Upper Cretaceous.

图 6 开鲁盆地钱家店凹陷过 Q7 的三维地震剖面

Fig. 6 3D seismic profile of cross well Q7 in Qianjiadian depression Kailu Basin

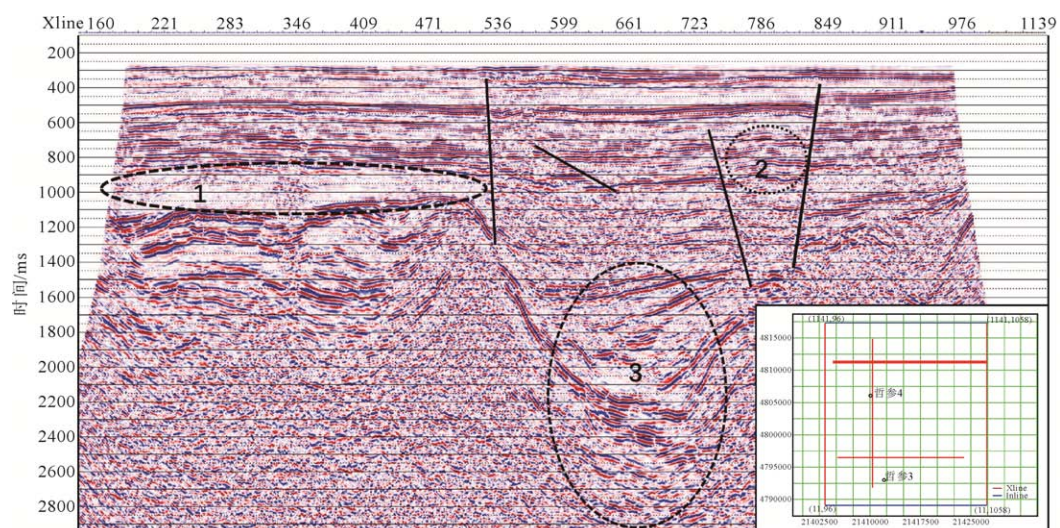


图 7 龙湾筒三维地震剖面 Inline-440 线

Fig. 7 Inline-440 line of 3D seismic profile of Longwantong sinking

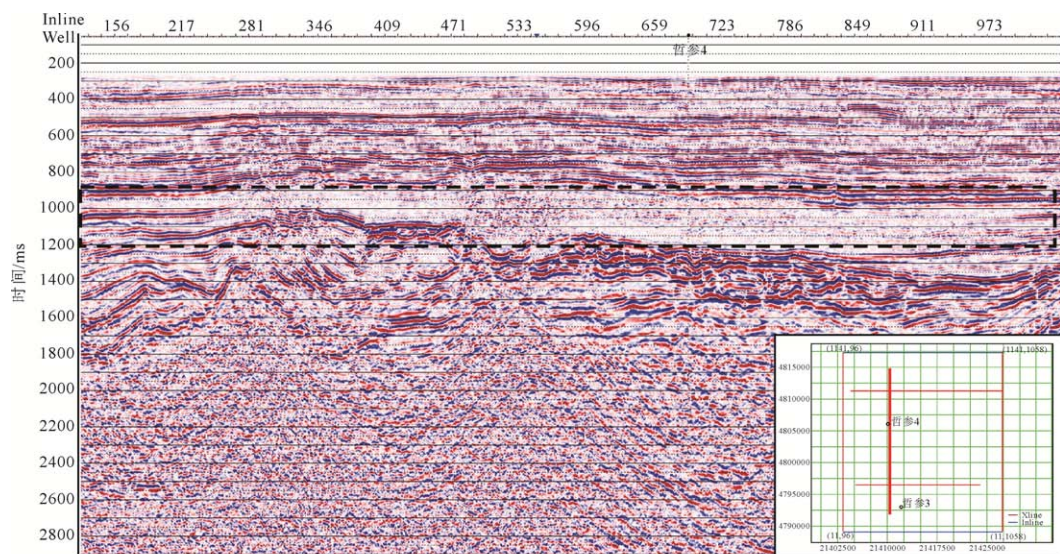


图 8 龙湾筒凹陷三维地震剖面 Xline-377 线

Fig. 8 Xline-377 line of 3D seismic profile of Longwantong sinking

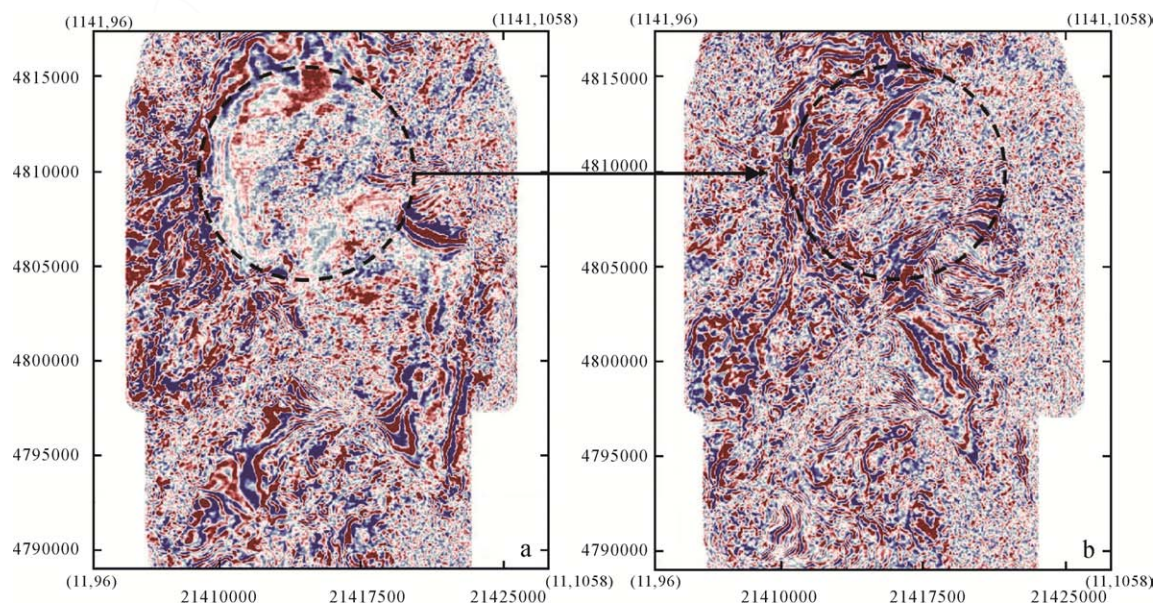


图 9 龙湾筒凹陷三维地震属性切片 1200 ms(a)和 1500 ms(b)

Fig. 9 3D seismic attribute slice of Longwantong sinking 1200 ms(a) and 1500 ms(b)

本文对龙湾筒凹陷三维地震资料进行了处理表明,图 7 中可以看出主断裂和次级断裂发育,控制着全区。在这样的断裂控制下,形成了深部气源或物质的运移通道,为成矿提供基础条件,与钱家店凹陷有相似之处。根据地质资料显示,区内岩性主要为火山岩、碳酸碎屑岩,岩浆岩等。从地震剖面可以区域 1 为波阻抗中等偏弱,成层性较差,表现为火山喷出岩特征。区域 2 是为断裂控制区,表现为砂泥岩互层沉积特征,也是砂岩型铀矿成矿的最好区域。区域 3 为断裂控制的凹陷区,比较破碎,也是为深层烃源岩或气体提供往上运移的通道。从整体上来看,本区断裂发育,构造控制作用强;火山岩和碎屑岩特征明显;有构造形成的运移通道,以及上层有盖层,波阻抗连续性较好,为深层成油、浅层成铀提供了基础条件。图 8 为纵向剖面显示,图中黑虚线框内,为火山岩的控制区,在控制区上层的地层沉积比较好,层位之间的次级断裂以及构造比较发育。

从图 9 可以看到,在工区北侧存在一个断裂控制的沉积拗陷,主要岩性为火山喷出岩,是良好的油气储层,而更深的切片显示深层火山岩发育,深度大约 2100 m,而且沉积基底断裂发育,这为油气运移提供了有利通道。

3 铀矿前景分析

基于地球物理资料进行铀成矿预测不少学者做了很多研究,吴曲波等利用三维地震构造精细解释技术、拟声波地震反演砂体识别技术、三维地震属性特征分析技术等综合研究砂岩型铀矿成矿地质环境,并预测了研究区砂岩铀成矿有利区段,与实际钻孔资料有较好的吻合。这也提供一种新的砂岩型铀矿成矿预测的思路和方法,具有较好的应用前景(吴曲波等, 2018)。刘燕戌等(2021)利用航磁和重力资料系统地分析了断裂、背斜、岩浆岩等铀成矿的地质要素特征,结合了铀矿化资料,进行了松辽盆地西部的铀成矿远景预测,为下一步勘探部署提供了参考。地震记录是地震波传播过程的记录,反映的是地下存在波阻抗差异的地层变化,地震响应可能是不同沉积模式产生的,地震振幅,频率的变化反映的是否是同一地层的岩性变化,这需要根据地质沉积模式确定。从地震资料出发,以测井资料和钻井数据为基础。前人研究表明,钱家店铀矿体产于姚家组下段和姚家组上段,分别赋存有 3 层矿体,矿体形态简单,主要呈板状、透镜状或饼状,矿体稳定性较好。矿化埋深 200~290 m,矿层平均厚度为 7.35 m,铀矿化平均品位为 0.0273%,平均每

平米铀量为 3.72 kg,为中等规模的砂岩型铀矿床。姚家组含矿砂体上下发育稳定的泥岩隔层,即青山口组顶部泥岩层、姚家组下段顶部泥岩层和姚家组上段顶部泥岩层。三层区域性分布的紫红色泥岩把姚家组含矿地层分为上下两个含矿层,即姚家组下段含矿层(姚下段含矿砂体)和姚家组上段含矿层(姚上段含矿砂体)。含矿岩石主要是细粒岩屑长石砂岩,矿石中铀主要呈吸附状态,少量铀矿物主要是沥青铀矿。确定与铀矿化伴生的微量元素主要是铯,并达到工业综合利用的指标。而钱家店凹陷含铀储层在地震资料上显示的特征(相对于泥岩)为:高速度、中低频率(相对)、中等偏上振幅(谈顺佳等, 2015, 2016, 2019, 2020; 吴曲波等, 2018; 李翀等, 2017; 郑晓杰等 2020),如图 10 所示。这些特征表示为:确定了赋矿砂体的地震响应特征:两低一高,即:低电阻率、低速度、高伽马值(电阻率和速度低都是相对同类型不含铀砂岩而言)、中低频、振幅强度中等偏上。

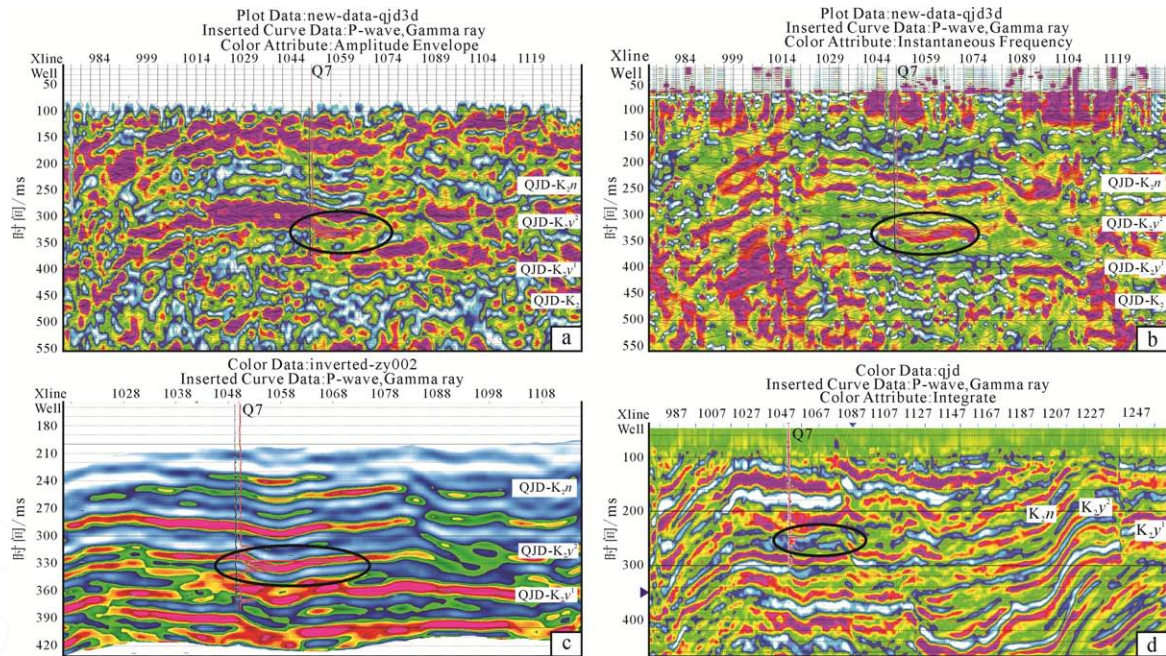
笔者在钱家店铀成矿特征分析的基础上对龙湾筒的三维地震资料进行了处理解释,并对其含铀特征进行了比对分析,从构造以及地震资料显示的特征进行研究区的前景预测。对其过哲参 3 井的包络振幅和瞬时频率剖面进行了分析,图 11 和图 12 显示,在 490~560 ms 之间振幅包络特征由中弱向强振幅靠近,瞬时频率由中高频向中低频靠近,且穿过整个层位后又变成杂乱无章的中高频。这也说明泥岩砂岩互层,并且在砂岩中含有强振幅、中低频率的介质。根据地质特征和前人研究(与钱家店含铀储层地球物理特征进行对比),表明砂岩可能中含铀。从包络振幅和瞬时频率剖面中看本区断裂发育,构造清晰,岩性振幅频率特征明显,含铀岩型特征为:强振幅、中低频率(相对于围岩),具有成铀成矿的前景。

根据前面分析含铀地层的地震频率响应特征,笔者对地震属性剖面进行纵向切片显示,通过分析这样的地震响应特征变化趋势,来预测可能含铀的前景,同时根据频率切片等属性特征预测可能的含铀区域。图 13 和图 14 所示为振幅包络和瞬时频率的时间切片,根据分析包络振幅选择 500 ms 和 600 ms 进行切片,瞬时频率所选的切片位置分别为 573 ms、600 ms 和 627 ms。可以看出,包络振幅切片在 500~600 ms 变化比较突出,600 ms 的切片强振幅突出,如 I 类区。瞬时频率在第 I 区内,573 ms 的切片上表现的为高频,这可能是致密性较好得砂岩或泥岩;中低频率在 600 ms 表现最好,这可能是砂泥岩中含铀的表现;在 627 ms 表现的很弱,越往

深, 含铀的特征逐渐变弱甚至消失, 可能与深部的断裂控制较多, 没有较好地成铀的条件有关, 这与前面的构造分析相对应。第 II 区块内, 在这三个深度的切片中, 频率表现的都比较好。同样在 600 ms 位置时, 特征最好, 具有含铀的前景。根据资料收集, 第 II 区块内包含很多油田钻井, 其中图中黑色的圆圈点是哲参 3 井的位置。上述图 11 的包络振幅分析剖面中, 哲参 3 井在 500~600 ms 之间的振幅变化较大, 中低振幅-强振幅-中低振幅的变化趋势,

频率切片上显示的高频率-中低频率的趋势, 这与钱家店凹陷含铀储层的地球物理特征: 强振幅、中低频率的地震响应特征相匹配(谈顺佳等, 2015)。

综上所述, 笔者认为本研究区的含铀前景可分为两个区域, 如图 14 所示, 分为 I 类有利成矿远景区, II 类潜在成矿区。在地震剖面的 600 ms 位置, 深度 600~700 m 之间, 具体深度需结合油田部门的更进一步资料来确定, 这为后续钻孔位置设计提供了科学依据。



a—瞬时振幅剖面; b—瞬时频率剖面; c—波阻抗剖面; d—道积剖面; K_2n —嫩江组; K_2y^2 —姚家组上段; K_2y^1 —姚家组下段。
a—instantaneous amplitude profile; b—instantaneous frequency profile; c—wave impedance profile; d—channel integral profile;
 K_2n —Nenjiang Formation; K_2y^2 —Upper member of Yaojia Formation; K_2y^1 —Lower member of Yaojia Formation.

图 10 钱家店凹陷过 Q7 井地震属性剖面

Fig. 10 Seismic attribute profile of cross well Q7 in Qianjiadian depression

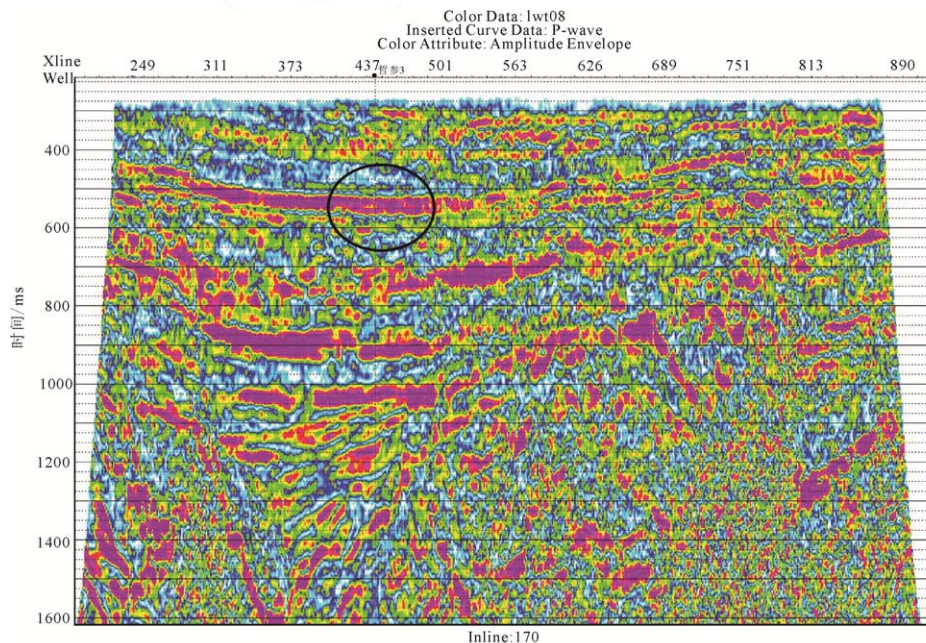


图 11 龙湾筒凹陷过哲参 3 井的 Inline 包络振幅剖面

Fig. 11 Inline envelope amplitude profile of cross well ZC3 in Longwantong sinking

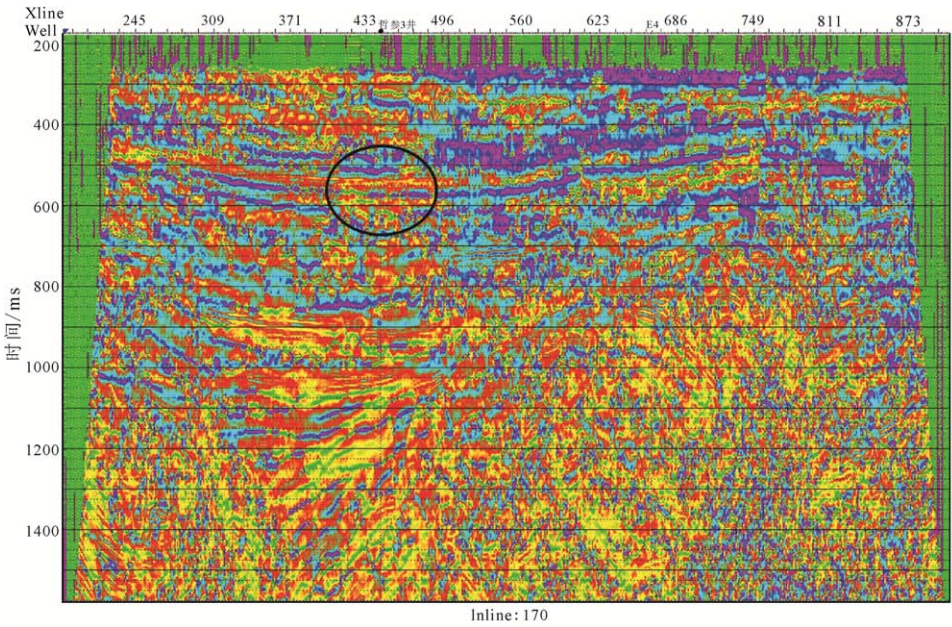


图 12 龙湾筒凹陷过哲参 3 井的 Xline 瞬时频率剖面
Fig. 12 Xline instantaneous frequency profile of cross well ZC3 in Longwantong sinking

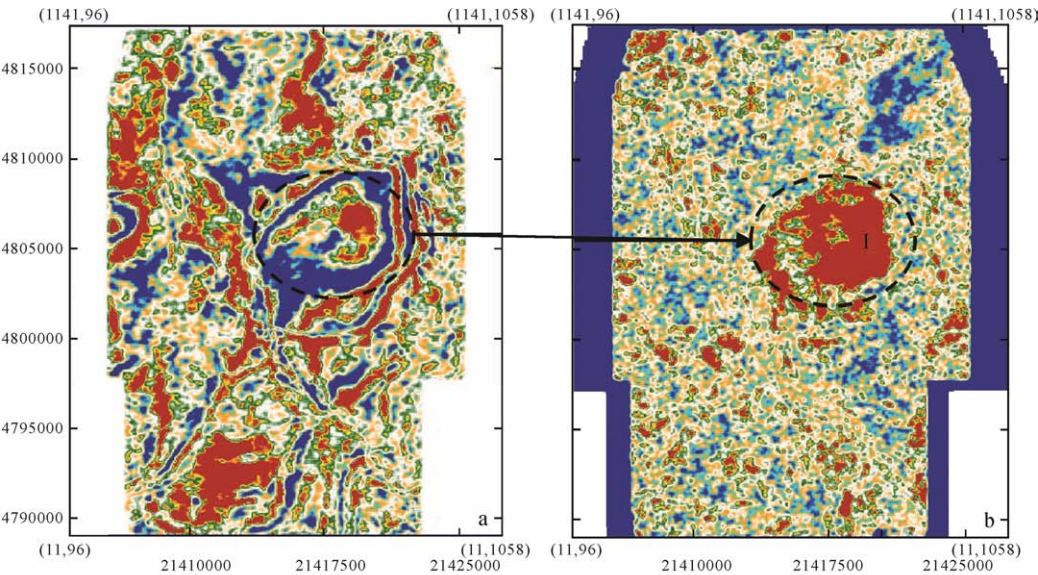


图 13 500 ms (a)及 600 ms (b)包络振幅切片
Fig. 13 Envelope amplitude slice of 500 ms(a) and 600 ms (b)

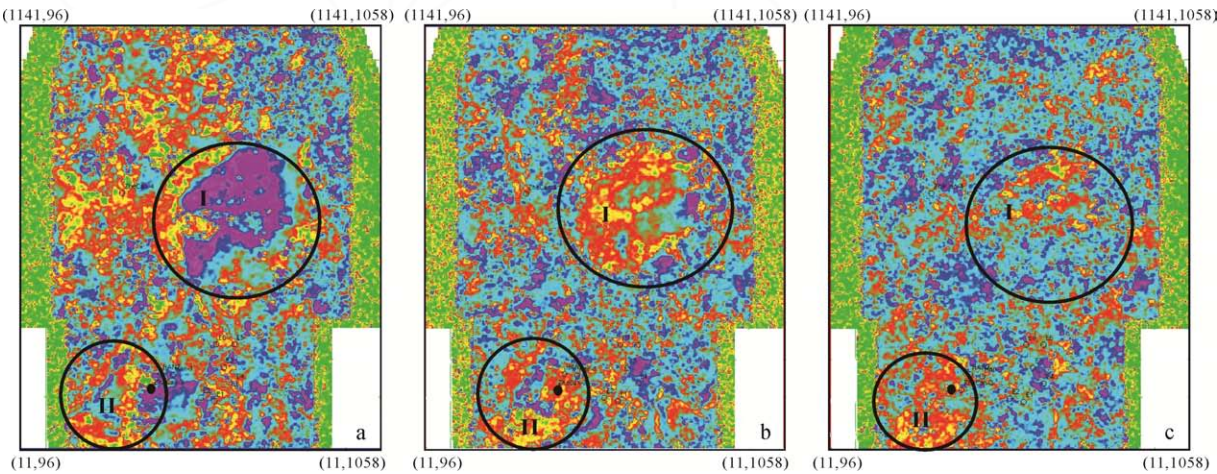


图 14 573 ms (a)、600 ms (b)、627 ms (c)瞬时频率切片
Fig. 14 Instantaneous frequency slice of 573 ms (a), 600 ms (b), and 627ms (c)

4 讨论

前人的研究关注点都在油气的发育和储层方面,并没有对三维反射地震资料浅层的地质体演化和其他关键金属成矿特征进行分析。本文的一些认识和结论都是对地质体的构造特征和成矿特征进行分析基础上得出的。通过前述对龙湾筒凹陷的地震资料分析,笔者总结出几点研究意义供讨论:(1)通过地球物理资料的分析,验证了本区的火山活动的存在。传统的储层特征与热液活动的关联性很少,但在本区地震剖面中可以很好反映出浅部火山岩层位顺层的变化以及在断裂控制通道下,深层热液和气体穿层到上覆地层的特征。以白垩系地层最为典型,从属于构造演化的热降拗陷中的泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组的于热液有紧密联系,形成氧化-还原-氧化的环境。(2)松辽盆地内同期存在的岩浆岩的类型和性质,和从地震剖面上,可以看出龙湾筒凹陷的伸展盆地中双峰式火山岩特征的相似性也是值得探讨。火山岩的地层储层信息,对油气有很重大的意义,同时与穿层有很密切的关系。火山岩连同热液活动穿导作用,在这样的情况,可能会导致金属铀以及其他战略资源锂、铯等富集成矿,并且之间存在着互相伴生关系。(3)钱家店凹陷的铀油的气源来自于深部流体,而龙湾筒的气源在层序上应该也是同属于深部流体。(4)铀-油气“多矿兼探”的思路可为国家减少勘探的成本,提高利用效率,并为科学研究提供了指导方向,为国家的战略定位提供了基础。

由于缺乏地层资料和测井资料,并未对其地质模型建立和多参数的约束进行反演,后续将继续收集相关的地质和地球物理资料,进行多方面多参数的解释和战略资源成矿区的远景预测和推断,为国家相关研究部门提供更为有价值的信息。并可凭借已获得 2018 年十大找矿成果的钱家店铀矿床的“油铀兼探,一矿变多矿”的思路,铀矿的综合分析方法体系的指导下,争取在龙湾筒凹陷实现重大突破,为我国天然铀通辽大基地建设奠定坚实的资源基础。

5 结论

综上所述,笔者得出以下结论:

(1)龙湾筒凹陷的铀矿床成铀特征为“两低一高二中等”,即:低电阻率、低速度、高伽马值(电阻率和速度低都是相对同类型不含铀砂岩而言)、中低频率、振幅强度中等偏上。

(2)凤阳堡地区及哲参 3 井区为两个有利含铀特征异常的远景区。周边断裂发育、构造部位偏低、

地震能量较强、频率略低的特征,这与钱家店凹陷铀成矿特征相匹配。

(3)“油铀兼探”以及以油气为基础的多金属矿可以使龙湾筒凹陷的油气田“一矿变多矿”。

致谢:感谢中石油辽河油田新能源开发公司和核工业 243 大队在资料收集上给予的支持和帮助,感谢审稿专家提出的宝贵建议。

Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research & Development Program of China (No. 2018YFC0604203), and National Natural Science Foundation of China (No. U2067202).

参考文献:

- 陈程. 2018. 松辽盆地通辽地区构造特征与铀成矿作用研究[D]. 北京:核工业北京地质研究院: 38-46.
- 董文,符力耘,肖又军,管西竹,吴超. 2011. 库车拗陷高陡构造地震勘探复杂性定量分析[J]. 地球物理学报, 54(6): 1600-1613.
- 高瑞祺,蔡希源. 1997. 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: 30-40.
- 胡启明. 2013. 龙湾筒凹陷沉积相特征研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, (22): 167-192.
- 何鑫. 2015. 三维地震勘测技术在高庄煤矿构造探测中的应用分析[J]. 煤炭与化工, 38(9): 62-64.
- 核工业 243 大队. 2015. 内蒙古通辽地区地浸砂岩铀矿目的层沉积体系与铀成矿条件研究调查报告[R]. 内蒙古:核工业 243 大队.
- 姜立. 2019a. 龙湾筒凹陷三维区烃源岩特征及评价[J]. 承德石油高等专科学校学报, 21(4): 1-4.
- 姜立. 2019b. 龙湾筒凹陷九佛堂组火山岩岩相特征研究[J]. 河北地质大学学报, 42(4): 20-24.
- 李明. 2014. 龙湾筒凹陷构造特征及演化[J]. 承德石油高等专科学校学报, 16(6): 1-4.
- 李明. 2016. 龙湾筒凹陷低熟油特征及成藏条件[J]. 油气藏评价与开发, 6(2): 6-10.
- 李贺岩,王清岩,杨大为,王海波. 2011. 正演照明方法在龙湾筒地区地震观测系统优化中的应用[J]. 科学技术与工程, 11(20): 4699-4704.
- 雷安贵,孙章庆,董兵波,高树生. 2020. 砂岩型铀矿勘探的浅层三维地震资料针对性处理方法[J]. 世界地质, 39(4): 888-895.
- 罗毅,何中波,马汉峰,孙祥. 2012. 松辽盆地钱家店砂岩型铀矿成矿地质特征[J]. 矿床地质, 31(2): 391-400.
- 李志安. 1995. 松辽盆地地幔热流的演化特征[J]. 大地构造与成矿学, 19(2): 104-112.
- 刘翠荣,陈发景. 1996. 裂谷盆地的理论模拟——以松辽盆地为例[J]. 石油实验地质, 18(3): 274-282.
- 林羽,王燕. 2013. 三维地震解决山区煤层赋存构造问题的分析[J]. 煤炭与化工, 36(6): 5-7.

- 刘燕戌, 路文芬, 杨冬红. 2021. 基于重磁资料的铀矿预测研究——以松辽盆地西部为例[J]. 地球学报, 42(1): 63-73.
- 李翀, 于常青, 聂逢君, 周宇, 陈鹏, 田伟. 2017. 井震联合反演技术在砂岩型铀矿找矿中的应用研究[C]//2017年中国地球科学联合学术年会论文集(十七): 617-618.
- 刘兴忠. 1982. 我国铀矿床类型和地质矿化特征[J]. 核科学与工程, 2(1): 81-86.
- 孟兆涛. 2011. 砂岩型铀矿成矿地质条件[J]. 科技广场, (10): 180-182.
- 孟恩, 徐刚, 沈财余, 王慧. 2005. 约束地震反演中测井数据的标准化及储层的精细标定[J]. 石油地球物理勘探, 40(2): 226-232.
- 聂逢君, 严兆彬, 林双幸, 张成勇, 陈跃辉, 刘庆成. 2013. 非洲尼日尔特吉达地区铀成矿作用于预测[M]. 北京: 地质出版社: 1-8.
- 聂逢君, 严兆彬, 夏菲, 李满根, 卢亚运, 蔡建芳, 郭福能, 宁君. 2017. 内蒙古开鲁盆地砂岩型铀矿热流体作用[J]. 地质通报, 36(10): 1850-1866.
- 聂逢君, 严兆彬, 夏菲, 何剑锋, 张成勇, 封志兵, 张鑫, 杨东光, 陈梦雅, 谈顺佳, 张进, 康世虎, 宁君, 杨建新, 申科峰, 蔡建芳. 2021. 砂岩型铀矿的“双阶段双模式”成矿作用[J]. 地球学报, 42(6): 823-848.
- 秦积庚, 谭庆江. 1990. 铀矿层真实厚度的确定和最佳测井点距[J]. 地球物理学报, 33(4): 468-479.
- 任平. 2015. 龙湾筒凹陷烃源岩地球化学特征与评价[J]. 内蒙古石油化工, (14): 89-91.
- 谈顺佳, 于常青, 聂逢君. 2019. 利用地球物理资料分析鄂尔多斯盆地含铀储层特征[C]//2019年中国地球科学联合学术年会论文集: 504-505.
- 谈顺佳, 于常青, 聂逢君, 张平川, 郑晓杰. 2020. 地球物理资料在鄂尔多斯盆地西南部含铀储层分布的应用研究[C]//2020年中国地球科学联合学术年会论文集: 1601-1602.
- 谈顺佳, 于常青, 聂逢君, 钱鹏, 周宇, 殷栋法. 2016. 地震勘探方法在砂岩型铀矿预测中的应用研究[C]//中国地球科学联合学术年会论文集: 535-536.
- 谈顺佳, 于常青, 聂逢君, 雷安贵, 周宇, 王瑞雪, 伍群. 2015. 有利含铀砂岩体的地球物理响应特征研究——以松辽盆地钱家店铀矿床为例[J]. 地球物理学进展, 30(3): 1361-1370.
- 吴曲波, 黄伟传, 乔宝平, 李子伟, 曹成寅. 2020. 砂岩型铀矿三维地震勘探采集关键技术及效果[J]. 地球物理学进展, 35(6): 2239-2249.
- 吴曲波, 黄伟传, 乔宝平. 2018. 砂岩型铀矿地震综合预测技术研究——以齐哈日格图凹陷铀矿为例[J]. 地球物理学进展, 33(5): 2002-2014.
- 吴慧山, 谈成龙. 1997. 我国核地球物理勘察的若干新进展[J]. 地球物理学报, 40(S1): 317-325.
- 吴兆剑, 韩效忠, 胡航. 2018. 开鲁盆地陆家堡凹陷绍根地区早白垩世裂陷期后沉积构造演化与铀矿化特征[J]. 沉积学报, 36(1): 20-32.
- 王志高, 徐怀民. 2004. 含油气系统层次类型划分及评价方法——以开鲁盆地龙湾筒凹陷为例[J]. 油气地质与采收率, 11(5): 21-23.
- 王建荣. 2000. 辽河油田龙湾筒凹陷油、水势场分析[J]. 水文地质工程地质, 27(2): 28-29.
- 王成. 2015. 龙湾筒凹陷碎屑岩储层测井综合评价[J]. 国外测井技术, (2): 34-37.
- 肖玲. 1982. 垂直地震剖面法——构造和地层分析的解算工具[J]. 石油地球物理勘探, (5): 27-42.
- 肖新建, 李子颖, 李胜祥. 2003. 层序地层学研究及砂岩型铀矿床找矿勘探[J]. 地质找矿论丛, 18(2): 84-87.
- 许晓宏, 瞿辉, 潘继平, 李真济, 肖乾华, 李金有. 2000. 层序地层格架下的含油气系统研究——开鲁盆地龙湾筒凹陷下白垩统含油气系统[J]. 江汉石油学院学报, 22(3): 4-9.
- 许坤, 李瑜. 1995. 开鲁盆地晚中生代地层[J]. 地层学杂志, 19(2): 88-95.
- 徐乐意, 宁松华, 杨申谷. 2008. 龙湾筒凹陷火山岩储层识别及展布规律研究[J]. 内蒙古石油化工, 34(5): 138-141.
- 徐小林, 王勋杰, 叶兴树. 2010. 开鲁盆地龙湾筒凹陷碎屑岩储层沉积模式[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院报), 32(2): 182-185.
- 于文斌. 2009. 松辽盆地南部白垩系砂岩型铀矿成矿条件研究[D]. 吉林: 吉林大学: 15-27.
- 赵国柱, 胡望水, 杨申谷, 周萍, 熊平. 2008. 辽河油区外围龙湾筒凹陷碎屑岩储层特征研究[J]. 地质学报, 28(1): 24-29.
- 郑晓杰, 于常青, 聂逢君. 2020. 地震-测井联合反演在砂岩型铀矿勘探中的应用[J]. 科学技术与工程, 20(30): 12342-12348.
- 周超, 董庆勇, 许长斌. 1999. 龙湾筒凹陷九佛堂组火山岩储层特征研究[J]. 特种油气藏, 6(3): 13-18.
- 赵忠华, 刘广传, 崔长远. 1998. 松辽盆地西南部层间氧化带砂岩型铀矿找矿方向[J]. 矿物岩石地球化学通报, 17(3): 156-159.
- 郑纪伟. 2010. 开鲁盆地钱家店铀矿床成矿地质条件及勘探潜力分析[J]. 铀矿地质, 26(4): 193-200.
- 张训华. 1994. 哈尔滨以北地区断裂构造和松辽盆地的演化[J]. 中国区域地质, (3): 254-257.
- 张明瑜, 郑纪伟, 田时丰, 夏毓亮, 刘汉彬. 2005. 开鲁拗陷钱家店铀矿床铀的赋存状态及铀矿形成时代研究[J]. 铀矿地质, 21(4): 213-218.
- 朱筱敏, 王贵文, 李滨阳, 马立驰, 孙月平, 雷安贵, 程建平. 2002. 开鲁盆地陆西凹陷下白垩统层序地层学和油气评价[J]. 沉积学报, 20(4): 531-536.

References:

- CHEN Cheng. 2018. Study on tectonic characteristics and uranium mineralization in Tong liao area, Songliao Basin[D]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology: 38-46(in Chinese with English abstract).
- DONG Wen, FU Li-yun, XIAO You-jun, GUAN Xi-zhu, WU Chao. 2011. Quantitative analysis of the complexity in seismic exploration of the high and steep structures in Kuqa depression[J]. Chinese Journal of Geophysics, 54(6): 1600-1613(in Chinese with English abstract).
- GAO Rui-qi, CAI Xi-yuan. 1997. Formation conditions and distribution of oil and gas fields in Songliao Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press: 30-40(in Chinese).
- HU Qi-ming. 2013. Characteristics of sedimentary facies in Longwantong Depression[J]. China Petroleum and Chemical

- Standard and Quality, (22): 167-192(in Chinese).
- HE Xin. 2015. Application analysis of 3D seismic survey technology in tectonic detection of Gaozhuang mine[J]. Coal and Chemical Industry, 38(9): 62-64(in Chinese with English abstract).
- Nuclear Industry Team 243. 2015. Investigation report on depositional system and Uranium metallogenic conditions of target strata of in-situ leached sandstone uranium deposit in Tongliao area, Inner Mongolia[R]. Inner Mongolia: Nuclear Industry Team 243(in Chinese).
- JIANG Li. 2019a.Characteristics and evaluation of source rocks in three-dimensional section of Longwantong sag[J]. Journal of Chengde Petroleum College, 21(4): 1-4(in Chinese with English abstract).
- JIANG Li. 2019b. Study on characteristics of volcanic lithofacies in Jiufotang formation of Longwantong sag[J]. Gournal of Hebei GEO University, 42(4): 20-24(in Chinese with English abstract).
- LI Ming. 2014. Structural feature and evolution of Longwantong depression[J]. Journal of Chengde Petroleum College, 16(6): 1-4(in Chinese with English abstract).
- LI Ming. 2016. Lower maturity oil characteristic and reservoir accumulation condition of Longwantong sag[J]. Reservoir Evaluation and Development, 6(2): 6-10(in Chinese with English abstract).
- LI He-yan, WANG Qing-yan, YANG Da-wei, WANG-Hai-bo. 2011. The seismic observation system optimization based on forward and illumination methods in Longwanton[J]. Science Technology and Engineering, 11(20): 4699-4704(in Chinese with English abstract).
- LEI An-gui, SUN Zhang-qing, DONG Bin-bo, GAO Shu-sheng. 2020. Targeted processing method of shallow 3D seismic data for sandstone-type uranium deposits exploration[J]. Global Geology, 39(4): 888-895(in Chinese with English abstract).
- LUO Yi, HE Zhong-bo, MA Han-feng, SUN Xiang. 2012. Metallogenic characteristics of Qianjiadian sandstone uranium deposit in Songliao basin[J]. Mineral Deposits, 31(2): 391-400(in Chinese with English abstract).
- LI Zhi-an. 1995. Evolutionary features of mantle heat flux in Songliao Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 19(2): 104-112(in Chinese with English abstract).
- LIU Cui-rong, CHEN Fa-jing. 1996. Theoretical simulation of extensional basin——A case study of the Songliao Basin[J]. Experimental Petroleum Geology, 18(3): 274-282(in Chinese with English abstract).
- LIN Yu, WANG Yan. 2013. 3d seismic analysis solving mountainous area coal seam occurrence structure analysis[J]. Coal and Chemical Industry, 36(6): 5-7(in Chinese with English abstract).
- LIU Yan-xu, LU Wen-fen, YANG Dong-hong. 2021. The prediction of uranium deposits based on gravity and magnetic data: Exemplified by western Songliao basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 42(1): 63-73(in Chinese with English abstract).
- LI Chong, YU Chang-qing, NIE Feng-jun, ZHOU Yu, CHEN Peng, TIAN Wei. 2017. Research on application of borehole seismic joint inversion technique in sandstone type uranium deposit prospecting[C]//Proceedings of Annual Meeting of Chinese Geoscience Union(17). 617-618(in Chinese).
- LIU Xing-zhong. 1982. The types of uranium deposits and characteristics of geological mineralization in China[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2(1): 81-86(in Chinese with English abstract).
- MENG Zhao-tao. 2011. Sandstone-type uranium mineralization conditions[J]. Science Mosaic, (10): 180-182(in Chinese with English abstract).
- MENG En, XU-Gang, SHEN Cai-yu, WANG Hui. 2005. Standard of logging data in constrained seismic inversion and fine labeling of reservoir[J]. Oil Geophysical Prospecting, 40(2): 226-232(in Chinese with English abstract).
- NEI Feng-jun, YAN Zhao-bin, LIN Shuang-xing, ZHANG Cheng-yong, CHEN Yue-hui, LIU Qing-cheng. 2013. Jeddah regional of African Niger uranium mineralization in the forecast[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-8(in Chinese).
- NEI Feng-jun, YAN Zhao-bin, XIA Fei, LI Man-gen, LU Ya-yun, CAI Jian-fang, GUO Fu-neng, NING Jun. 2017. Hot fluid flows in the sandstone-type uranium deposit in the Kailu basin, Northeast China[J]. Geological Bulletin of China, 36(10): 1850-1866(in Chinese with English abstract).
- NIE Feng-jun, YAN Zhao-bin, XIA Fei, HE Jian-feng1), ZHANG Cheng-yong, FENG Zhi-bing, ZHANG Xin, YANG Dong-guang, CHEN Meng-ya, TAN Shun-jia, ZHANG Jin, KANG Shi-hu, NING Jun, YANG Jian-xin, SHEN Ke-feng, CAI Jian-fang. 2021. Two-stage and Two-mode Uranium Mineralization for Sandstone-type Uranium Deposits[J]. Acta Geoscientica Sinica, 42(6): 823-848(in Chinese with English abstract).
- QIN Ji-geng, TAN Qing-jiang. 1990. On the determination of the true thickness of uranium strata and the optimal sampling interval of γ -Logging[J]. Acta Geophysica Sincia, 33(4): 468-479(in Chinese with English abstract).
- REN Ping. 2015. Geochemical characteristics and evaluation of source rocks in Longwangan Sag[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, (14): 89-91(in Chinese).
- TAN Shun-jia, YU Chang-qing, NIE Feng-jun. 2019. The characteristics of uranium bearing reservoir in Ordos Basin are analyzed by geophysical data[C]//Proceedings of Annual Meeting of Chinese Geoscience Union. 504-505(in Chinese).
- TAN Shun-jia, YU Chang-qing, NIE Feng-jun, ZHANG Ping-chuan, ZHENG Xiao-jie. 2020. Application of geophysical data to the distribution of uranium bearing reservoirs in southwestern Ordos Basin [C]//Proceedings of Annual Meeting of Chinese Geoscience Union: 1601-1602(in Chinese).
- TAN Shun-jia, YU Chang-qing, NIE Feng-jun, QIAN Peng, ZHOU Yu, YIN Dong-fa. 2016. Application research of seismic prospecting method in sandstone type uranium deposit prediction[C]//Proceedings of Annual Meeting of Chinese Geoscience Union. 535-536(in Chinese).

- TAN Shun-jia, YU Chang-qing, NIE Feng-jun, LEI An-gui, ZHOU Yu, WANG Rui-xue, WU Qun. 2015. Geophysical response characteristics of favorable Uranium sandstone—example of Uranium ore in Qianjiadian in Songliao basin[J]. Progress in Geophysics, 30(3): 1361-1370(in Chinese with English abstract).
- WU Qu-bo, HUANG Wei-chuan, QIAO Bao-ping, LI Zi-wei, CAO Cheng-yan. 2020. Key acquisition technology of 3D seismic exploration for sandstone-type uranium deposits and its applied results[J]. Progress in Geophysics, 35(6): 2239-2249(in Chinese with English abstract).
- WU Qu-bo, HUANG Wei-chuan, QIAO Bao-ping. 2018. Integrated seismic prediction techniques research on sandstone-type uranium deposit: a case study of uranium deposit in Qiharigetu depression[J]. Progress in Geophysics, 33(5): 2002-2014(in Chinese with English abstract).
- WU Hui-shan, TAN Cheng-long. 1997. Several new advances in nuclear geophysical exploration in China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 40(S1): 317-325(in Chinese with English abstract).
- WU Zhao-jian, HAN Xiao-zhong, HU Hang. 2018. Sedimentary Tectonic Evolution and Uranium Mineralization of Post Late Cretaceous in Shaogen Area of Lujiapu Sag, Kailu Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 36(1): 20-32(in Chinese with English abstract).
- WANG Zhi-gao, XU Huai-min. 2004. Stratification classification and evaluation method of oil-gas bearing system-taking Manghan-Longwantong sag as example[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 11(5): 21-23(in Chinese with English abstract).
- WANG Jian-rong. 2000. Analysis of oil and water potential field in Longwantong Depression of Liaohe Oil Field[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 27(2): 28-29(in Chinese with English abstract).
- WANG Cheng. 2015. Comprehensive logging evaluation of clastic reservoir in Longwantong Depression[J]. World Well Logging Technology, (2): 34-37(in Chinese).
- XIAO Ling. 1982. Vertical seismic profiling-interpretive tool for structural and stratigraphic analysis[J]. Oil Geophysical Prospecting, (5): 27-42(in Chinese with English abstract).
- XIAO Xin-jian, LI Zi-ying, LI Sheng-xiang. 2003. The sequence stratigraphy and the prospecting of sandstone type uranium deposit[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 18(2): 84-87(in Chinese with English abstract).
- XU Xiao-hong, QU Hui, PAN Ji-ping, LI Zhen-ji, XIAO Qian-hua, LI Jin-you. 2000. Research on petroleum system based on sequence stratigraphic framework—Lower Cretaceous petroleum system in Longwantong sag of Kailu Basin[J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 22(3): 4-9(in Chinese with English abstract).
- XU Kun, LI Yu. 1995. Late Mesozoic strata of the Kailu Basin[J]. Journal of Stratigraphy, 19(02): 88-95(in Chinese with English abstract).
- XU Le-yi, NING Song-hua, YANG Shen-gu. 2008. Identification and distribution of volcanic rock reservoir in Longwantong Sag[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 34(5): 138-141(in Chinese).
- XU Xiao-lin, WANG Xun-jie, YE Xing-shu. 2010. Sedimentary pattern of clastic rock reservoirs in Longwantong depression in Kailu Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology(J. JPI), 32(2): 182-185(in Chinese with English abstract).
- YU Wen-bin. 2009. Research on metallogenic conditions of sandstone type uranium deposit of Cretaceous in southern Songliao basin[D]. Jilin: Jilin University: 15-27(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Guo-zhu, HU Wang-shui, YANG Shen-gu, ZHOU Ping, XIONG Ping. 2008. The features of clastic rock reservoir in the Longwantong depression in the periphery of the Liaohe oilfield[J]. Acta Geologica Sinica, 28(1): 24-29(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Xiao-jie, YU Chang-qing, NIE Feng-jun. 2020. Seismic-logging joint inversion for sandstone-type uranium exploration[J]. Science Technology and Engineering, 20(30): 12342-12348(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Chao, DONG Qing-yong, XU Chang-bin. 1999. Study on characteristics of igneous reservoir in Jiufutang formation, Longwantong sag[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 6(3): 13-18(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Zhong-hua, LIU Guang-chuan, CUI Chang-yuan. 1998. The prospecting direction for sandstone type uranium deposit in interlayered oxidation zone in the southwest of Songliao basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 17(3): 156-159(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Ji-wei. 2010. Geological setting and exploration potential of Qianjiadian uranium deposit in Kailu basin[J]. Uranium Geology, 26(4): 193-200(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xun-hua. 1994. Faults in the area north of Harbin and tectonic evolution of the songliao basin[J]. Regional Geology of China, (3): 254-257(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Ming-yu, ZHENG Ji-wei, TIAN Shi-feng, XIA Yu-liang, LIU Han-bin. 2005. Research on existing state of uranium and uranium ore-formation age at Qianjiadian uranium deposit in Kailu depression[J]. Uranium Geology, 21(4): 213-218(in Chinese with English abstract).
- ZHU Xiao-min, Wang Gui-wen, LI Bin-yang, MA Li-chi, SUN Yue-ping, LEI An-gui, CHENG Jian-ping. 2002. Lower Cretaceous sequence stratigraphy and hydrocarbon evaluation of Luxi depression in Kailu basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 20(4): 531-536(in Chinese with English abstract).