

文章编号：1000-0747(2024)02-0248-12 DOI: 10.11698/PED.20230551

松辽盆地北部下白垩统扶余油层源下致密油富集模式及主控因素

王小军^{1,2,3}, 白雪峰^{2,4}, 李军辉^{2,4}, 金之钧¹, 王贵文¹, 陈方举^{2,4},
郑强^{2,4}, 侯艳平^{2,4}, 杨庆杰^{2,4}, 李杰^{2,4}, 李君文^{2,4}, 蔡侯^{2,4}

(1. 中国石油大学(北京), 北京 102249; 2. 多资源协同陆相页岩油绿色开采国家重点实验室, 黑龙江大庆 163712; 3. 中国石油大庆油田有限责任公司, 黑龙江大庆 163458; 4. 中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江大庆 163712)

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“松辽盆地北部石油精细勘探技术完善与规模增储”(2016E0201)

摘要: 基于地球化学、地震、测井和钻井等资料, 对松辽盆地北部下白垩统泉头组扶余油层地质特征、致密油富集主控因素及富集模式等进行系统分析。研究表明: ①泉头组上覆上白垩统青山口组优质烃源岩, 环凹鼻状构造发育, 沉积砂体大面积连续分布, 储层整体致密; ②优质烃源岩、储层、断裂、超压和构造等多要素配置联合控制扶余油层致密油富集。源储匹配关系控制致密油分布格局; 源储压差为致密油富集提供充注动力; 断砂输导体系决定油气运移和富集; 正向构造是致密油富集的有利场所, 断垒带是向斜区致密油勘探重点突破区带; ③基于源储关系、输导方式、富集动力等要素建立扶余油层致密油3种富集模式, 一是源储对接油气垂向或侧向直排式: “源储紧邻、超压驱动、油气垂向倒灌或源储侧向对接运聚”; 二是源储分离断裂输导式: “源储分离、超压驱动、断裂输导, 油气通过断层向下运移到砂体富集”; 三是源储分离断砂匹配式: “源储分离、超压驱动、断裂输导、砂体调整、油气下排后通过砂体侧向运移富集”; ④油源条件、充注动力、断裂分布、砂体以及储层物性等方面差异性造成扶余油层致密油的差异富集, 齐家—古龙凹陷扶余油层具有较好富集条件, 勘探程度低, 是未来致密油探索重要新区带。

关键词: 松辽盆地北部; 白垩系泉头组; 青山口组; 上生下储; 扶余油层; 致密油; 主控因素; 富集模式

中图分类号: TE121.1 文献标识码: A

Enrichment model and major controlling factors of below-source tight oil in Lower Cretaceous Fuyu reservoirs in northern Songliao Basin, NE China

WANG Xiaojun^{1,2,3}, BAI Xuefeng^{2,4}, LI Junhui^{2,4}, JIN Zhijun¹, WANG Guiwen¹, CHEN Fangju^{2,4},
ZHENG Qiang^{2,4}, HOU Yanping^{2,4}, YANG Qingjie^{2,4}, LI Jie^{2,4}, LI Junwen^{2,4}, CAI Yu^{2,4}

(1. China University of Petroleum (Beijing) Beijing 102249, China; 2. National Key Laboratory for Multi-resource Collaborated Green Development of Continental Shale Oil, Daqing 163712, China; 3. CNPC Daqing Oilfield Company Limited, Daqing 163458, China; 4. Exploration and Development Research Institute of CNPC Daqing Oilfield Company Limited, Daqing 163712, China)

Abstract: Based on the geochemical, seismic, logging and drilling data, the Fuyu reservoirs of the Lower Cretaceous Quantou Formation in northern Songliao Basin are systematically studied in terms of the geological characteristics, the tight oil enrichment model and its major controlling factors. First, the Quantou Formation is overlaid by high-quality source rocks of the Upper Cretaceous Qingshankou Formation, with the development of nose structure around sag and the broad and continuous distribution of sand bodies. The reservoirs are tight on the whole. Second, the configuration of multiple elements, such as high-quality source rocks, reservoir rocks, fault, overpressure and structure, controls the tight oil enrichment in the Fuyu reservoirs. The source-reservoir combination controls the tight oil distribution pattern. The pressure difference between source and reservoir drives the charging of tight oil. The fault-sandbody transport system determines the migration and accumulation of oil and gas. The positive structure is the favorable place for tight oil enrichment, and the fault-horst zone is the key part of syncline area for tight oil exploration. Third, based on the source-reservoir relationship, transport mode, accumulation dynamics and other elements, three tight oil enrichment models are recognized in the Fuyu reservoirs: (1) vertical or lateral transport of hydrocarbon from source rocks to adjacent reservoir rocks, that is, driven by overpressure, hydrocarbon generated is transported vertically or laterally to and accumulates in the adjacent reservoir rocks; (2) transport of hydrocarbon through faults between separated source and reservoirs, that is, driven by overpressure, hydrocarbon migrates downward through faults to the sandbodies that are separated from the source rocks; and (3) migration of hydrocarbon through faults and sandbodies between separated source and reservoirs, that is, driven by overpressure, hydrocarbon migrates downwards through faults to the reservoir

rocks that are separated from the source rocks, and then migrates laterally through sandbodies. Fourth, the differences in oil source conditions, charging drive, fault distribution, sandbody and reservoir physical properties cause the differential enrichment of tight oil in the Fuyu reservoirs. Comprehensive analysis suggests that the Fuyu reservoir in the Qijia-Gulong Sag has good conditions for tight oil enrichment and has been less explored, and it is an important new zone for tight oil exploration in the future.

Key words: northern Songliao Basin; Cretaceous Quantou Formation; Qingshankou Formation; upper generation and lower storage; Fuyu reservoir; tight oil; main control factor; enrichment model

引用: 王小军, 白雪峰, 李军辉, 等. 松辽盆地北部下白垩统扶余油层源下致密油富集模式及主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(2): 248-259.

WANG Xiaojun, BAI Xuefeng, LI Junhui, et al. Enrichment model and major controlling factors of below-source tight oil in Lower Cretaceous Fuyu reservoirs in northern Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(2): 248-259.

0 引言

随着世界油气资源的不断开发,逐渐减少的剩余资源与日益增长的能源需求间矛盾不断扩大,因此非常规油气作为重要的接替资源开始受到各国的高度重视。作为非常规油气资源中的重要部分,致密油在全球能源结构中扮演着重要角色,并在很多国家实现了商业性开发。如美国已发现近20个致密油盆地,Bakken、Barnett和Woodford等多套产层,此外加拿大、阿根廷、厄瓜多尔、英国和俄罗斯等国家也获得了致密油勘探突破^[1-2]。事实上,中国致密油勘探开发同样具有广阔前景,多个盆地发育有类型众多的致密储层,如在鄂尔多斯、松辽、四川、渤海湾、柴达木、准噶尔、吐哈和三塘湖等盆地发现致密砂岩、致密碳酸盐岩、致密混积岩等储层^[3-6]。中国针对致密油勘探开发研究历经十余年的不断探索,先后经历了致密油概念与技术探索阶段、工业化试验与试生产阶段以及规模发现与开发上产阶段^[7],在地质理论创新、地质认识和工程技术等方面取得重要进展。但由于致密储层存在物性差、丰度低、单井自然产能低等难题,勘探开发效果往往不如预期,亟需取得新认识、发展新技术,推动致密油勘探开发获得重大突破和快速发展。

松辽盆地北部下白垩统泉头组扶余油层致密油资源潜力大,扶余油层正向构造带富集高产,已获规模发现并开发建产。大庆油田自上世纪50年代末至60年代初首次探索扶余油层,70至80年代在局部构造高点获得工业油气流,截至90年代末期扶余油层多个构造已获得工业发现。随着勘探工作的相继开展,2011年垣平1井致密油获得71.26 t/d高产突破,开启松辽盆地致密油勘探的新篇章,随后两年相继发现了齐平2井、葡平1井、葡平2井等致密油井,致密油勘探规模不断扩大,自2013年全面进入以水平井为主的一体化增储建产阶段,为大庆油田增储上产做出巨大贡献。但是目前松辽盆地北部泉头组扶余油层存在控藏

要素认识不够明确、油气富集规律研究不够深入、成藏期多要素配置关系认识不清等问题,从而导致扶余油层致密油富集模式研究不够系统,制约了效益开发。本文以松辽盆地北部扶余油层致密油为研究对象,基于大庆油田近年来取得的新的地质认识,对扶余油层致密油富集主控因素、富集模式以及油气富集规律等方面展开讨论,旨在深入挖掘松辽盆地北部致密油勘探潜力,推进松辽盆地北部致密油勘探开发进展,为致密油稳产上产提供有力理论支撑。

1 区域地质概况

松辽盆地是中国中、新生代沉积具有下断上坳双重重结构的大型陆相含油气盆地,包括中央坳陷区、西部斜坡区、东北隆起区、东南隆起区、北部倾没区以及西南隆起区6个一级构造单元(见图1a),盆地面积为 $26 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。松辽盆地在形成演化过程中经历了热隆张裂、裂谷、拗陷和萎缩抬升阶段,形成了断陷期、断拗转换期、拗陷期及反转期4套地层。松辽盆地北部中浅层包括白垩系泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组、四方台组和明水组、古近系、新近系以及第四系(见图1b),以青山口组烃源岩为中心,发育源上黑帝庙、萨尔图、葡萄花油层,源内高台子油层、青山口组一段、二段(简称青一段、青二段)页岩油,源下扶余、杨大城子油层^[8]。松辽盆地北部深层包括基底风化壳及白垩系火石岭组、沙河子组、营城组、登娄库组,围绕沙河子主力烃源岩发育3套源储组合,即下生上储登娄库组砂岩、营城组砂砾岩、营城组火山岩,自生自储沙河子组致密砂砾岩,上生下储中央古隆起基岩、火石岭组火山岩。

松辽盆地北部包括中央坳陷区、西部斜坡区、北部倾没区、东北隆起区和东南隆起区5个一级构造单元(见图1a),研究区主要处于中央坳陷区内。扶余油层是本次研究目的层位,位于下白垩统泉头组四段、泉头组三段上部(见图1b),地层厚度为66~240 m,

发育大型河流-浅水三角洲沉积体系。储层整体较为致密，孔隙度主体为5%~12%。扶余油层致密油主要分

布在大庆长垣、三肇凹陷和齐家—古龙凹陷，是松辽盆地北部最重要的致密油产层^[9]。

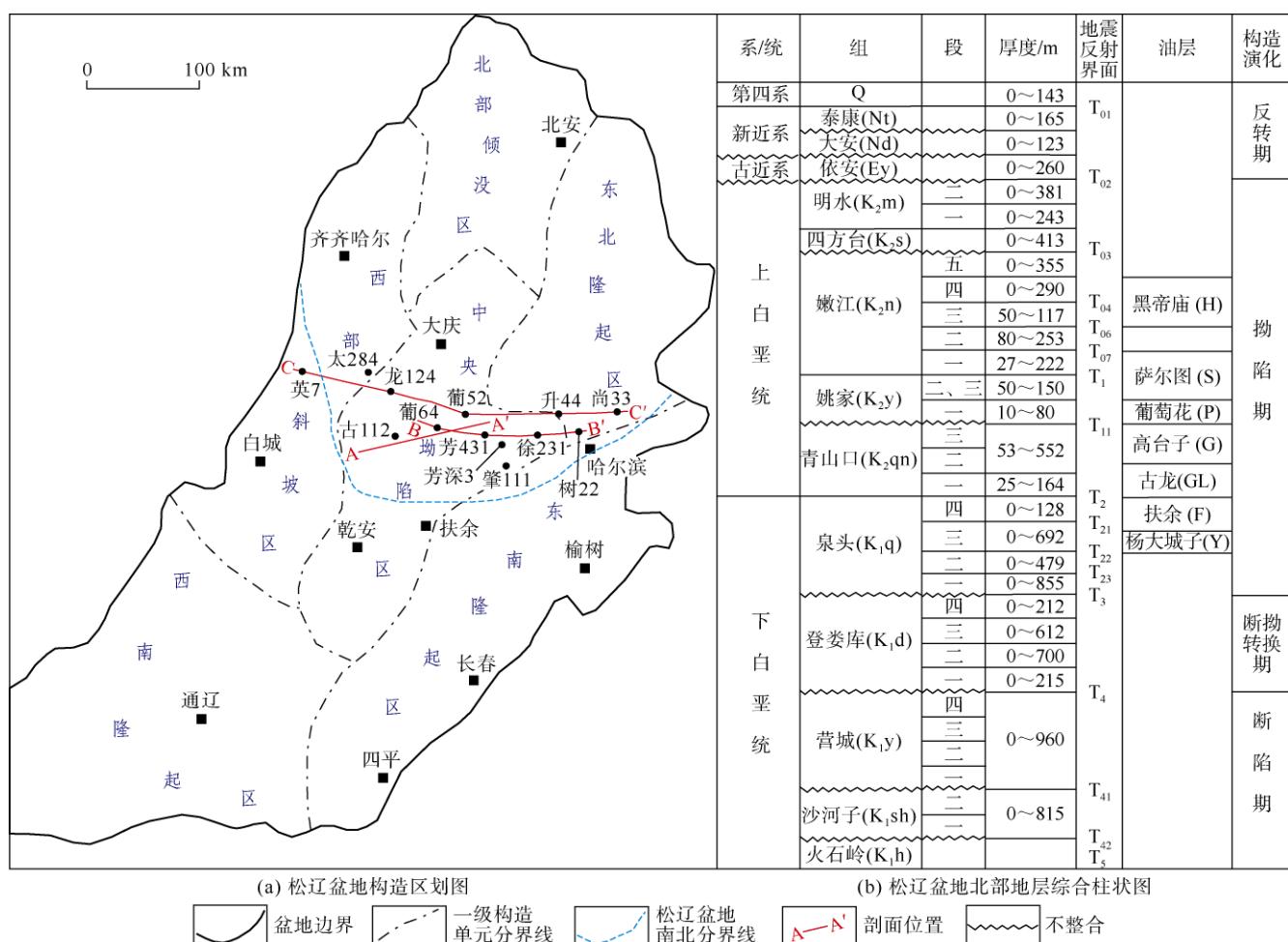


图1 松辽盆地构造分区及地层综合柱状图(据文献[8]修改)

2 扶余油层地质特征

2.1 构造特征

松辽盆地具有典型下断上坳二元结构，历经同期复合、多期叠合演化过程，由早期独立断陷逐渐演变为晚期统一坳陷。扶余油层发育于松辽盆地拗陷初期，到该油层沉积晚期盆地形成统一湖盆，经历后期的拗陷期沉降与构造反转，形成了扶余油层现今两凹一隆构造格局，即齐家—古龙凹陷、大庆长垣隆起和三肇凹陷，环凹鼻状构造发育（见图2）。

松辽盆地多期构造运动控制了盆地沉积建造，泉头组沉积期断裂不发育，青山口组沉积期在区域应力作用下松辽盆地发生了强烈的断裂作用，在T₂界面形成大量通源断裂，提供了油气向下大量运移的通道。下白垩统登娄库组—上白垩统嫩江组沉积期，齐家—古龙凹

陷和三肇凹陷长期为沉降中心，有利于发育烃源岩并生烃。明水组沉积末期经历了强烈褶皱变形和断裂作用^[10]，早期断裂活化，应力集中部位发育新生次级断裂，同时，形成大庆长垣和长春岭背斜反转构造，有利于扶余油层油气富集，奠定了油气规模富集的构造格局。

2.2 沉积储层特征

扶余油层沉积期，气候较为干旱，松辽盆地处于拗陷期，构造沉降稳定，地势平坦，沉积范围得到极度拓展^[11]。该时期盆地周缘大型河流体系十分发育，受多方向物源体系控制，经历了河流相到湖盆浅水三角洲沉积演化，早期以河流相沉积为主，发育零散小型浅水湖盆；中期以河流相沉积为主，湖盆增大，在古龙地区形成较大湖盆；晚期盆地形成统一湖盆，发育浅水三角洲沉积，总体上扶余油层发育大型河流—浅水三角洲沉积体系^[12]。沉积砂体主要为曲流河道砂

体、分流河道砂体、决口扇和席状砂，平面上呈网状、枝状分布(见图3)。

扶余油层具有单一砂体规模小、连续性差的特点，但是多种类型沉积砂体错叠连片、多期叠置形成的大面积连续分布砂体为油气富集提供了良好的储集空间。

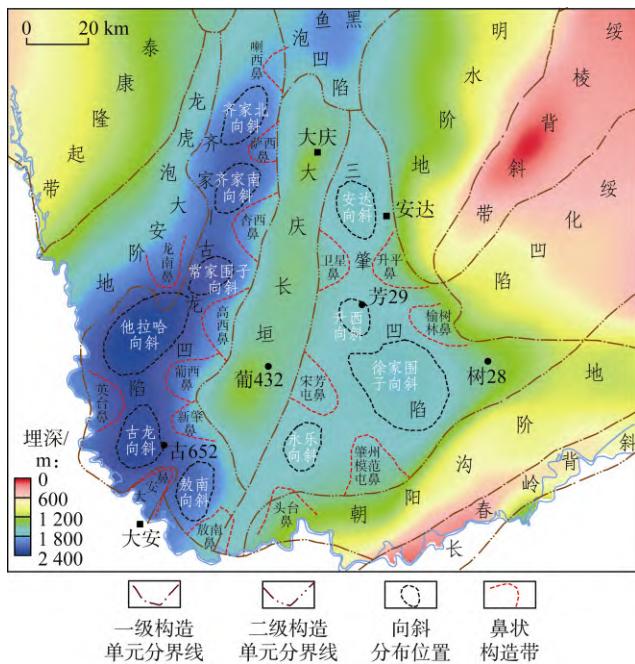


图2 松辽盆地北部扶余油层构造图

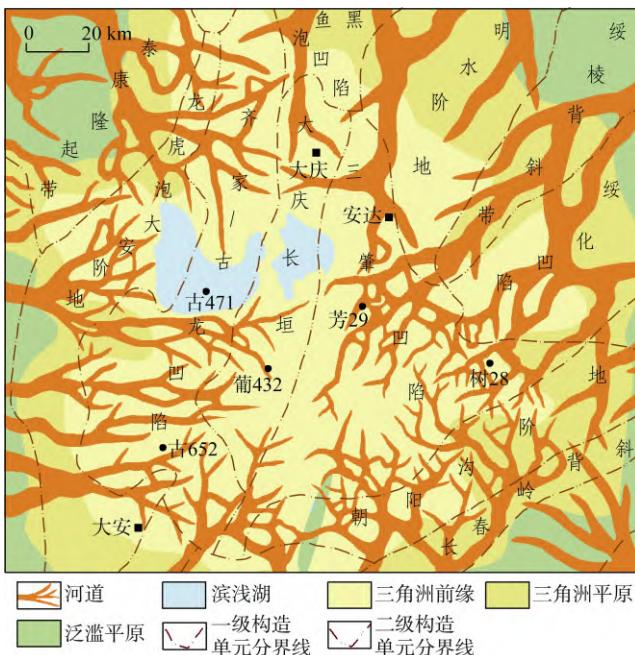


图3 松辽盆地北部扶余油层沉积相图(据文献[8]修改)

扶余油层储层岩性以细砂、粉砂为主，其次为泥质，平均含量分别为46.07%，36.54%，16.01%。岩石类型主要为岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩，碎屑总量平

均76.8%，主要由石英、长石和岩屑组成，砂岩填隙物总量平均23.2%，主要为碳酸盐胶结物和黏土矿物杂基。胶结类型以接触胶结、孔隙胶结和镶嵌胶结为主。

扶余油层储集空间类型多样，孔隙类型以原生粒间孔为主，其次为溶蚀孔，局部见微裂缝。孔隙组合类型主要为孔隙型或孔隙-微裂缝型组合。微米级孔隙是扶余油层主要的储集空间，纳米级喉道为主要的渗流通道^[13-14]。扶余油层储层整体较为致密，孔隙度主体为5%~12%，渗透率主体为($0.01\sim1.00$) $\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，表现为低孔、低渗—特低渗致密砂岩储层特征。

3 源下致密油富集主控因素分析

3.1 源储匹配控制油藏分布格局

成熟烃源岩生成的油气是各类油藏成藏的物质基础，在宏观上对油气分布具有一定控制作用。青一段成熟烃源岩生成的油气是扶余油层致密油主要来源^[15-17]，烃源岩主体分布在中央坳陷区内，主要生烃物质为层状藻，有机质类型以Ⅰ型为主，Ⅱ₁型次之， R_o 值大部分为0.7%~1.3%，主要处于成熟—高成熟阶段。 TOC 值平均值为2.97%，氯仿沥青“A”含量平均值为0.481%，成熟烃源岩范围面积 $1.65\times10^4\text{ km}^2$ ，厚度一般为40~90 m，排烃强度 $(200\sim480)\times10^4\text{ t/km}^2$ ，主要发育在齐家—古龙凹陷、大庆长垣和三肇凹陷^[18-19]。青一段烃源岩具有有机质类型好、有机质丰度高、生烃潜力大、沉积厚度大和分布范围广等特征，为扶余油层致密油富集奠定了充足物质基础。

随埋深加大烃源岩热演化程度增加(见图4a)。齐家—古龙凹陷和三肇凹陷是主要生排烃中心。随着热演化程度增大，烃源岩不断生烃， $(S_1+S_2)/TOC$ (单位有机碳生烃潜力指数)不断变大，当超过排烃门限之后烃源岩开始排烃，生烃潜力指数开始减小。基于

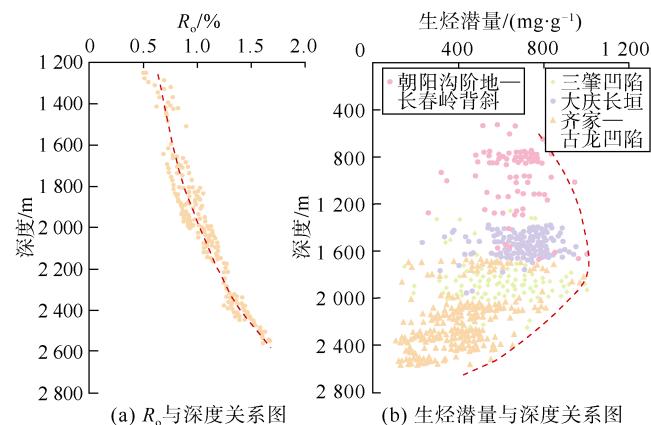


图4 松辽盆地北部青山口组一段烃源岩 R_o 、生烃潜力随深度变化图

生烃潜力法厘定青山口组烃源岩大量排烃门限约为1 700 m, 齐家—古龙凹陷和三肇凹陷大部分地区烃源岩埋深超过1 700 m(见图4b), 已大量排烃, 而大庆长垣烃源岩埋深较浅, 排烃较少。

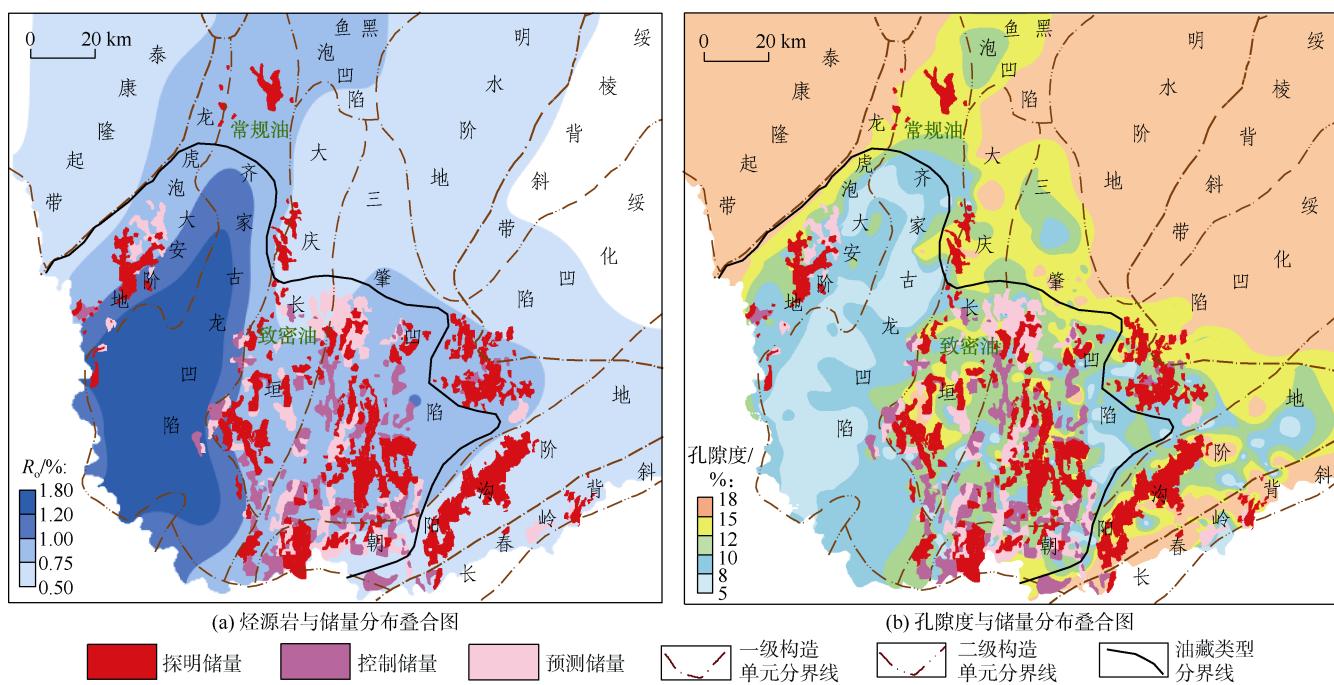


图5 松辽盆地北部烃源岩、孔隙度与扶余油层储量关系图

致密储层孔隙度、渗透率的大小在一定程度上控制着储层油气富集程度。在相同地质条件下, 孔渗性越好的储层往往越有利于油气富集。其本质在于致密油富集过程中烃源岩生烃产生的异常高压(充注动力)与致密储层较大的毛管阻力(富集阻力)间的配置关系, 物性好的储层通常具有优先富集油气的优势^[20-21]。从扶余油层储量平面分布看, 致密油主要分布在孔隙度为5%~12%区域(见图5b)。从研究区储层物性与含油性关系可以看出, 孔隙度、渗透率与储层含油性具有正相关关系(见图6)。综上可以看出松辽盆地北部扶余油层油气分布明显受到储层物性的控制。

有效烃源岩在宏观上控制着油藏的分布范围, 同时储层物性的好坏在一定程度上控制着致密油富集, 有效烃源岩与优质储层的匹配关系共同控制油藏分布格局, 通过储量与烃源岩、孔隙度的叠合关系可以发现, 扶余油层内已发现油藏大部分处于有效烃源岩分布范围内, 并在储层物性较好的区域富集高产。

3.2 源储压差是致密油富集主要充注动力

相比于常规油藏, 致密储层具有低孔、低渗的特征, 油气在流动时需要克服更大的毛管阻力, 当烃源岩大规模成熟时产生的超压达到烃源岩破裂压力并突

破致密储层排驱压力开始沿着断裂向致密储层进行充注, 源储压差在一定程度上决定了原油在致密砂岩中的运移距离和分布范围^[22-23]。

烃源岩在逐渐成熟生烃过程中, 地层超压也不断

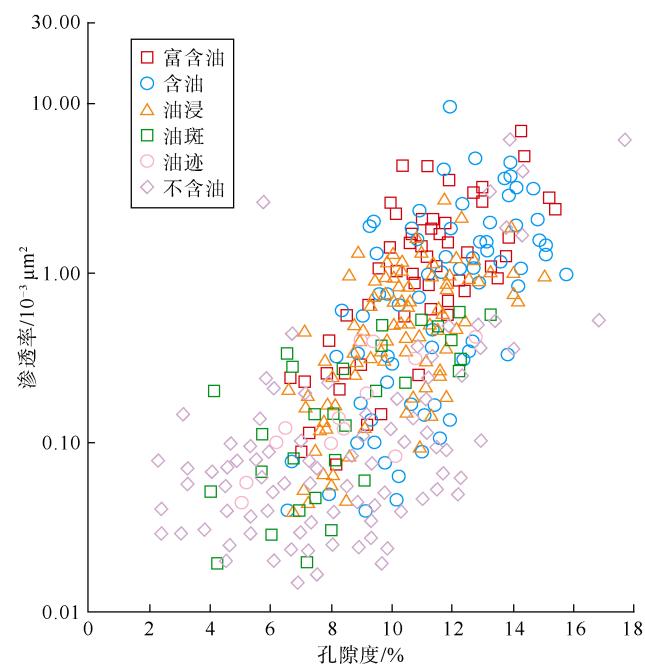


图6 松辽盆地北部扶余油层物性与含油性关系

破致密储层排驱压力开始沿着断裂向致密储层进行充注, 源储压差在一定程度上决定了原油在致密砂岩中的运移距离和分布范围^[22-23]。

形成,从压力系数平面分布可以看出,青一段超压平面上变化为自坳陷中心向周边地区超压逐步降低直至消失,其中齐家—古龙凹陷压力系数最大,主要为1.4~1.6,其次为三肇凹陷,压力系数主要为1.2~1.4(见图7a)。压力演化史模拟表明嫩江组沉积末期、明水组沉积末期以及古近纪沉积末期是青山口组烃源岩3次排烃高峰期(见图7b),有学者基于流体包裹体分析认为嫩江组沉积末期和明水组沉积末期是扶余油层原油充注的两个重要时期^[24-25]。原油从烃源岩排出后在生烃增压驱动下注入储层,生烃增压越大,原油压

力突破源储界面附近储层中小孔喉的能力越强^[26],原油充注距离也就越长。自姚家组随着埋深的增加压力梯度逐渐增大,直到青山口组底部和泉头组四段压力梯度突然降低,推测是在青山口组烃源岩3次生排烃高峰期产生的异常压力超过了泥岩的破裂压力,使油气向烃源岩上部或下部油层排出,导致泥岩中的超压释放^[27]。当青山口组烃源岩成熟时产生的过剩压力约10~20 MPa,而扶余油层排驱压力一般小于5 MPa,油气在源储压差的驱动下沿着通源断裂从烃源岩进入扶余油层,在有利部位聚集(见图7c)。

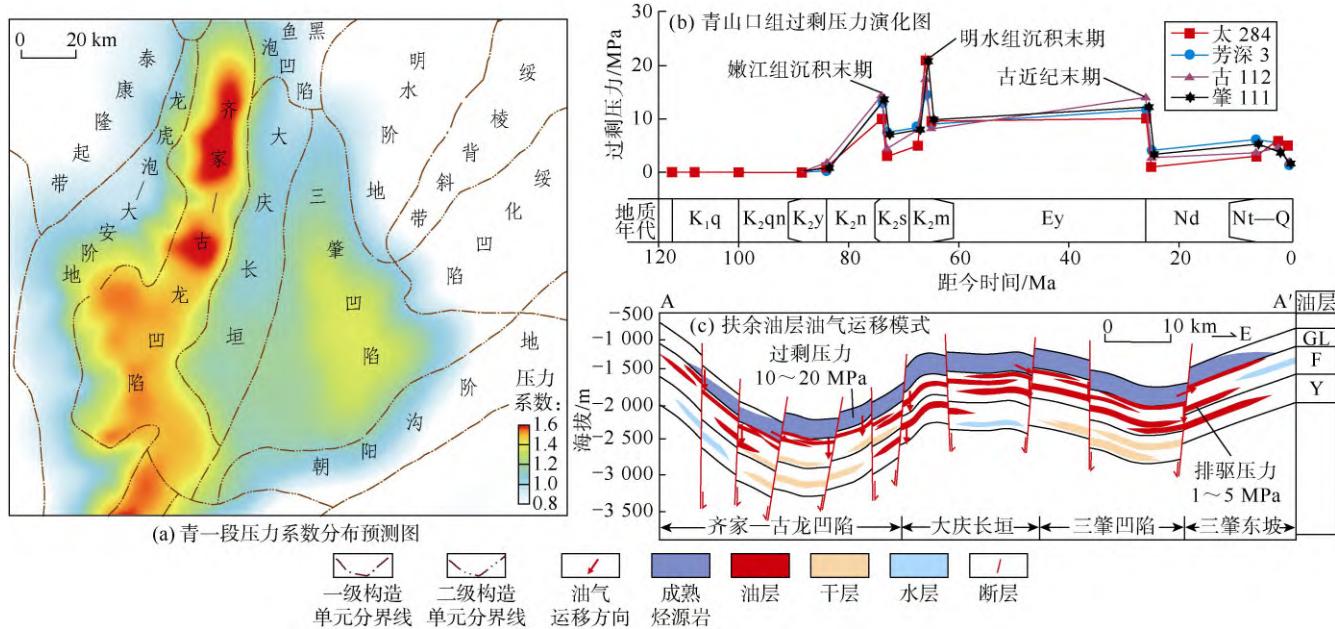


图7 松辽盆地北部青一段压力系数分布及青山口组过剩压力演化(据文献[8]修改;剖面位置见图1)

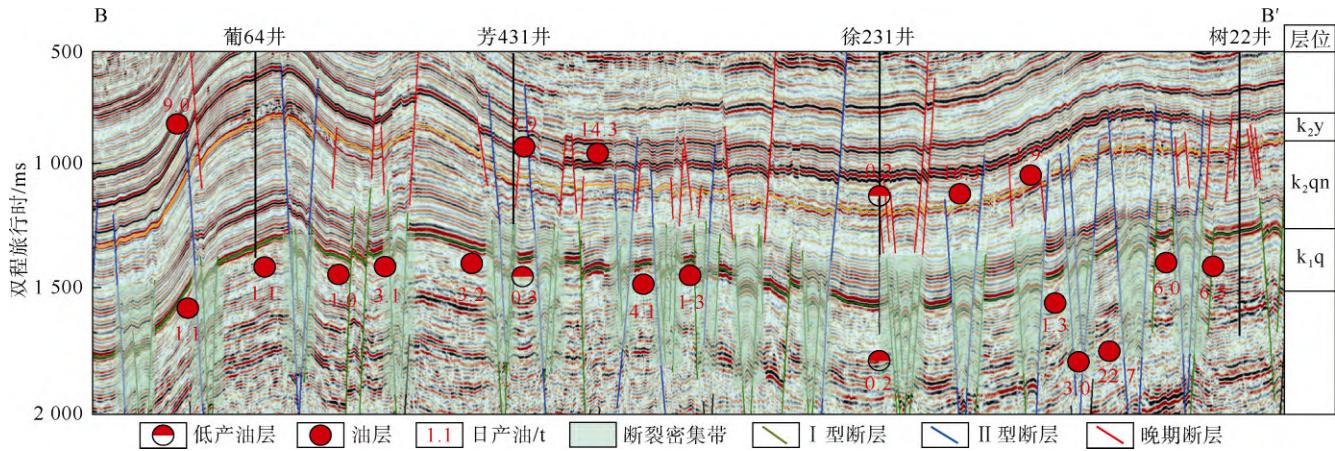


图8 松辽盆地北部断裂类型划分示意图(剖面位置见图1)

3.3 断砂匹配控制源下油气优势运移通道

源岩生成油气主要通过断层、裂缝、砂体等构成的输导体系运移至储层,不同输导体对流体的输导能力存在差异,油气会更多向输导能力较好的输导体流

动,因此输导体系的好坏对油气运移和富集具有控制作用^[28-29]。

烃源岩大规模生排烃时期活动断裂可作为油气垂向输导运移的通道。扶余油层顶面发育多期断裂,其

中青一段沉积末期在以沉降作用为主的伸展应力场中，由部分基底深大断裂张性活动而产生的张性断层最发育，这些断层的存在既可垂向沟通青山口组烃源岩与源下储层，又使局部烃源岩和储层横向对接提供侧向运移通道^[27]。扶余油层发育两种通源断层：Ⅰ型断层向上断至青山口组，向下断至扶余油层，主要沟通青山口组源岩和扶余储层，这类断层油气单向下排，仅向扶余油层输导油气；Ⅱ型断层向上断至高台子及其以上储层，向下断至扶余油层，断裂沟通源岩与多套储层的，双向上下排烃（见图8）。Ⅰ型断层和Ⅱ型断层均控藏，与源内超压匹配的Ⅰ型断裂更利于扶余油层富集。

断裂密集带是一系列走向相同或相近，成因上有一定联系且分布相对集中，并在平面上形成明显条带状的断裂组合^[30]。受多期构造演化影响，松辽盆地北部断裂十分发育，青山口组烃源岩内形成了大量断穿扶余油层的T₂断裂密集带，这些断裂密集带在扶余油层致密油富集过程中既是油气倒灌的高速通道，也对垂直于断裂密集带走向运移而来的油气有遮挡作用。勘探开发实践表明断裂密集带间夹持的区块油层产量、丰度相对较高，断裂密集带内含油性差，探井成功率25%，断裂带间的宽缓区是油气有利富集部位，探井成功率高达58%。

扶余油层主要发育浅水河控三角洲前缘和三角洲平原砂体，多为透镜状或薄层状砂体，连续性差，具有剖面上多层叠置、平面上叠合连片分布的特点。泉头组三段、四段地层发育的众多条带状砂体为油气侧向运移提供有效通道。

断裂与砂体共同构成了扶余油层致密油输导体系。源岩生成油气在源储压差作用下既可以沿着断裂下排，也可以通过砂体进行侧向运移至有利部位富集，断砂输导体系决定了油气的源下优势运移通道及空间分布。

3.4 古高地貌和局部正向构造有利于致密油聚集

基于扶余油层致密油勘探实践，认为构造对扶余油层致密油的影响主要体现在两个方面：扶余油层沉积期古地貌控制砂体展布，进而控制油气富集格局；盆地整体构造活动形成的正向构造和断垄带是油气运聚有利指向区。

扶余油层沉积期古地貌的形态控制着扶余油层的砂体展布特征，进而控制着油气富集。古地貌对扶余油层沉积的影响可以总结为沟谷控源、坡折控砂，即沟谷控制河流的流向，坡折控制砂体的展布，盆缘沟谷纵横，凹陷分割明显，沉积物顺着盆缘沟谷、低隆之间的鞍部

或断层之间的坡折带、转换带前进，最终在凹陷中心区沉积下来，从物源区到沉积地，河道砂体长距离搬运，砂体连续分布，最终形成了扶余油层满盆砂的储集格局，为源下扶余油层油气富集提供了有利的储集空间。

盆地构造演化史研究表明，青山口组沉积期和明水组沉积末期两个时期的构造运动对扶余油层油气富集具有重要影响。青山口期，经历强烈的断裂作用，在T₂界面产生大量断裂，这些断裂与青一段超压形成有效匹配，烃源岩生成油气在超压驱动下沿着断裂向下部扶余油层充注^[31]。明水组沉积末期，由于强烈挤压，地层抬升，形成系列反转背斜，断裂、鼻状构造及反转背斜与大量排烃期良好匹配，这为油气大规模运移、富集提供优越的构造条件。过去扶余油层致密油勘探多集中部署于大庆长垣、三肇凹陷、龙虎泡等地区，并在背斜带、鼻状构造带以及局部洼中隆等构造获得工业油流（见图9），勘探实践已证实了正向构造对扶余油层致密油富集具有控制作用。随着扶余油层致密油研究的不断深入，勘探目标逐渐转向了勘探程度较低的齐家—古龙凹陷，该地区断裂密集带呈多断阶发育，断裂密集带间宽缓区是油气富集的有利部位，源储侧向对接，垒带具有较好富集条件，认为断垒带是向斜区致密油勘探重点突破区带。

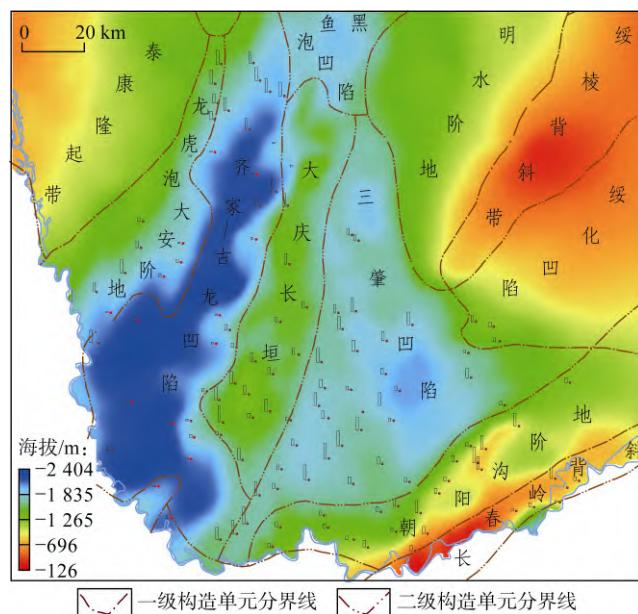


图9 松辽盆地北部扶余油层明水组沉积末期古构造与探井产能柱叠合图（图中柱子高低表示产能大小）

4 油气富集模式与差异富集规律研究

4.1 致密油富集模式

松辽盆地北部扶余油层致密油是一种上生下储式

致密油，目前已在龙虎泡一大安阶地、大庆长垣、三肇凹陷和长春岭背斜带等地探明较高致密油储量，并

在齐家—古龙凹陷、大庆长垣北部、三肇凹陷等地局部构造高部位发现一定规模常规油藏^[8]（见图10）。

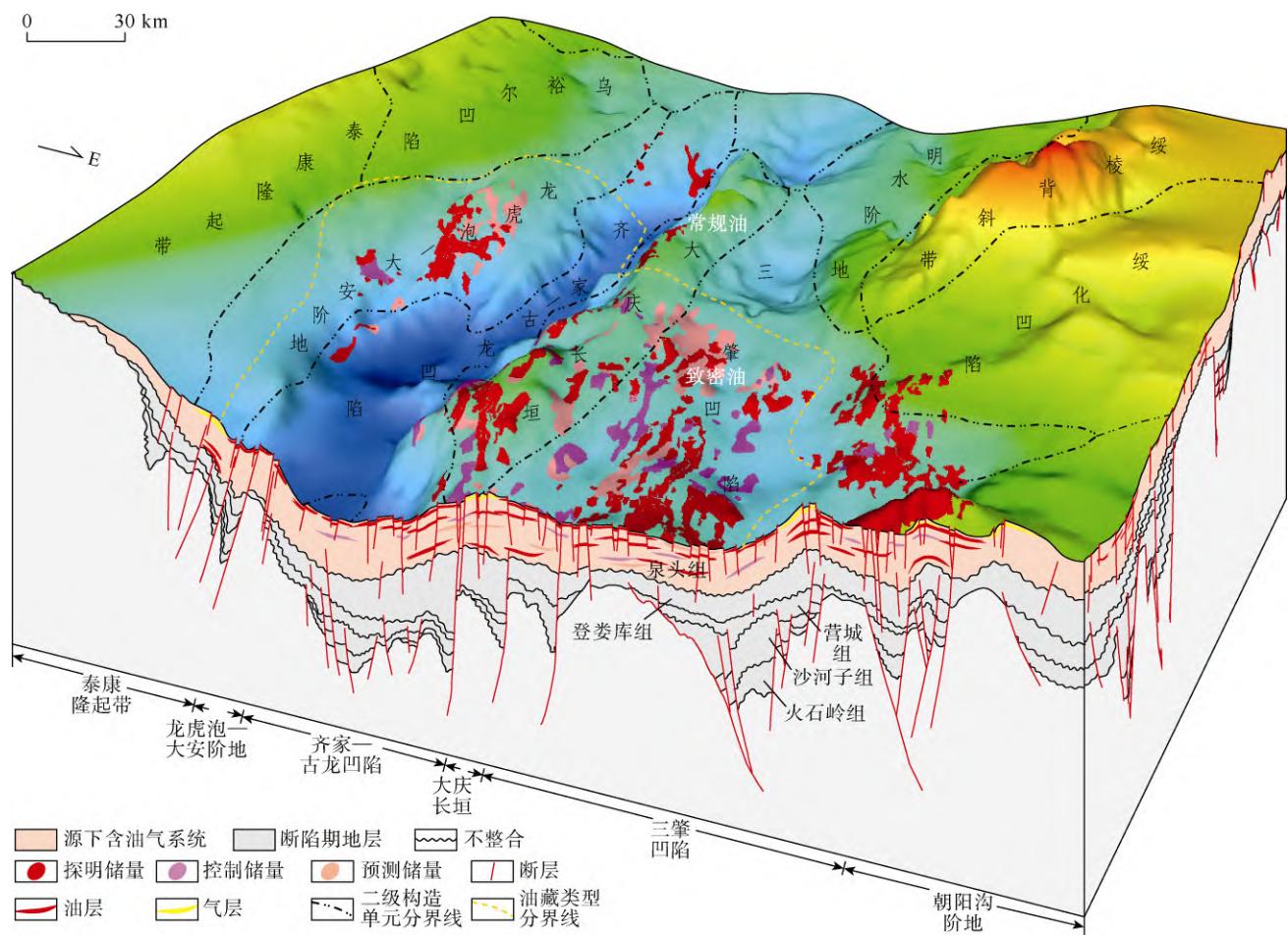


图10 松辽盆地北部源下扶余油层油气储量分布（据文献[8]修改）

扶余油层致密油富集受到油源、构造、断裂、砂体、超压、储层等多因素耦合控制。上覆青一段烃源岩生成油气是扶余油层致密油主要油气来源，源储压差为主要富集动力，断裂和砂体构成的立体输导体作为其运移的重要通道，正向构造和断垒带是油气富集的有利场所。基于源储关系、富集动力、输导体系等要素建立了源下致密油3种富集模式（见图11）。

源储对接油气垂向或侧向直排式：烃源岩垂向直接供烃，沉积砂体紧邻上覆青一段烃源岩，烃源岩与储层大面积紧密接触，不需要断层沟通，生油层生成的石油在超压驱动下突破源储界面，储层可以直接捕获来自在烃源岩排出的油气，在有利部位充注富集；烃源岩侧向直接供烃，砂体靠近烃源岩分布，在断层的错断作用下，砂体与青一段烃源岩直接接触，在超压驱动下油气侧向运移进入储层，而后在源储压差和浮力共同作用下侧向运聚富集。

源储分离断裂输导式：储层与烃源岩未直接接触，油气需要断层沟通从生油层进入沉积砂体中。即在超压驱动下，烃源岩生成的油气克服断裂带阻滞力、储层中的毛细管力、地层压力差和石油自身浮力，通过通源断裂向下倒灌至沉积砂体中富集。

源储分离断砂匹配式：储层与烃源岩未直接接触，当油气通过断层进入扶余油层后难以在断层附近砂体中保存下来，需要侧向运移一定距离后在有利部位富集。即在超压驱动下，烃源岩生成的油气沿着断裂向下输导进入扶余油层，而后在浮力作用下通过砂体侧向运移至高部位的构造或岩性复合圈闭中富集。

4.2 致密油差异富集规律及勘探方向

大庆长垣青一段烃源岩埋深较浅，成熟度较低，生烃能力弱，该地区扶余油层油气主要来源于齐家—古龙凹陷和三肇凹陷青一段成熟烃源岩。齐家—古龙凹陷、三肇凹陷与大庆长垣整体上表现为两凹夹一隆

的构造形态，因此青一段烃源岩生成油气进入扶余油层两个凹陷后通过断裂和砂体调整，其中一部分油气向大庆长垣构造高部位富集。大庆长垣地区主要发育曲流河、网状河、决口扇及席状砂等4种类型砂体，各类砂体相互叠置，连通性总体较好，孔隙度主要为

8%~15%。断裂密度0.93条/km²，I型断裂为主，I型断裂2155条，占比90.9%，II型断裂217条。目前已提交的探明及控制储量主要分布在大庆长垣南部正向构造带和鼻状构造（杏西鼻、高西鼻、葡西鼻、新肇鼻等）。

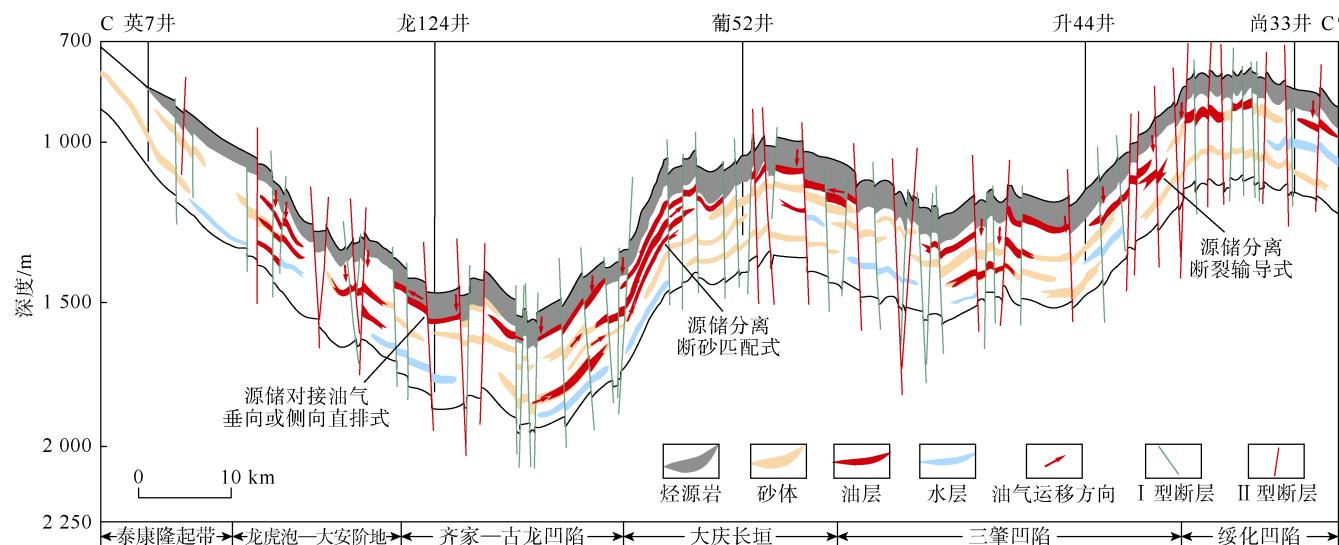


图 11 松辽盆地北部源下扶余油层致密油富集模式 (剖面位置见图 1)

三肇凹陷青一段成熟烃源岩面积3550 km²，泥岩厚度40~80 m， R_o 值为0.8%~1.1%，源岩品质较好，生烃量可达 124×10^8 t，是三肇凹陷扶余油层致密油主要来源。青一段源岩压力系数1.1~1.4，为油气倒灌进入扶余油层提供充注动力。断裂密度0.81条/km²，I、II型断裂均发育，I型断裂3585条，占比82.1%，II型断裂784条。三肇凹陷主要发育曲流河道、分流河道、水下分流河道和决口扇4种类型砂体，受北部、东北部及东部物源影响，距离物源较远，地形坡度小，砂体厚度小，连续性相对较差，孔隙度主要为7%~15%，这些薄层砂体在垂向上相互叠置构成了油气储集空间。目前已提交的探明及控制储量基本都是分布在正向构造带和周边鼻状构造（榆树林鼻、升平鼻、宋芳屯鼻、模范屯鼻和头台鼻等）。

齐家—古龙凹陷青一段成熟烃源岩面积4510 km²，泥岩厚度60~100 m， R_o 值介于1.2%~1.7%，源岩品质好、成熟高，相比其他地区生烃条件更优，生烃量达 266×10^8 t。齐家—古龙凹陷扶余油层油气主要来源于上覆烃源岩，青一段压力系数1.2~1.6，充注动力大，油气倒灌富集条件优越。断裂密度0.42条/km²，主要发育I型断裂，I型断裂971条，占比91.8%，II型断裂87条。受西部物源影响，距离物源较近，地形

较陡，易于形成短轴三角洲沉积，砂体厚度大，连续性好，孔隙度主要为7%~12%。研究认为该地区断裂带间宽缓区是油气富集的有利部位，堑带作为油气疏导通道，堑带与源岩侧向对接有利于油气富集。齐家—古龙凹陷扶余油层前期勘探部署较少，上部萨尔图、葡萄花、高台子等油层部署并位钻遇扶余油层发现含油显示较好，剩余资源潜力大，断堑带是向斜区重点突破区带。

扶余油层的致密油勘探部署多集中于大庆长垣、三肇凹陷，齐家—古龙凹陷勘探程度较低。齐家—古龙凹陷扶余油层致密油富集条件好，勘探潜力大。供烃条件优越：上覆青一段烃源岩面积大、成熟度高，生烃量大；充注动力足：生烃增压驱动，油气下排富集，压力系数为1.2~1.6；油气疏导条件好：齐家—古龙凹陷以I型断裂为主，而三肇凹陷I、II型均发育（见图12），I型断裂更利于油气下排富集；储层条件较好：近源砂体多期叠置、连片分布，孔隙度为7%~12%，普遍含油；原油流动性强：油质轻，原油密度小于0.82 g/cm³，黏度小于20 mPa·s，原油性质优于大庆长垣、三肇凹陷（见图13）。基于以上认识，认为齐家—古龙凹陷致密油是未来探索重要新区带，是大庆油田致密油储量规模接续的重要现实领域。

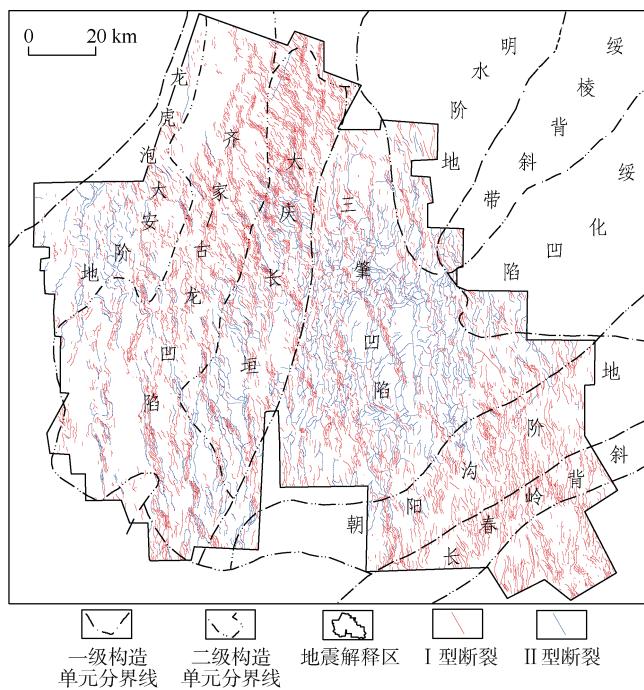


图 12 松辽盆地北部扶余油层断裂分布图

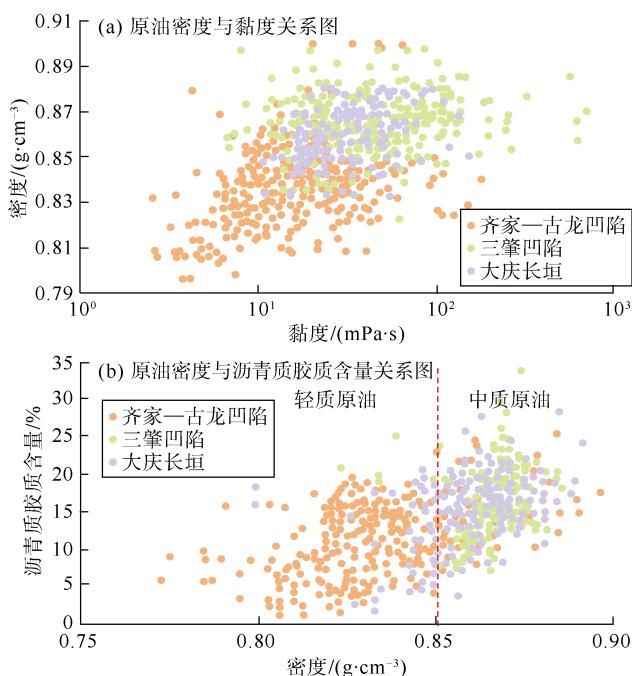


图 13 扶余油层原油密度与黏度、沥青质胶质含量关系图

5 结论

扶余油层发育上生下储式致密油，上覆青一段成热烃源岩为致密油富集提供充足的油气来源；正向构造和鼻状构造发育奠定了油气规模富集的构造格局；扶余油层沉积砂体具有单一砂体规模小、连续性差的特点，但是多种沉积相类型河道砂体交错叠置连片、

多期叠置形成的大面积连续分布砂体为油气富集提供了良好的场所；储层岩性主要为细砂岩、粉砂岩，岩石类型主要为岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩，储层整体较为致密，孔隙度主要为 5%~12%，渗透率为 $(0.01\sim1.00)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，微米级孔隙是扶余油层主要的储集空间，纳米级喉道为主要的渗流通道。

通过源储匹配关系、输导体系、富集动力和构造背景 4 个方面综合研究，分析了扶余油层致密油富集的主控因素。有效烃源岩宏观上控制油气分布范围，储层物性好坏控制着油气富集程度，有效烃源岩与优质储层的匹配关系联合控制着油气的分布格局；源储压差是扶余致密油富集主要动力；断裂与砂体构成的优势运移通道控制油气运移和富集；盆地整体构造活动形成的正向构造是油气运聚有利场所，断垒带是向斜区致密油勘探重点突破区带。

基于源储关系、富集动力、输导体系等要素建立了扶余油层致密油 3 种富集模式：①源储对接油气垂向或侧向直排式：“源储紧邻、超压驱动、油气垂向倒灌或源储侧向对接运聚”；②源储分离断裂输导式：“源储分离、超压驱动、断裂输导，油气通过断层向下运移到沉积砂体富集”；③源储分离断砂匹配式：“源储分离、超压驱动、断裂输导、砂体调整、油气侧向运移富集”。

油源条件、充注动力、断裂分布、砂体以及储层物性等方面差异性造成了扶余油层致密油的差异富集，以往扶余油层的致密油勘探主要针对大庆长垣和三肇凹陷，齐家—古龙凹陷勘探程度较低，本次研究发现齐家—古龙凹陷扶余油层具有供烃条件优越、充注动力足、油气输导条件好、砂体连片分布、原油流动性强等特点，具有较好富集条件，认为齐家—古龙凹陷是扶余油层致密油未来探索的重要新区带。

符号注释:

HI ——氢指数， mg/g ； R_o ——镜质体反射率，%； S_1 ——岩石中的游离烃含量， mg/g ； S_2 ——岩石中的热解烃含量， mg/g ； TOC ——总有机碳含量，%。

参考文献:

- [1] 贾承造. 论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 1-11.
JIA Chengzao. Breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geological theory[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 1-11.
- [2] 邹才能, 杨智, 朱如凯, 等. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J]. 地质学报, 2015, 89(6): 979-1007.
ZOU Caineng, YANG Zhi, ZHU Rukai, et al. Progress in China's

- unconventional oil & gas exploration and development and theoretical technologies[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(6): 979-1007.
- [3] 胡素云, 朱如凯, 吴松涛, 等. 中国陆相致密油效益勘探开发[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 737-748.
- HU Suyun, ZHU Rukai, WU Songtao, et al. Profitable exploration and development of continental tight oil in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(4): 737-748.
- [4] 胡素云, 陶士振, 王民, 等. 陆相湖盆致密油充注运聚机理与富集主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(3): 481-490.
- HU Suyun, TAO Shizhen, WANG Min, et al. Migration and accumulation mechanisms and main controlling factors of tight oil enrichment in a continental lake basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(3): 481-490.
- [5] 贾承造, 邹才能, 李建忠, 等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 343-350.
- JIA Chengzao, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(3): 343-350.
- [6] 邹才能, 张国生, 杨智, 等. 非常规油气概念、特征、潜力及技术: 兼论非常规油气地质学[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(4): 385-399.
- ZOU Caineng, ZHANG Guosheng, YANG Zhi, et al. Geological concepts, characteristics, resource potential and key techniques of unconventional hydrocarbon: On unconventional petroleum geology[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(4): 385-399.
- [7] 李国欣, 朱如凯. 中国石油非常规油气发展现状、挑战与关注问题[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 1-13.
- LI Guoxin, ZHU Rukai. Progress, challenges and key issues of unconventional oil and gas development of CNPC[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(2): 1-13.
- [8] 张赫, 王小军, 贾承造, 等. 松辽盆地北部中浅层全油气系统特征与油气成藏聚集模式[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(4): 683-694.
- ZHANG He, WANG Xiaojun, JIA Chengzao, et al. Total petroleum system and hydrocarbon accumulation model in shallow and medium strata in northern Songliao Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(4): 683-694.
- [9] 白军辉. 三肇地区致密油成藏主控因素与成藏模式[J]. 特种油气藏, 2021, 28(3): 54-61.
- BAI Junhui. Main controlling factors and modes of tight oil accumulation in Sanzhao area[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2021, 28(3): 54-61.
- [10] LI Z Q, CHEN J L, ZOU H, et al. Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution and dynamics of the Songliao Basin, NE Asia: Implications for the closure of the Paleo-Asian ocean and Mongol-Okhotsk Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Ocean[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 218: 103471.
- [11] 邓宏文, 吴海波, 王宁, 等. 河流相层序地层划分方法: 以松辽盆地地下白垩统扶余油层为例[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(5): 621-627.
- DENG Hongwen, WU Haibo, WANG Ning, et al. Division of fluvial sequence stratigraphy: An example from the Lower Cretaceous Fuyu oil-bearing layer, the Songliao Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28(5): 621-627.
- [12] 林铁锋, 康德江, 姜丽娜. 松辽盆地北部扶余油层致密油地质特征及勘探潜力[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(5): 94-100.
- LIN Tiefeng, KANG Dejiang, JIANG Lina. Geological characteristics and exploration potential of the tight oil in Fuyu oil reservoirs of North Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2019, 38(5): 94-100.
- [13] 蒙启安, 白雪峰, 梁江平, 等. 松辽盆地北部扶余油层致密油特征及勘探对策[J]. 大庆石油地质与开发, 2014, 33(5): 23-29.
- MENG Qi'an, BAI Xuefeng, LIANG Jiangping, et al. Fuyu tight oil characteristics and exploration countermeasures in North Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2014, 33(5): 23-29.
- [14] 刘丽娟. 松辽盆地北部扶余油层致密油资源评价参数体系及标准研究[J]. 世界地质, 2019, 38(1): 225-233.
- LIU Lijuan. Study on evaluation parameter system and standard of tight oil resources in Fuyu reservoir in northern Songliao Basin[J]. *World Geology*, 2019, 38(1): 225-233.
- [15] 孙同文, 吕延防, 刘宗堡, 等. 大庆长垣以东地区扶余油层油气运移与富集[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(6): 700-707.
- SUN Tongwen, LYU Yanfang, LIU Zongbao, et al. Hydrocarbon migration and enrichment features of the Fuyu oil layer to the east of the Daqing placanticline[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(6): 700-707.
- [16] 吕延防, 李建民, 付晓飞, 等. 松辽盆地三肇凹陷油气下排的地质条件及找油方向[J]. 地质科学, 2009, 44(2): 525-533, 623.
- LYU Yanfang, LI Jianmin, FU Xiaofei, et al. Geological conditions and oil exploration direction of oil and gas drainage in Sanzhao Depression, Songliao Basin[J]. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 2009, 44(2): 525-533, 623.
- [17] 李国会. 松辽盆地北部中浅层剩余油气资源与勘探方向研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- LI Guohui. Study on residual and exploration directions of oil and gas in shallow to middle formations, north of Songliao Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.
- [18] 何文渊, 蒙启安, 冯子辉, 等. 松辽盆地古龙页岩油原位成藏理论认识及勘探开发实践[J]. 石油学报, 2022, 43(1): 1-14.
- HE Wenyuan, MENG Qi'an, FENG Zihui, et al. In-situ accumulation theory and exploration & development practice of Gulong shale oil in Songliao Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(1): 1-14.
- [19] 王凤兰, 付志国, 王建凯, 等. 松辽盆地古龙页岩油储层特征及分类评价[J]. 大庆石油地质与开发, 2021, 40(5): 144-156.
- WANG Fenglan, FU Zhiguo, WANG Jiankai, et al. Characteristics and classification evaluation of Gulong shale oil reservoir in Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2021, 40(5): 144-156.
- [20] 蔡来星. 松南中央坳陷扶余油层致密砂岩油藏富集规律及主控因素研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2015.
- CAI Laixing. Enrichment regularity and main controlling factors of tight sandstone oil reservoirs in Fuyu oil reservoir at central depressions in the south of Songliao Basin[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2015.
- [21] 姜福杰, 贾承造, 庞雄奇, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界全油气系统成藏特征与天然气富集地质模式[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(2): 250-261.
- JIANG Fujie, JIA Chengzao, PANG Xiongqi, et al. Upper Paleozoic total petroleum system and geological model of natural gas enrichment in Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(2): 250-261.
- [22] 杨华, 梁晓伟, 牛小兵, 等. 陆相致密油形成地质条件及富集主控因素: 以鄂尔多斯盆地三叠系延长组 7 段为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 12-20.
- YANG Hua, LIANG Xiaowei, NIU Xiaobing, et al. Geological conditions for continental tight oil formation and the main controlling factors for the enrichment: A case of Chang 7 Member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(1): 12-20.
- [23] 卢双舫, 黄文彪, 李文浩, 等. 松辽盆地南部致密油源岩下限与分级评价标准[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(3): 473-480.
- LU Shuangfang, HUANG Wenbiao, LI Wenhao, et al. Lower limits

- and grading evaluation criteria of tight oil source rocks of southern Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(3): 473-480.
- [24] 斯尚华, 胡张明, 刘吉, 等. 储层致密化与油气充注的关系: 以三肇凹陷白垩系扶余油层为例[J]. 现代地质, 2021, 35(6): 1854-1863.
SI Shanghua, HU Zhangming, LIU Ji, et al. Relationship between reservoir densification and hydrocarbon Charging: A case study of Cretaceous Fuyu reservoir of the Sanzhao Sag[J]. Geoscience, 2021, 35(6): 1854-1863.
- [25] 孙雨, 刘如昊, 于利民, 等. 源下致密砂岩油成藏特征、控制因素和运聚模式: 以松辽盆地大安地区白垩系泉头组扶余油层为例[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(4): 793-805.
SUN Yu, LIU Ruohao, YU Limin, et al. Accumulation characteristics, controlling factors and migration-accumulation model of tight sandstone oil below source rocks: A case study of Fuyu reservoirs of the Cretaceous Quantou Formation in Da'an area of Songliao[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(4): 793-805.
- [26] 张洪, 张水昌, 柳少波, 等. 致密油充注孔喉下限的理论探讨及实例分析[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 367-374.
ZHANG Hong, ZHANG Shuichang, LIU Shaobo, et al. A theoretical discussion and case study on the oil-charging throat threshold for tight reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 367-374.
- [27] 侯启军, 魏兆胜, 赵占银, 等. 松辽盆地的深盆油藏[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(4): 406-411.
HOU Qijun, WEI Zhaosheng, ZHAO Zhanyin, et al. Deep basin reservoir in Songliao Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(4): 406-411.
- [28] 黄薇, 梁江平, 赵波, 等. 松辽盆地北部白垩系泉头组扶余油层致密油成藏主控因素[J]. 古地理学报, 2013, 15(5): 635-644.
HUANG Wei, LIANG Jiangping, ZHAO Bo, et al. Main controlling factors of tight oil accumulations in the Fuyu Layer of Cretaceous
- Quantou Formation in northern Songliao Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5): 635-644.
- [29] 李军辉. 海拉尔盆地呼伦湖凹陷下白垩统层序构成样式及油气成藏模式[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(4): 961-969.
LI Junhui. Sequence architecture pattern and pool-forming pattern of Lower Cretaceous in Huhehu Depression[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2012, 42(4): 961-969.
- [30] 陈方文, 卢双舫, 薛海涛, 等. 三肇凹陷扶余油层断裂密集带样式及有利成藏部位[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2013, 38(6): 1281-1288.
CHEN Fangwen, LU Shuangfang, XUE Haitao, et al. Types and favorable oil accumulation parts of fault dense belts in Fuyang Formation of Sanzhao Depression, Songliao Basin[J]. Earth Science(Journal of China University of Geosciences), 2013, 38(6): 1281-1288.
- [31] 蒙启安, 赵波, 陈树民, 等. 致密油层沉积富集模式与勘探开发成效分析: 以松辽盆地北部扶余油层为例[J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 112-125.
MENG Qi'an, ZHAO Bo, CHEN Shumin, et al. Sedimentary enrichment mode and effect analysis of exploration and development: A case study of Fuyu reservoir tight oil in northern Songliao Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 112-125.

第一作者简介: 王小军 (1973-), 男, 黑龙江大庆人, 中国石油大学(北京)在读博士研究生, 中国石油大庆油田有限责任公司教授级高级工程师, 主要从事油气勘探与管理工作。地址: 黑龙江省大庆市让胡路区, 大庆油田有限责任公司, 邮政编码: 163458. E-mail: wxiaojun@petrochina.com.cn

联系作者简介: 李军辉 (1981-), 男, 黑龙江大庆人, 博士, 中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院高级工程师, 主要从事沉积、储层及油气成藏综合研究。地址: 黑龙江省大庆市让胡路区, 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 邮政编码: 163712. E-mail: lijunhui_li@163.com

收稿日期: 2023-10-18 修回日期: 2024-03-01

(编辑 谷江锐)

(上接第 247 页)

- [33] 黄第藩, 熊传武. 含煤地层中石油的生成、运移和生油潜力评价[J]. 勘探家, 1996, 1(2): 6-11.
HUANG Difan, XIONG Chuanwu. Generation, migration and evaluation of hydrocarbon generation potential of oil formed in coal-bearing strata[J]. Explorationist, 1996, 1(2): 6-11.
- [34] 黄第藩, 李晋超, 张大江. 干酪根的类型及其分类参数的有效性、局限性和相关性[J]. 沉积学报, 1984, 2(3): 18-33.
HUANG Difan, LI Jinchao, ZHANG Dajiang. Kerogen types and study on effectiveness, limitation and interrelation of their identification parameters[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1984, 2(3): 18-33.
- [35] 戴金星, 戚厚发. 我国煤中发现的气孔及其在天然气勘探上的意义[J]. 科学通报, 1982, 27(5): 298-301.
DAI Jinxing, QI Houfa. Pores in coal and the significance in natural gas exploration in China[J]. Chinese Science Bulletin, 1982, 27(5): 298-301.
- [36] 徐黎明, 周立发, 张义楷, 等. 鄂尔多斯盆地构造应力场特征及其构造背景[J]. 大地构造与成矿学, 2006, 30(4): 455-462.
XU Liming, ZHOU Lifan, ZHANG Yikai, et al. Characteristics and tectonic setting of tectono-stress field of Ordos Basin[J]. Tectonophysics, 2006, 30(4): 455-462.
- [37] 郑民, 李建忠, 吴晓智, 等. 我国常规与非常规天然气资源潜力、

重点领域与勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(10): 1383-1397.

ZHENG Min, LI Jianzhong, WU Xiaozhi, et al. China's conventional and unconventional natural gas resource potential, key exploration fields and direction[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(10): 1383-1397.

- [38] 张道勇, 朱杰, 赵先良, 等. 全国煤层气资源动态评价与可利用性分析[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6): 1598-1604.
ZHANG Daoyong, ZHU Jie, ZHAO Xianliang, et al. Dynamic assessment of coalbed methane resources and availability in China[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1598-1604.

第一作者简介: 赵喆 (1976-), 男, 新疆五家渠人, 博士, 中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师, 主要从事石油天然气地质综合研究。地址: 北京市海淀区学院路 20 号, 中国石油勘探开发研究院, 邮政编码: 100083. E-mail: zhaozhe76@petrochina.com.cn

联系作者简介: 徐旺林 (1970-), 男, 陕西子洲人, 博士, 中国石油勘探开发研究院高级工程师, 主要从事石油天然气地质综合研究。地址: 北京市海淀区学院路 20 号, 中国石油勘探开发研究院石油天然气地质研究所, 邮政编码: 100083. E-mail: wLxu@petrochina.com.cn

收稿日期: 2023-06-28 修回日期: 2024-02-06

(编辑 衣英杰)