

渤海湾盆地辽河坳陷稠油分布特征及主控因素

陈星州¹, 邵建欣², 孙 转¹, 韩宏伟¹, 郭 强¹, 尹宜鹏¹, 孙新宇¹

1. 中国石油 辽河油田分公司 勘探开发研究院, 辽宁 盘锦 124010;

2. 中国石油 辽河石油勘探局有限公司, 辽宁 盘锦 124010

摘要:渤海湾盆地辽河坳陷原油类型多样,但以稠油为主,其油气储量和产量均占该坳陷总量的 50%以上。研究辽河坳陷油藏稠变的成因机理,进而搞清稠油的分布规律,对后继勘探开发具有重要的意义。依据辽河油田多年稠油油藏勘探开发形成的系统认识,对稠油油藏的“边、浅、松、早、降、失、盖”等地质特征开展研究;并从构造格局、储层特征、油藏埋深、地下流体、封盖条件和氧化及生物降解作用等方面对稠油分布和稠变原因进行探讨,厘清辽河坳陷油藏稠变机理及主控因素。研究发现,构造格局是控制稠油分布的决定因素,储层、埋深、地下流体和盖层等地质条件是控制原油稠变的重要因素,生物降解和氧化作用是稠变的必要条件。辽河坳陷油气藏具有明显的环洼分布规律,围绕生油洼陷由内向外存在 3 个环带,内带以天然气、凝析油为主,埋深一般大于 3 500 m;中带以稀油为主,局部富集天然气及稠油,埋深在 1 700~3 500 m;外带以稠油为主,埋深一般小于 1 700 m。

关键词:稠油;形成机制;油气分布特征;稠变影响因素;油气环洼分布;辽河坳陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Characteristics and controlling factors of heavy oil distribution in Liaohe Depression, Bohai Bay Basin

CHEN Xingzhou¹, SHAO Jianxin², SUN Zhuan¹, HAN Hongwei¹, GUO Qiang¹, YIN Yipeng¹, SUN Xinyu¹

1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Liaohe Oilfield Company, CNPC, Panjin, Liaoning 124010, China;

2. Liaohe Petroleum Exploration Bureau Co., Ltd., CNPC, Panjin, Liaoning 124010, China

Abstract: There are various types of crude oil in the Liaohe Depression, Bohai Bay Basin, among which heavy oil accounts for more than 50% of the oil and gas reserves and production. Therefore, it is of great significance for future exploration and development to study the main controlling factors of oil densification in the Liaohe Depression and to understand the distribution pattern of heavy oil. Based on the systematic understanding of heavy oil reservoir exploration and development in Liaohe oilfield for decades of years, and by aiming at the geological characteristics of heavy oil reservoirs such as “edge, shallow, unconsolidated, early, falling, loss, capping”, this paper discusses the distribution and densification reasons of heavy oil from six aspects, including structural pattern, reservoir characteristics, reservoir burial depth, underground fluid, capping conditions, oxidation and biodegradation. The densification mechanism and controlling factors of heavy oil reservoirs in the Liaohe Depression are basically clarified. Through the study of heavy oil densification factors, it is found that structural pattern is the main factor controlling heavy oil distribution, geological conditions such as reservoir, burial depth, underground fluid and cap rocks are important factors controlling heavy oil densification, while biodegradation and oxidation are the keys for heavy oil densification. Oil and gas reservoirs accumulate around sags in the Liaohe Depression. There are three rings around the oil-generating sags from the inside to the outside. The inner zone is dominated by natural gas and condensate gas, and the buried depth is generally more than 3 500 m. The middle zone is dominated by light oil, partially enriched with natural gas and heavy oil, with a buried depth of 1 700–3 500 m. The outer zone is dominated by heavy oil, and the buried depth is generally less than 1 700 m.

Key words: heavy oil; generation mechanism; oil and gas distribution pattern; controlling factors of densification; oil and gas accumulate around depression; Liaohe Depression; Bohai Bay Basin

渤海湾盆地辽河坳陷油气资源丰富,原油类型多样,有凝析油、正常原油、稠油、高凝油等,不同的

原油均有其特定的分布范围。自 1975 年辽河西部凹陷杜 32 井首次发现稠油以来,相继又在欢喜岭、

曙光、冷家、雷家等区块发现了稠油富集带。稠油在辽河探区占有重要地位,研究其成因机理,进而搞清稠油的分布规律,对后继勘探开发意义重大。早在 20 世纪 80 年代,徐矛唐等^[1]提出了原油在储层中的生物降解作用是形成稠油的主要因素;卢松年等^[2]在原油和油砂中鉴定出了 25-降霍烷,证明生物降解是稠油形成的一个重要方式;邱振馨^[3]提出断裂是控制稠油分布的主要因素,并提出按稠油成因可分为原生稠油和次生稠油;胡见义等^[4]认为稠油油藏的形成主要受后期构造抬升以及生物降解、水洗和氧化作用及烃类轻质组分散失等因素影响;李素梅等^[5]认为厌氧细菌的生物降解作用是辽河油田西部凹陷原油稠化的重要机制。虽然这些生物—化学过程是原油稠变必不可少的因素,但这些过程只有在特定的地质条件下才能进行。因此,这些过程是原油稠变的必要条件,但不是起根本作用的因素。为能更好阐述稠油稠变机理,要将研究思路从单一研究稠油本身地球化学特

征转向多元化方向发展。本文依据辽河油田多年稠油油藏勘探开发形成的系统认识,对稠油油藏的“边、浅、松、早、降、失、盖”等特征开展研究。通过研究发现,构造格局是控制稠油分布的决定因素,疏松储层和缺乏区域盖层等条件是控制稠油稠变的重要因素。搞清这些主控因素,对开展油藏稠变机理研究和稠油油藏预测具有重要意义。

1 区域地质概况

辽河拗陷位于渤海湾盆地东北部,为大型含油气拗陷。拗陷内稠油资源十分丰富,平面上,稠油主要分布在西部凹陷的西斜坡地区,从南往北有 4 个油田:欢喜岭油田、曙光油田、高升油田和牛心坨油田;另外,还在西部凹陷东部陡坡带和中央隆起南部倾没带聚集成藏,从南往北有 3 个油田:海外河油田、小洼油田和冷家堡油田。纵向上,辽河拗陷自下而上发育 10 套稠油层系(图 1):长城系大红峪组古潜山油层,古近系沙河街组四段牛心坨油层、高升油

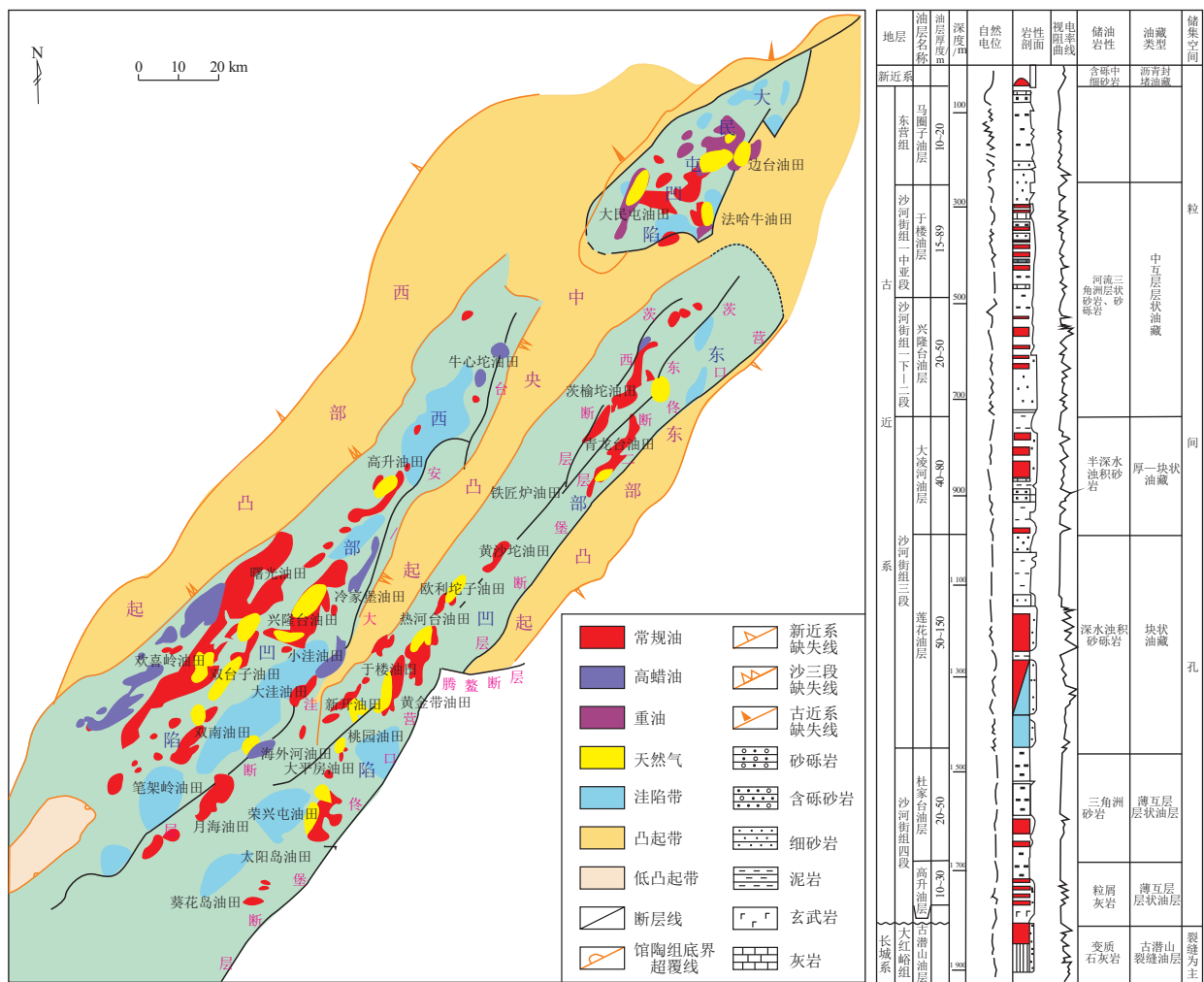


图 1 渤海湾盆地辽河拗陷原油(气)类型平面分布及稠油综合柱状图

Fig.1 Plane distribution of various grades of crude oil (gas) and composite histogram of heavy oil in Liaohe Depression, Bohai Bay Basin

层、杜家台油层,沙三段莲花油层、大凌河油层,沙一段—沙二段兴隆台油层、于楼油层,东营组马圈子油层和新近系馆陶组绕阳河油层。目前已探明稠油原油地质储量 $10.266 9 \times 10^8$ t,占辽河油区总储量的46.3%,在辽河油田产量构成中主要为稠油,稠油的年产量为 850×10^4 t,占辽河油区总产量的一半以上。

2 稠油油藏分布特征

辽河油田稠油油藏基本地质特征明显,可以概括为“边、浅、松、早、降、失、盖”等7个特点。

“边”指稠油主要分布在一些张性断裂比较发育的剥蚀带地区,而这些地区主要分布在盆地(或凹陷)边缘。西部凹陷是典型的箕状凹陷,具有边缘急剧抬升、洼陷下沉的构造特点。边缘斜坡带成为油气大规模运移和聚集的主要指向区,烃源岩区运移来的油气进入到盆地边缘地层水强烈交替带,原油发生严重生物降解作用。原油沿着地层倾斜方向自上而下存在着明显变化规律,下倾部位原油保持原生性,而上倾部位原油均发生不同程度的稠化^[6-7],甚至在盆地边缘形成沥青。这类稠油油藏一般规模较大,也是辽河西部凹陷稠油主要油藏类型。

“浅”指辽河油田稠油多分布在浅部地层,多位于2 km以浅。一般而言,原油密度随着深度增加而变小。微生物降解可使原油稠变^[8],微生物的生存和繁殖需要适宜的温度条件,当温度超过70℃时,微生物的生存将受到抑制^[9],而温度又受到深度控制,因此,深度是控制原油生物降解的重要因素之一。同时原油的氧化—降解程度与地层水中氧含量、地层水矿化度等因素有关。地表水注入越强,地层水矿化度越低,氧的供应就越充分,原油的氧化—降解程度越强。盆地边缘背景上形成的油藏埋藏浅、地温低(小于70℃),具备了微生物生成条件,使得原油生物降解稠化。西斜坡稠油一般分布于几百米至1 500 m的浅层,雷家—高升—牛心坨稠油主要分布于1 100~2 000 m。

“松”指稠油层砂岩相对疏松。辽河稠油层砂岩碎屑颗粒粒度变化较大,分选性差,压实固结程度相对较差,成岩强度弱^[10]。由于埋藏浅,储层砂岩处于成岩早期,机械压实和化学胶结作用弱,使得储层砂岩较松散,砂岩多由成分成熟度低的岩屑组成。总的来看,稠油较易在疏松的砂层富集,随着深度变浅而原油变稠,这是因为疏松的油层有利于地表水的注入,形成强烈水交换带,有利于微生物的生存,进而发生生物降解作用,致使原油降解

形成稠油。

“早”指通过对碎屑岩稠油储层特征研究表明,稠油的形成具备“四早”特点:早成岩、早溶解、早进油和早氧化。早成岩是指辽河稠油油藏处于早成岩—中成岩未成熟阶段,热演化程度低,早期成岩阶段使得储层机械压实和化学压实作用相对较弱,碎屑成分结构成熟度低,岩性不稳定;早溶解是指受埋藏浅、封闭不严的成岩环境影响,地表水不断进入储层孔隙空间,溶解作用大于沉淀作用,早期溶解作用是造成碎屑岩稠油储层孔隙度高的最主要因素之一;早进油表现在成岩阶段早期,油气即进入储集空间,形成油气储集体,但不同稠油分布区域进油期有所差别;早氧化是指储层中由于大气淡水过早淋滤,带入氧分子和硫酸盐,具有边运移边氧化的特点,使储层较早就接受氧化,为原油稠变提供了氧化环境,也为喜氧细菌提供了繁衍生息的场所,导致原油发生明显的氧化和生物降解。

“降”指绝大多数稠油都经历了微生物降解的过程,从而使原油进一步稠化。在原油的稠化过程中,生物降解占主导作用,活跃的水体是细菌类微生物活动的载体^[11]。西部凹陷地下水极其活跃,绝大部分稠油与地表水直接接触,为微生物活动提供了良好条件,具体表现为底水、边水甚至四周被水包围。冷东油田冷43块沙三段油藏的解剖表明^[12],随着原油饱和烃、烃类化合物不断靠近油水界面,其含量逐渐降低,降解作用不断增强。同层油柱出现“上稀下稠”现象,在辽河西部凹陷东部陡坡带和东营凹陷北部陡坡带^[13]均出现原油“上稀下稠”、“上下稀、中间稠”等反常现象,表明微生物降解影响稠油的分布。

“失”指在油气运移过程中往往伴随着轻烃组分的大量散失。油气运移一般以断裂带为主,油气自下而上不断运移,随着压力和温度不断减小,原油中轻烃组分和天然气不断析出,导致原油密度、黏度和胶质沥青含量不断增加,使原油变稠。一般来讲,下台阶断块油藏油质较轻,原始油气比高,基本为常规油藏;而上台阶油藏埋藏相对较浅,封盖质量相对较差,天然气和轻质组分大量逸散,又往往处于地层水交替带,原油降解作用明显,油质重而稠。这种稠油油藏往往在形成过程中边运移、边散失、边氧化,最终形成“顶稠下稀”,甚至形成稠油自身封堵油气藏。轻质组分严重散失,这也是东营凹陷边缘油藏的原油均为稠油的重要原因^[7]。

“盖”指稠油往往分布在区域盖层相对不发育的地区,这也是稠油油藏一个重要特征。盖层分布

由盆地中心向盆地边缘逐渐变差,厚度也不断变薄。西部凹陷不同盖层条件的原油稠化程度不同,如东营组单层泥岩盖层(隔层)厚度小,易遭受较强的剥蚀,且其上覆地层岩性较粗,地表水容易向下渗透,使沙一段油藏更易遭受地表水的影响。盆地边缘地区由于泥岩相对不发育,稠油相对较为发育;而在盆地中心构造部位,尽管有的油藏很浅,但由于盖层相对较为发育,也很难形成稠油油藏。

3 稠油成因机理探讨

稠油形成比正常油气成藏更为复杂,要求的地质条件也更加苛刻。辽河拗陷稠油主要分为 2 类,即原生未熟稠油和次生稠油。前者是指原油未经过后生改造而生成的一种稠油,该类稠油的密度比较大;后者是指原油经过后生改造而生成的一种稠油。研究表明,西部凹陷稠油以“次生稠油”为主,分布十分广泛,其稠油成因机理也更为复杂,更应综合考虑各种地质条件。

3.1 构造格局是稠油空间分布的决定因素

统计表明,辽河拗陷约 83.3%的稠油分布在西部凹陷西斜坡的边缘地区,还有约 16%的稠油分布在西部凹陷东部陡坡带的边缘地区。在深大断裂附近虽然可以见原油稠化现象,但都没有形成规模储量。在洼陷中心位置,尽管油藏分布较浅,但并未发现稠油。可见构造位置对稠油分布有明显的控制作用,这是因为构造运动为油气的运移与聚集提供了动力和有利场所,但构造的剧烈变动,往往造成油气藏暴露地表或发育与其连通的散逸断层,会使部分油气特别是天然气散失,进而形成稠油。先超后剥的斜坡带,更有利于在盆地边缘浅部形成稠油封闭带^[14-15]。

辽河拗陷稠油油藏主要分布在盆地(凹陷)边缘,其边界断层性质属于张性类,且多为同生断层,该类断层易受大气水的降解、氧化以及渗滤作用的影响;同时,稠油油藏分布地区均受到不同程度的剥蚀作用。以西部凹陷为例,进一步探讨稠油分布与构造的关系。在古近系沙河街组沙四段沉积初期,其北部牛心坨地区沉积最早。随着沉积中心向南迁移,沙三段沉积早期在西部凹陷北部高升地区形成了半封闭的湖湾环境,沉积了一套成熟度偏低的烃源岩;此时的凹陷南部斜坡带高部位仍然处于剥蚀阶段。到了沙三段沉积时期,随着盆地湖盆范围扩大,沉积中心继续南移到南部的清水洼陷,而牛心坨—高升地区剧烈抬升遭受剥蚀。沙一段和沙二段沉积时期基本属于断拗转换期,构造格局变

化不大,水体变浅,沙二段为一套较粗的砂砾岩。从东营组沉积后构造回返,西部斜坡带抬升,湖岸线东移,沉积相带也由老至新自西向东推移,形成了不同时期含油带自西向东展布的规律。到东营组沉积末期,西斜坡的抬升达到了高峰,西部斜坡带整体上升露出水面,东营组及以下地层普遍遭受剥蚀,在地表水氧化作用下形成西斜坡西缘的稠油封闭带。即使在同一个斜坡带,其构造发展史和沉积发育也是各有特色,其原油稠化程度也有差别。曙光与欢喜岭油田同处西部凹陷的西部斜坡,曙光油田稠油油藏在长期抬升的古构造作用下,自下而上存在多期不整合及长期发育的断裂系统,因此,该区稠油分布层位多;而欢喜岭稠油区则处于相对沉降部位,降解程度稍弱。总的来看,西部斜坡南部曙光至欢喜岭油田的稠油演化程度呈现出从轻微降解至剧烈降解较完整的序列,其趋势是:(1)从南向北,原油稠化程度加重,这与断裂活动控制下的构造发展历史相吻合;(2)相同层位的稠油,高断块的稠化程度要比埋藏较深的低断块强烈;(3)相同断块区的不同层位中,新层位要比老层位的原油稠化程度重。西部凹陷西斜坡中段的曙光一区稠油最为富集。西部斜坡带是先超后剥蚀斜坡带,早期沿斜坡向上超覆,后期斜坡带西翼不断抬升,使油层被剥蚀,轻组分严重散失,并且在地表水的氧化和生物降解的双重作用下,原油呈现出自东到西深度变浅、逐渐变稠的特征(图 2)。

3.2 沉积储层是原油稠变的主要因素

由于稠油形成需要生物降解和水洗作用,只有和地表水充分接触才能有利于原油稠化,因此,疏松的沉积储层为地表水的充分渗入和淋滤提供了最佳条件,也为油气散失提供了方便。地表水的渗入,淋滤作用的不断进行改变着孔隙结构,致使孔隙度特高成为突出特点,可见沉积储层对稠油油藏的形成有着重要的作用。

辽河西部凹陷古近系各套碎屑岩稠油储层其沉积受近源河流短促快速堆积、靠近盆地边缘等影响(图 3),沉积体系类型多样,主要发育有扇三角洲、重力流水下扇及陆上冲积扇、泛滥平原(河流)(表 1),沉积上多处于湖盆近岸部位。目前资料表明,辽河拗陷碎屑岩稠油层系,主要有扇三角洲和浊流沉积两种类型,储层物性相对较好。从某种程度上而言,储层空间上的变化可以直接影响和控制稠油的性质。如冷 83 井,自上而下,储层的成岩作用持续增强,原油的降解作用则逐渐减弱,稠油黏度逐渐降低,生物降解作用逐渐减弱。整体表现为

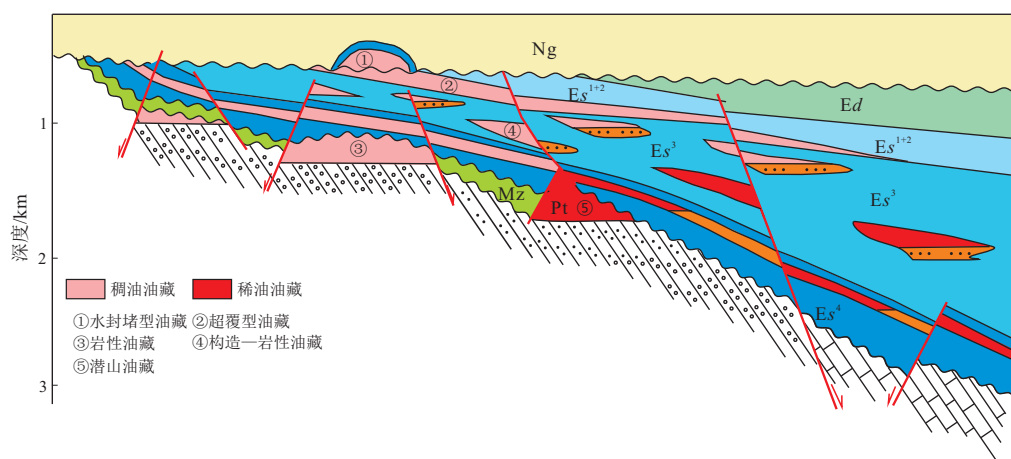


图 2 渤海湾盆地辽河坳陷西部凹陷曙光一区各层系油藏分布

Fig.2 Distribution of oil reservoirs in Shu 1 area of western sag, Liaohe Depression, Bohai Bay Basin

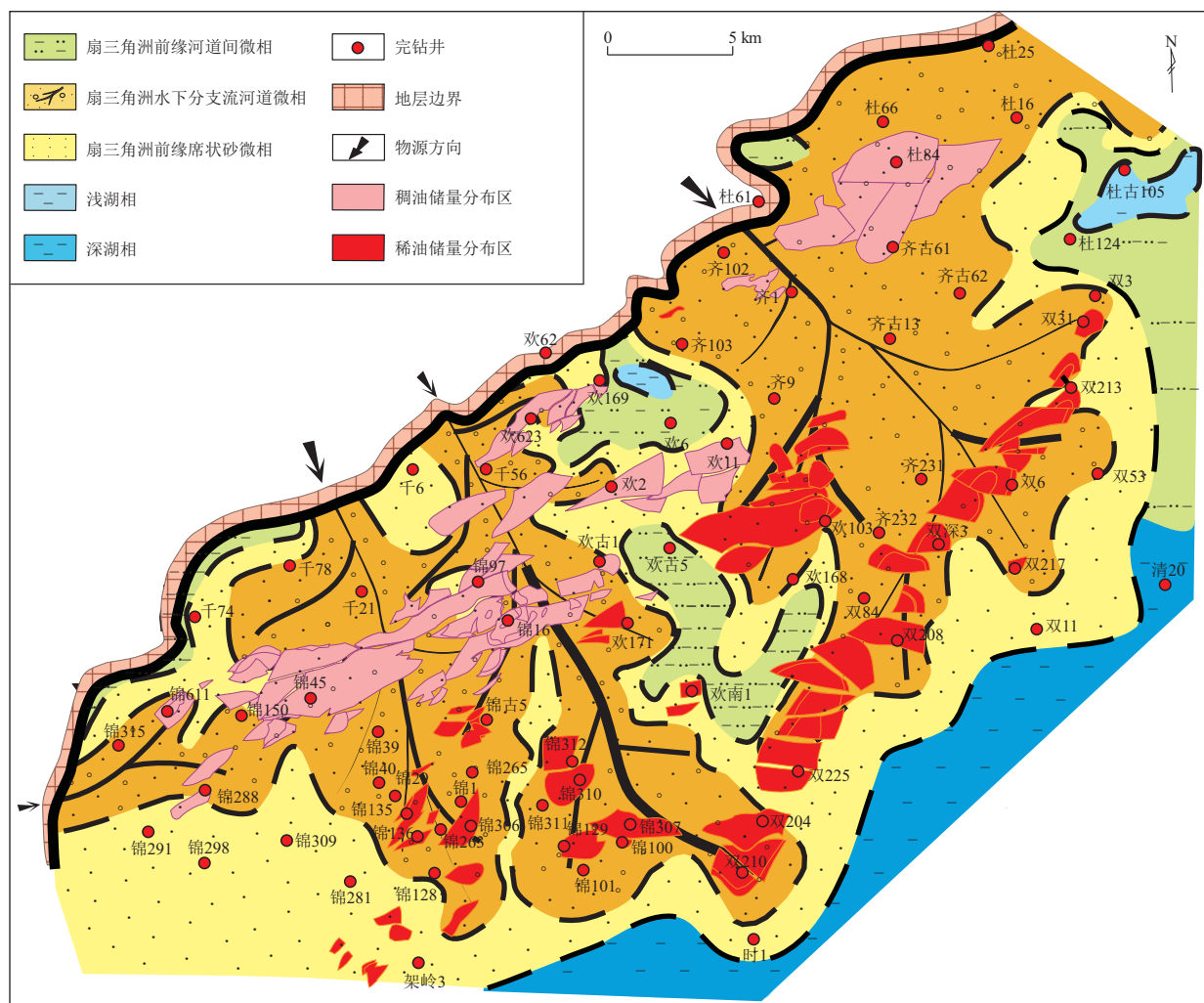


图 3 渤海湾盆地辽河坳陷西部凹陷南部地区沉积相与油气分布

Fig.3 Sedimentary facies and oil-gas distribution in the southern part of the western sag, Liaohe Depression, Bohai Bay Basin


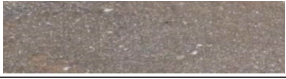


砂岩粒度为中、粗时饱和油, 粒度为中、细时含油性较好, 粒度为粉砂岩以下时含油性差, 渗透率与稠油含油饱和度之间存在正相关^[16]。

综上所述, 高孔渗储层可为原油的稠变奠定

一定的基础, 而原油稠变又可以对储层进行相应的改造。当油气进入储集层聚集后, 所形成的超压会缓冲压实作用, 抑制石英和伊利石的胶结作用; 同时, 油气所形成的大量酸性流体促进深部储

表 1 渤海湾盆地辽河坳陷西部凹陷不同沉积类型稠油储层岩性与物性数据

Table 1 Lithology and physical properties of heavy oil reservoirs of different sedimentary types in the western sag, Liaohe Depression, Bohai Bay Basin

储层沉积类型	代表区块	主要储层岩性	岩心照片	储层物性		距物源
				孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	
冲积扇	杜84块	砾岩、砂砾岩		25~36	375~5 540	近 ↑ ↓ 远
泛滥平原(河流)	洼83块	中—细砂岩		31~32	710~1 690	
扇三角洲前缘	齐40块	粗—中细砂岩		26~36	680~2 185	
重力流水下扇	杜84块	砂砾岩、含砾砂岩		15~25	480~1 805	

层的溶蚀改造作用,对次生孔隙的形成,储层的改善有重要意义;进一步提高储层的松散程度,提高原油的稠变速度,为原油的稠变提供了良好环境及场所。

3.3 埋深对原油稠变有重要影响

在辽河坳陷中,储层的埋藏深度对原油密度的影响较大(图 4b),温度决定了微生物降解底线,而温度又受到深度控制,地表水的渗入和淋滤也受深度的控制。因此,埋深对原油稠变有重要的控制作用,结合它们之间的关系,可以将原油油藏纵向上划分为 3 个区带:

氧化带(I):底界深度约为 1 200 m,该层段水体以溶滤渗入水为主,氧化能力强。正是由于氧化作用的影响,导致该层段原油比重普遍较高,均值为 0.942,表现为稠油富集区带。

氧化—还原过渡带(II):底界深度约为 1 700 m,该层段处于中等埋藏深度,属开放到封闭的过渡地

质环境,同时介于早成岩晚期—晚成岩早期之间,孔渗条件中等偏下。该层段外部水体补给减弱,水体以自生水为主,地层水氧化能力显著降低,局部流动、径流条件弱,原油密度严格受控于氧化程度及封闭条件。封闭差的地区,原油蚀变为稠油;封闭较好的地区,原油保存较好,多为轻质油。故该层段为辽河坳陷重质、中质和正常油混合分布带。

还原带(III):深度大于 1 700 m,是辽河坳陷正常油分布带,原油比重小于 0.93。该层段埋深大,地层温度相对较高,不利于微生物生存,同时处于相对封闭环境,地表水难以渗入,总体处于还原环境,不利于原油稠化,所以该层段原油保存较好,为稀油和天然气富集区带。

3.4 地下流体活跃性对原油稠变起重要作用

原油稠变过程中,无论是氧化、水洗还是生物降解等作用,均离不开含有地层水的环境。地层水中溶解的氧主要有 2 个方面的作用,包括为喜氧细

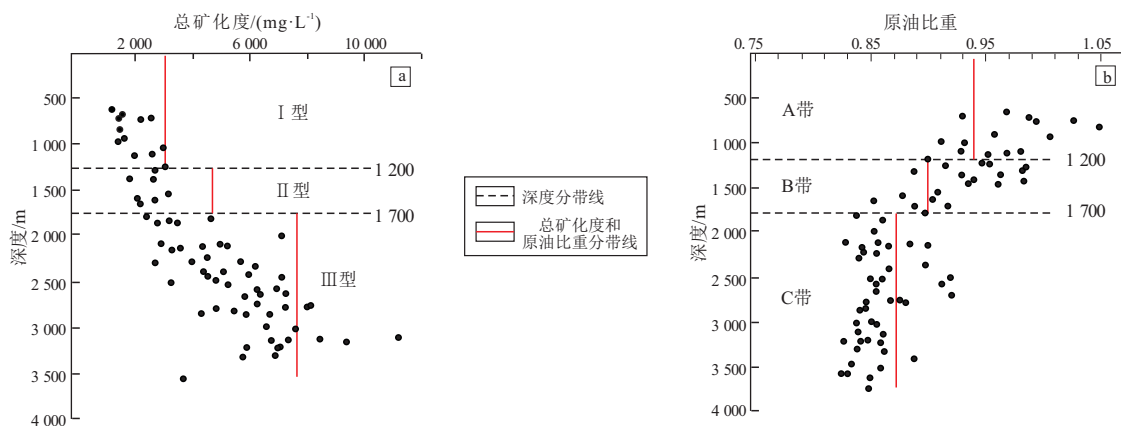


图 4 渤海湾盆地辽河坳陷地层水总矿化度(a)和原油比重(b)随深度变化及分带特征

Fig.4 Variation and zoning characteristics of total mineralization of formation water (a) and crude oil specific gravity (b) with depth in Liaohe Depression, Bohai Bay Basin

菌生存提供场所和氧化烃类。在含油气沉积盆地多年勘探实践中,已经揭示地层水平面和纵向上具有明显的分带性^[17]。本次研究依据辽河坳陷构造特征、地层水补给条件、水蚀变作用的强弱,将地层水平面上自盆缘向盆内分为水交替强烈带、水交替缓慢带和水交替滞留带(图5):

水交替强烈带(相当于I带):浅部开放体系地下水系统,也是强烈水文交替带。该水文地质带明显受到浅部地下水强烈的蚀变作用,矿化度比较低、封闭条件非常差;大气水非常活跃,地层水的氧化能力较强,获得比较充足的水源补给,也是微生物最活跃的层段,是辽河坳陷稠油主要分布带。

水交替缓慢带(相当于II带):中部半封闭体系地下水系统,也是氧化—还原过渡带。该水文地质带为中部地下水蚀变作用减弱带,生物降解作用较弱,只有在地层剥蚀严重的地区,原油可蚀变为稠油,因此,为混合原油主要分布带。

水交替滞留带(相当于III带):深部封闭体系地下水系统,也是还原带,由于温度、压力等影响,细菌不能生长。该水文地质带为地下水蚀变作用消失带,说明该带储层都处于还原环境。与此同时,由于氧浓度含量低,氧化作用弱,这个水文地质带为正常油分布带。

辽河油田地层水离子矿化度总体较低,含氧度高,稠油富集。造成这种现象的原因是,在东营组沉积末期,由于受到区域抬升作用,西部凹陷西斜坡的东营组及沙河街组遭受剥蚀。在剥蚀边缘区,

淡水会持续性顺着断裂及不整合面流动,地下流体活跃,容易与地表进行物质交换,流体中矿物离子浓度低,含氧浓度高,整体处于高氧化环境,致使目的层中原油稠变。

3.5 较差的封盖条件是稠油油藏形成的重要条件

盖层对稠油的控制作用越来越受到人们的重视^[18-20]。研究认为盖层条件是渤海油区原油稠化的决定性因素^[21];异常流体压力对稠油形成也起到了重要作用^[22],稠油主要分布在异常流体压力相对缺乏的区域。

从稠油形成机理分析,稠油形成过程中天然气及轻烃组分散失、生物降解和水洗作用起到了重要作用,因此,要保证上述作用的发生,就要求盖层质量不能太好。

从辽河坳陷稠油分布特征分析,在稠油发育区,虽然有一定的盖层条件,但是一般以局部盖层为主,往往缺乏区域盖层。总的来说,区域盖层封盖条件相对较好,封盖能力强,可有效抑制地表水的渗入和淋滤。区域盖层对原油性质的控制作用非常明显^[23],盆地边缘或盆地内部凸起上的剥蚀、超覆等作用,会导致区域封闭完全丧失,使储层开启,加快油气散失和稠变,从而在不同层位形成稠油带。

3.6 生物降解和氧化作用是原油稠变的必要条件

从地球化学的角度而言,生物降解以及氧化作用也会对原油稠变产生一定的影响。关于生物降解方面的研究,很多专家学者都已经做了十分深入

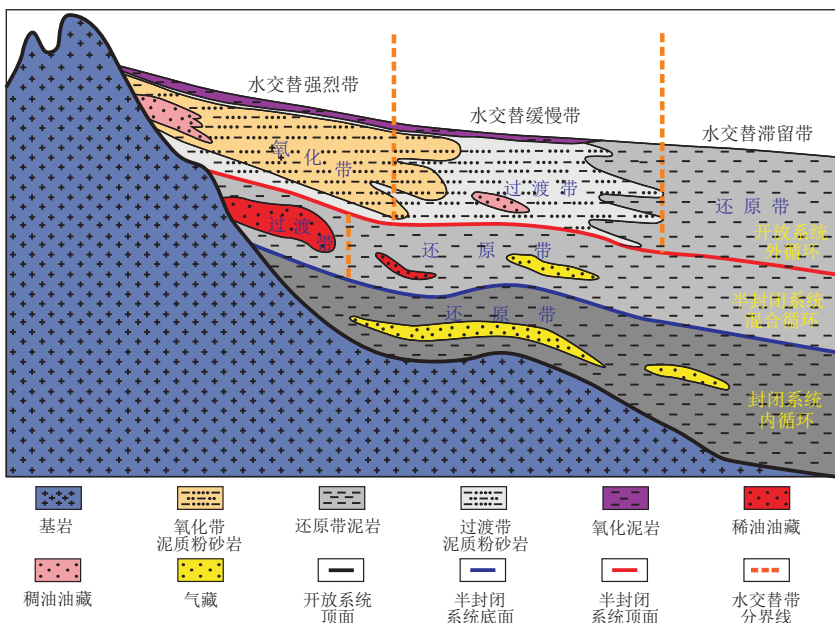


图5 渤海湾盆地辽河坳陷承压水动力平面分布特征示意

Fig.5 Plane distribution of confined hydrodynamic forces in Liaohe Depression, Bohai Bay Basin

的分析和探索。尽管生物降解以及氧化作用是原油稠变的必要条件,但是只有在特定的地质条件下才可以进行,因此,它们并不是充要条件。

4 稠油油藏分布规律

辽河拗陷稠油分布规律非常明显,平面上主要分布在拗陷的斜坡边缘剥蚀区。以西部凹陷为例,进一步探讨油气分布规律。西部凹陷具有油气围绕生油洼陷分布的特征(图 6),由内到外依次存在 3 个环带:(1)内带,以天然气、凝析油为主,埋深一般较深,大于 3 500 m。由于该带基本位于生油洼陷内,油气基本来自沙四段和沙三段,个别地区受断层的影响,油气可以运移到浅层,但是由于该带盖层条件好,尽管油气可以运移到极浅部位,但是很少有稠油分布。(2)中带,以稀油为主,局部天然气富集,且溶解气占优势。该带含油层位逐渐变新,以沙一、二段为主,局部地区发育稠油藏。欢喜岭油气田、兴隆台油气田和曙光油气藏均在该带内,埋深约在 1 700~3 500 m 之间。(3)外带,保存条件相对较差,含油层位更新,以沙一、二段和馆陶组油藏为主,且以稠油为主。曙光稠油油藏、欢喜岭稠油油藏、雷家—高升—牛心坨稠油油藏均位于该带内,埋深一般小于 1 700 m。

在纵向上,稠油基本分布在埋深小于 1 700 m 的浅层,个别地区可达 2 000 m 左右,这是因为在构造作用控制下,张性断裂发育的剥蚀带是稠油主

要分布区。从水文地质条件来看,在氧化—弱氧化的水化学环境下,由于不断有大气水的补给,使原油发生稠变。到了一定埋深,没有大气水的补充,也不具备氧化的水化学环境,很难使原油发生稠变,而且随着深度不断增加,盖层逐渐变好,油气难以散失。从压力分布的角度去分析,稠油主要分布在拗陷斜坡边缘剥蚀区的泄压带,个别地区分布于断裂活动强烈的断阶带。因为总体上封盖条件差^[24],导致轻质油散失,在氧化和生物降解的作用下,使原油不断稠化。

综上所述,辽河拗陷基本形成了深部天然气、凝析油—中深部正常油气—浅部稠油的分布格局;从平面上由拗陷中心为天然气、凝析油逐渐过渡为正常油气,到了拗陷边缘为稠油的分布规律。

5 勘探启示

受稠油形成机制的控制,稠油分布往往发育在独特构造位置和沉积相带,对勘探有以下两点启示:

(1)盆地边缘的砂砾岩体往往是稠油的分布区。按照油气分布规律,一个地区在内带和中带都有油气藏发现,且原油密度往拗陷边缘有增大的趋势,就可以预测其构造上倾有利部位发育稠油油藏。结合构造位置、储层特征和环洼分布等地质条件,认为辽河拗陷在西斜坡的西八千、高升地区边部,清水洼陷东侧等地区仍然会有稠油分布。近年来,根据这一认识,在西部凹陷西八千地区已经获

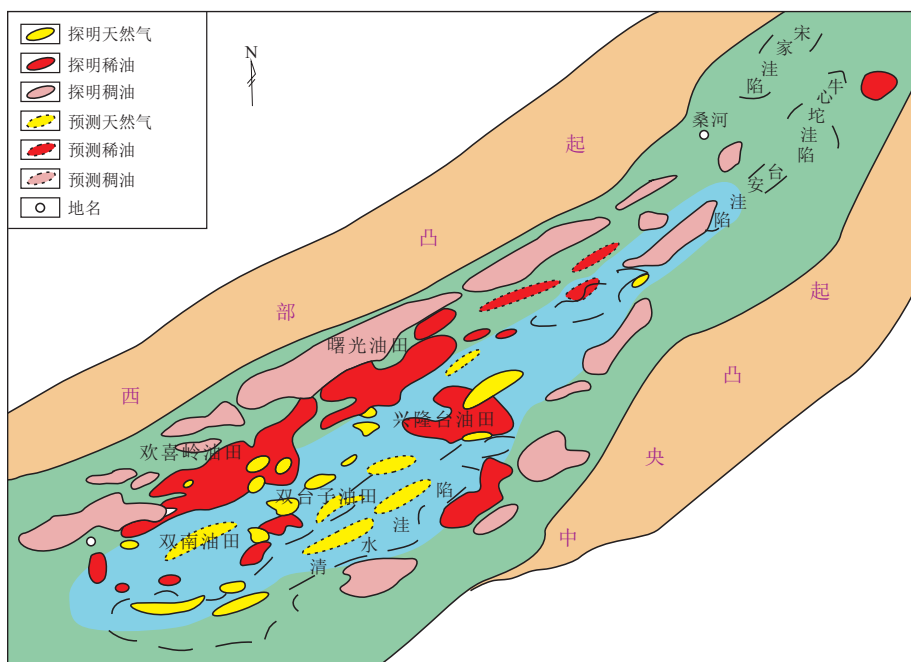


图 6 渤海湾盆地辽河拗陷西部凹陷油气平面分布

Fig.6 Plane distribution of oil and gas in the western sag, Liaohe Depression, Bohai Bay Basin

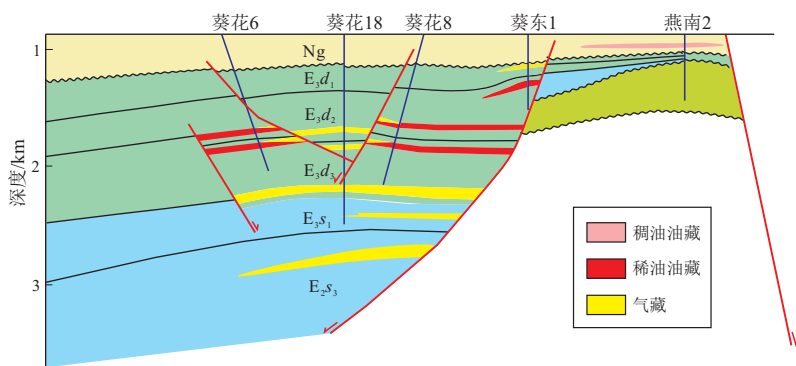


图7 渤海湾盆地辽河拗陷过葵花6—燕南2井油藏剖面示意

Fig.7 Reservoir profile from well KH 6 to YN 2 in Liaohe Depression, Bohai Bay Basin

得新发现。该认识运用到辽河外围的开鲁盆地陆西凹陷,也获得稠油油藏新的勘探发现。

(2)油气分布有特定展布序列,结合环洼分布特征,可以对未发现油气进行预测。辽河拗陷油气平面分布具有明显的规律性,拗陷中心为天然气、凝析油逐渐过渡为正常油气,到了拗陷边缘为稠油。因此,油气分布基本可以分3个带,若发现了2个带,也可以预测另一个带的存在。最为典型的是成功预测辽河滩海东部地区稠油,分别在内带与外带发现了太阳岛—葵花岛构造天然气藏和燕南构造带稠油油藏,但是在稀油条带一直没有勘探发现。后来结合油气环洼分布的理论,认为它们之间存在稀油油藏,这个条带应该位于稠油条带的下台阶、天然气条带的上台阶(图7)。根据这一认识,加强了构造精细研究,落实了葵东构造带,部署葵东1井。葵东1井多层获得百吨以上的高产油气流,打开了滩海勘探新局面。

6 结论

(1)辽河拗陷的稠油分布具有十分显著的6个特征,即“边、浅、松、早、降、失、盖”,这些特点决定了稠油一般分布在浅层,在平面上一般分布在盆地(凹陷)的边缘斜坡。

(2)辽河拗陷的稠油形成机制受多种因素控制,单纯从地球化学角度去研究稠油成因机理有很大局限性,甚至在一定程度上掩盖了其控制因素。稠油分布主要受构造格局、储层特征、油藏埋深、地下流体、封盖条件和氧化及生物降解作用等因素控制。生物降解、水洗与氧化作用这些地球化学条件虽然是原油稠变必不可少的因素,但只是其中一个重要因素,而非关键控制因素。这也启发我们对于稠油这种多种因素控制的油藏,应该从构造、沉积、水文地质、盖层等多角度去分析,才能得出正确认识。

(3)油气藏分布明显具有环洼分布的规律,稠油多分布在外带,按照这一分布规律,可以很好指导稠油勘探。

参考文献:

- [1] 徐矛唐,牟易中.对辽河油田西斜坡稠油成因的分析[J].石油学报,1983,4(3):12.
XU Maotang, MOU Yizhong. Analysis on the genesis of heavy oil in the west slope of Liaohe Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 1983, 4(3): 12.
- [2] 卢松年,李伟民,郜建军,等.辽河盆地西部凹陷下第三系原油和生油岩的生物标记化合物研究[J].地球科学(武汉地质学院学报),1986,11(3):295-302.
LU Songnian, LI Weimin, GAO Jianjun, et al. The biological markers in the crude oil and source rocks of Lower Tertiary from western depression, Liaohe Basin [J]. Earth Science (Journal of Wuhan College of Geology), 1986, 11(3): 295-302.
- [3] 邱振馨.辽河断陷稠油油藏的分布规律[J].断块油气田,1995,2(2):4-7.
QIU Zhenxin. Distribution of the viscous oil reservoir in Liaohe Rift Basin [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 1995, 2(2): 4-7.
- [4] 胡见义,徐树宝,程克明.中国重质油藏的地质和地球化学成因[J].石油学报,1989,10(1):1-11.
HU Jianyi, XU Shubao, CHENG Keming. Geological and geochemical origin of the heavy oil reservoirs in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 1989, 10(1): 1-11.
- [5] 李素梅,庞雄奇,高先志,等.辽河西部凹陷稠油成因机制[J].中国科学(D辑 地球科学),2008,38(S1):138-149.
LI Sumei, PANG Xiongqi, LIU Keyu, et al. Formation mechanisms of heavy oils in the Liaohe Western Depression, Bohai Gulf Basin [J]. Science in China (Series D Earth Sciences), 2008, 51(S2): 156-169.
- [6] 牛嘉玉,翁维瑾,徐树宝,等.辽河西部凹陷重油聚集条件与原油稠变特征[J].石油学报,1990,11(4):17-24.
NIU Jiayu, WENG Weijin, XU Shubao, et al. Heavy oil accumulation and thickening characteristics of oils in Liaohe Western Depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 1990, 11(4): 17-24.
- [7] 杜殿发,张雪,束青林,等.中高渗透边水稠油油藏产液能力论证与应用[J].油气地质与采收率,2021,28(6):46-53.

- DU Dianfa, ZHANG Xue, SHU Qinglin, et al. Demonstration and application of liquid-producing capacity in medium-high permeability heavy oil reservoirs with edge water [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2021, 28(6): 46-53.
- [8] 李二庭, 史权, 马聪, 等. 生物降解稠油极性化合物负离子电喷雾傅立叶变换离子回旋共振质谱分析 [J]. *石油实验地质*, 2022, 44(3): 515-521.
- LI Erting, SHI Quan, MA Cong, et al. Analysis of polar compounds in biodegraded heavy oil by negative ion electrospray Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(3): 515-521.
- [9] 蔡国刚, 鞠俊成. 辽河西部凹陷稠油成藏机制及深化勘探方法探讨 [J]. *特种油气藏*, 2010, 17(4): 35-38.
- CAI Guogang, JU Juncheng. An approach to heavy oil accumulation mechanism and in-depth exploration in western Liaohe Depression [J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2010, 17(4): 35-38.
- [10] 魏喜, 李学万, 崔向东. 辽河油区稠油储层砂岩特征及原油微观分布 [J]. *特种油气藏*, 1995, 2(1): 47-56.
- WEI Xi, LI Xuewan, CUI Xiangdong. The sandstone characterization of heavy oil reservoir and micro distribution of crude oil in Liaohe oil zone [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 1995, 2(1): 47-56.
- [11] CONNAN J. Biodegradation of crude oils in reservoirs [M]// BROOKS J, WELTE D H. *Advances in petroleum geochemistry*. London: Academic Press, 1984: 299-330.
- [12] 方朝亮, 张一伟, 张枝焕. 冷东—雷家地区重质稠油地球化学特征及成因分析 [J]. *石油实验地质*, 1994, 16(4): 354-365.
- FANG Chaoliang, ZHANG Yiwei, ZHANG Zhihuan. Geochemical characteristics and genetic analysis of heavy viscous oil in the Lengdong Leijia area [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 1994, 16(4): 354-365.
- [13] 邱桂强, 李素梅, 庞雄奇, 等. 东营凹陷北部陡坡带稠油地球化学特征与成因 [J]. *地质学报*, 2004, 78(6): 854-862.
- QIU Guiqiang, LI Sumei, PANG Xiongqi, et al. Characteristics and genetic mechanisms of heavy oils on the north steep slope of the Dongying Depression in the Bohai Bay Basin, East China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(6): 854-862.
- [14] 杨勇. 胜利油田稠油开发技术新进展及发展方向 [J]. *油气地质与采收率*, 2021, 28(6): 1-11.
- YANG Yong. New progress and next development directions of heavy oil development technologies in Shengli Oilfield [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2021, 28(6): 1-11.
- [15] 于兰兄, 张庆龙, 冯昕, 等. 断层在辽河曙一区超稠油油藏形成中的作用 [J]. *大庆石油学院学报*, 2005, 29(6): 21-24.
- YU Lanxiong, ZHANG Qinglong, FENG Xin, et al. Effect of fault on the process of super heavy-oil reservoir formation of Shu 1 block in Liaohe Basin [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2005, 29(6): 21-24.
- [16] 张凤霄. 沾化凹陷三合村洼陷沙三段稠油储层研究 [D]. 青岛: 中国石油大学, 2015.
- ZHANG Fengxiao. Research on characteristics of heavy-oil reservoir in Es₃ in Sanhecun Sub-sag of Zhanhua Sag [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015.
- [17] 陈振岩, 满安静, 陈星州, 等. 沉积盆地水文地质与砂岩型铀矿成矿关系: 以松辽盆地开鲁拗陷砂岩型铀矿为例 [J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(6): 1174-1184.
- CHEN Zhenyan, MAN Anjing, CHEN Xingzhou, et al. Relationship between hydrogeology and sandstone uranium mineralization in sedimentary basin; a case study of sandstone uranium survey in the Kailu Depression of the Songliao Basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(6): 1174-1184.
- [18] 蔡盼盼. 辽东湾地区稠油藏形成和主控因素研究 [D]. 青岛: 中国石油大学, 2017.
- CAI Panpan. A study on formation mechanism and main controlling factors of the heavy oil reservoirs in Liaodong Bay area [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [19] 袁清秋. 辽河盆地西部凹陷稠油形成条件分析 [J]. *特种油气藏*, 2004, 11(1): 31-33.
- YUAN Qingqiu. Analysis of heavy oil genetic conditions in the western sag of Liaohe Basin [J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2004, 11(1): 31-33.
- [20] 张守昌. 辽河油区原油稠变的影响因素分析 [J]. *特种油气藏*, 2004, 11(5): 24-26.
- ZHANG Shouchang. Influence factors of crude oil densification in Liaohe oil province [J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2004, 11(5): 24-26.
- [21] 邓运华. 渤海油区稠油成因探讨 [J]. *中国海上油气*, 2006, 18(6): 361-364.
- DENG Yunhua. A discussion on the origin of heavy oil in Bohai oil province [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2006, 18(6): 361-364.
- [22] 陈振岩, 苏晓捷. 辽河西部凹陷船舱式油气运聚系统特征初探 [J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30(4): 1-4.
- CHEN Zhenyan, SU Xiaojie. Cabin-type oil and gas migration characteristics of the Western Sag, Liaohe Depression [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(4): 1-4.
- [23] 刘伟, 唐大卿, 陈明月, 等. 松辽盆地南部孤店断陷断裂构造特征及演化 [J]. *断块油气田*, 2022, 29(6): 816-823.
- LIU Wei, TANG Daqing, CHEN Mingyue, et al. Fault structure characteristics and evolution in the Gudian fault depression, southern Songliao Basin [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2022, 29(6): 816-823.
- [24] 李晓光, 陈永成, 李玉金, 等. 渤海湾盆地辽河拗陷油气勘探历程与启示 [J]. *新疆石油地质*, 2021, 42(3): 291-301.
- LI Xiaoguang, CHEN Yongcheng, LI Yujin, et al. Petroleum exploration history and enlightenment of Liaohe depression in Bohai Bay basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42(3): 291-301.