

渤海湾盆地辽河坳陷西部凹陷全油气系统特征与勘探潜力

李素梅^{1,2}, 刘佳^{1,2}, 马学峰³, 庞秋菊³, 赵知非^{1,2}

[1. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 3. 中国石油华北油田分公司勘探开发研究院, 河北任丘 062552]

摘要:高成熟探区油气勘探方向是当前困扰老油田的现实问题,采用地质与地球化学途径解析了渤海湾盆地辽河坳陷西部凹陷全油气系统特征。研究表明:①西部凹陷已探明油气田12个、油气层18套,油气相态齐全,油气藏类型丰富。②从新至老层系,油气探明储量呈正态分布;从斜坡至凹陷区,稠油油藏、稀油油藏和凝析气藏呈阶梯状分布。③主力烃源岩有机质类型好(I-II型)、丰度高(总有机碳含量 $TOC=9\%$)、成熟度范围广(镜质体反射率 $R_o=0.4\%\sim 3.0\%$)。④发育淡水成熟型、咸水低成熟型、淡水-咸水混源型和深源成熟型4类原油。⑤探明油气具有源控烃、古隆起与构造高点控藏、主干断裂控油气运聚、沉积相及砂体与储层物性控烃、成烃与成藏条件匹配好及成藏模式多样等特征。依据全油气系统理论,西部凹陷自由流体动力场下的油气主要分布于埋深小于3500 m的层系,页岩油气藏、深层致密油气藏(埋深 $>3500\text{ m}$)和潜山油气藏等是西部凹陷重要的非常规油气勘探领域。

关键词:油气成因;非常规油气;全油气系统;成藏特征;沙河街组;西部凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Characteristics and exploration potential of the whole petroleum system in the Western Sag, Liaohe Depression, Bohai Bay Basin

LI Sumei^{1,2}, LIU Jia^{1,2}, MA Xuefeng³, PANG Qiuju³, ZHAO Zhifei^{1,2}

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, Huabei Oilfield Company, PetroChina, Renqiu, Hebei 062552, China]

Abstract: Currently, identifying viable hydrocarbon exploration targets in high-maturity exploration provinces remains a critical challenge for mature oilfields. Using geological and geochemical methods, we analyze the characteristics of the whole petroleum system (WPS) in the Western Sag in the Liaohe Depression, Bohai Bay Basin. The results indicate that the Western Sag contains 12 proven oil and gas fields and 18 pay zones, exhibiting complete hydrocarbon phases and rich hydrocarbon reservoir types. The proven petroleum reserves in the sag exhibit a normal distribution pattern from younger to older strata. The region from the slope margin to the sag shows a stepped distribution of heavy oil, light oil, and condensate gas reservoirs sequentially. The organic matter of the major source rocks is characterized by favorable kerogen types (types I and II), high abundance (TOC content: 9%), and a wide maturity range (R_o values: $0.4\%\sim 3.0\%$). Four types of crude oil are found in the sag: a mature type of freshwater origin, a low-maturity type of saline water origin, a type of mixed freshwater and saline water origin, and a mature type of deep-seated origin. Proven hydrocarbon resources in the sag are characterized by the controlling effects of source rocks on the distribution of hydrocarbons of varying origins. These resources show hydrocarbon accumulation governed by paleo-uplifts and structural highs, hydrocarbon migration along major faults, and the distribution of varying hydrocarbon pool types controlled by sedimentary facies and the physical properties of sand bodies and reservoirs. Furthermore, these hydrocarbon resources are characterized by well-matched hydrocarbon generation and accumulation conditions and diverse hydrocarbon accumulation patterns. The WPS theory reveals that hydrocarbon accumulations within the free

收稿日期:2024-05-30;修回日期:2025-08-05。

第一作者简介:李素梅(1968—),女,教授、博士研究生导师,有机地球化学。E-mail: sml@cup.edu.cn。

基金项目:中国石油科技部项目(2021DJ0101);国家自然科学基金项目(42073064)。

fluid dynamic regime of the Western Sag are primarily confined to stratigraphic intervals at depths less than 3 500 m. In addition, shale hydrocarbon reservoirs, deep tight hydrocarbon reservoirs (burial depths > 3 500 m), and buried-hill zones are identified as important targets for unconventional hydrocarbon exploration in the sag.

Key words: hydrocarbon genesis, unconventional hydrocarbon, whole petroleum system (WPS), hydrocarbon accumulation characteristics, Shahejie Formation, Western Sag, Bohai Bay Basin

引用格式:李素梅,刘佳,马学峰,等. 渤海湾盆地辽河拗陷西部凹陷全油气系统特征与勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(4): 1183–1199. DOI: 10. 11743/ogg20250411.

LI Sumei, LIU Jia, MA Xuefeng, et al. Characteristics and exploration potential of the whole petroleum system in the Western Sag, Liaoh Depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(4): 1183–1199. DOI: 10. 11743/ogg20250411.

辽河拗陷处于渤海湾盆地东北隅,勘探面积约 12 000 m²,占渤海湾盆地总面积的 1/20。迄今油气勘探开发历时 50 年,目前石油和天然气探明储量分别为 240 × 10⁸ t 和 7 250 × 10⁸ m³,常规油、气资源探明率分别为 58.7% 和 17.1%;累计生产原油 49 × 10⁸ t,天然气 8 950 × 10⁸ m³,储量采出率分别为 23.3% 和 47.4%,勘探开发已经进入高成熟阶段^[1]。西部凹陷是辽河拗陷最重要的产油凹陷,油气勘探潜力与勘探方向面临诸多难题,如老油区勘探潜力与挖潜方向、非常规油气(页岩油、致密油)的有利勘探区与资源潜力等。全油气系统理论是近年提出的新型石油地质理论^[2–5],指含油气盆地内一个包括由相互关联的源岩层形成的全部油气、油气藏、油气资源,以及其形成条件、演化过程和分布特征在内的自然系统,其对指导西部凹陷这类高成熟度探区的油气勘探具有重要的现实意义。当前,基于全油气系统的各类别油气资源联合共存的成因机制、分布规律、常规和非常规油气藏有序分布的基本模式、各类别油气资源形成分布的主控因素与定量评价模型^[6–8]、成藏模式^[9–10]以及油气资源评价方法^[11–14]等指导油气勘探方面的研究已取得重要进展^[15–18]。本文以辽河拗陷西部凹陷为例,解析该凹陷的全油气系统特征,探讨油气勘探潜力与有利方向。

1 全油气系统石油地质特征

辽河拗陷是在华北地台基础上,受中生代—新生代区域拉张构造背景控制,在地幔上隆和裂陷共同作用下形成的中—新生代多旋回大陆裂谷盆地。受主干断裂控制,辽河拗陷整体呈 NE 向狭长状展布,具有凹—凸相间排列的构造格局(图 1a)。西部凹陷是辽河拗陷中最大的生油凹陷,面积约 2 530 km²,具有“东断西超、东陡西缓”的构造特征。该区钻遇地层自下而上依次为太古宇—中生界基底,古近系房身泡组、沙河街组和东营组,新近纪馆陶组和明化镇组,以及第四系,

形成了多层次的生—储—盖组合。西部凹陷可划分出牛心坨凸起带、牛心坨—台安凹陷带、西部斜坡带、盘山—陈家洼陷带、双台子构造带、中央隆起带、清水洼陷带、冷家压扭构造带以及中央凸起倾没带等 9 个构造单元。

1.1 构造演化特征

由于受太平洋板块俯冲的影响,西部凹陷以伸展断裂为主。伸展断裂是在区域拉张作用下形成的,是西部凹陷古新世—始新世构造活动的主要表现形式。新生代盆地形成和演化主要经历古近纪裂陷期和新近纪拗陷期(图 1b),其中裂陷期可进一步划分为初始裂陷期(沙河街组四段沉积期,即沙四期)、强烈断陷期(沙三期)、断—拗过渡期(沙一期—沙二期)和差异升降期(东营组沉积期,即东营期)等 4 个阶段。①沙四期是辽河断陷盆地形成雏形期,整体构造处于初期下降阶段,受地壳引张力作用,形成单面山和垒—堑相间的古地貌形态,随着地层填平补齐作用和基底西翘东倾的加剧,产生了一系列断层。②沙三期为深陷期,整个地区急剧大幅度沉陷,湖水变深,沉降速度大于沉积速度,沉积了大量暗色生油岩和重力流砂体。此时西侧地区相对拱升,断层活动加剧,断距增大,并产生一系列新断层。沙三末期盆地萎缩,整体抬升,顶部遭受剥蚀。③沙一期—沙二期,构造活动减弱,湖水变浅,以扇三角洲相沉积为主,水下分支流河道广泛发育。④东营期,辽河盆地整体抬升,遭受强烈的风化剥蚀。该期断裂活动较强烈,地壳大规模上升,西部斜坡带等地层隆起幅度较大,产生多条次一级小断层。东营末期断裂活动减弱,到馆陶早期断裂活动全部消亡。之后,辽河盆地进入统一的拗陷发育期。

新生代,西部凹陷表现为以 NNE 向—NE 向基底正断层为主构成的伸展构造系统和以 NNE 向深断裂右旋走滑位移诱导的走滑构造系统叠加的构造变形特征。该区断层可分为 3 种类型:①早期活动型断层,主要是沙四期和沙三早期形成和活动的断层,属于初始

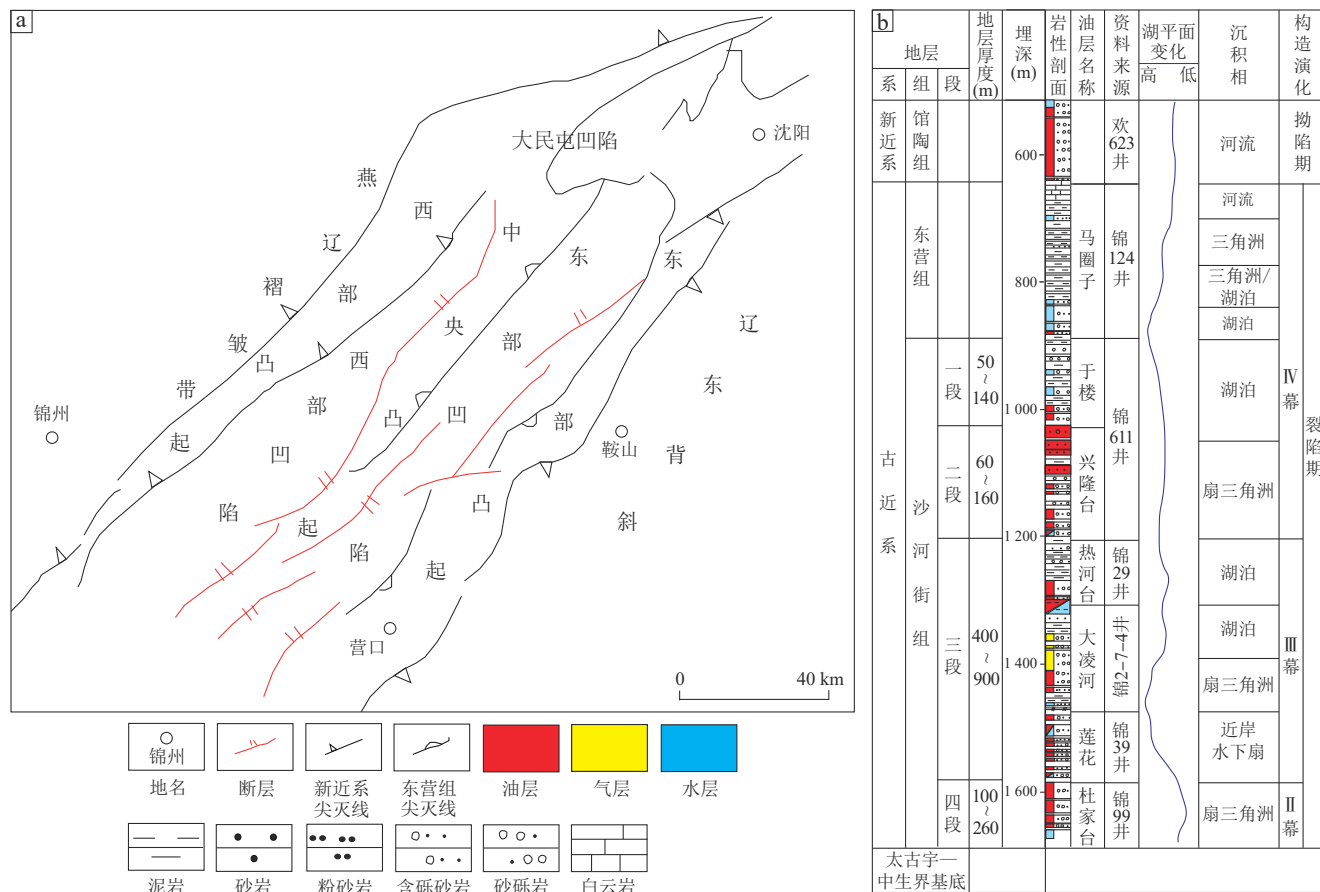


图1 渤海湾盆地辽河拗陷构造单元划分简图(a)及西部凹陷地层综合柱状图(b)

Fig. 1 Sketch map of structural units in the Liaohe Depression (a) and composite stratigraphic column of the Western Sag, Bohai Bay Basin (b)

裂陷期断层;②长期活动型断层(继承性发育断层),在沙三期以来长期发育;③晚期活动型断层,主要在东营期一新近纪形成和活动的断层,NE向主干断裂控制沙(沙河街组)四段-沙三段油气藏的分布,近WE向断裂控制沙二段-沙一段油气藏的分布,同时两期的断裂(沙四期-沙三早期、东营期-新近纪)也造成了“东西分带、南北分块”的构造格局。西部凹陷新生代断裂构造表现为2个层次(下部断裂系统在沙四段-沙三段下部构造层发育;上部断裂系统切割盆地盖层,主要在沙一段-沙二段及其以上的上部构造层发育)和2个优势方向(NNE向-NE向和NEE向-近WE向)。断裂活动可以分为沙四期、沙三期、沙二期-东营期和新近纪等4个活动时期。

1.2 地层与沉积特征

西部凹陷在不同地质时期发育了多样化的沉积环境,主要包括湖泊、河流、三角洲、扇三角洲和近岸水下扇等(图1,图2)。各沉积时期形成了独具特色的沉积体系,它们在平面上自湖盆边缘向中心伸展,纵向上相互叠置,构成多层次、大面积分布的储集体。

西部凹陷沙四上亚段-东营组沉积体系垂向演化表现出较为明显的继承性、新生性和旋回性。湖泊水体总体上遵循由浅湖(沙四上亚段)-深湖-半深湖(沙三下亚段-沙三上亚段)-浅湖-半深湖为主(沙二段-沙一段)-浅湖-泛滥平原为主(东营组)的演化序列,从而形成了良好的生-储-盖配置体系,为油气的生成、聚集及保存提供了理想的“硬件”。

西部凹陷古近系-新近系主要发育以下沉积相类型:扇三角洲相、远岸浊积扇相、近岸浊积扇相、滑塌浊积扇、滨浅湖相、半深湖相和冲积扇相(图2)。统计表明,扇三角洲相发育的油气藏占比最大,为65%;其次为远岸浊积扇相、三角洲相、河流相和近岸浊积扇相发育的油气藏,占24%;其他3种类型沉积相内发育的油气藏仅占11%。油气藏集中发育于细砂岩、中砂岩、含砾砂岩和砂砾岩内,在这4种岩性中发现的油气藏占总数的86%;而粒度过细或过粗的储层中油气藏则相对贫乏甚至完全缺失。

1.3 生-储-盖组合特征

西部凹陷发育多层次的生-储-盖组合,共发现了

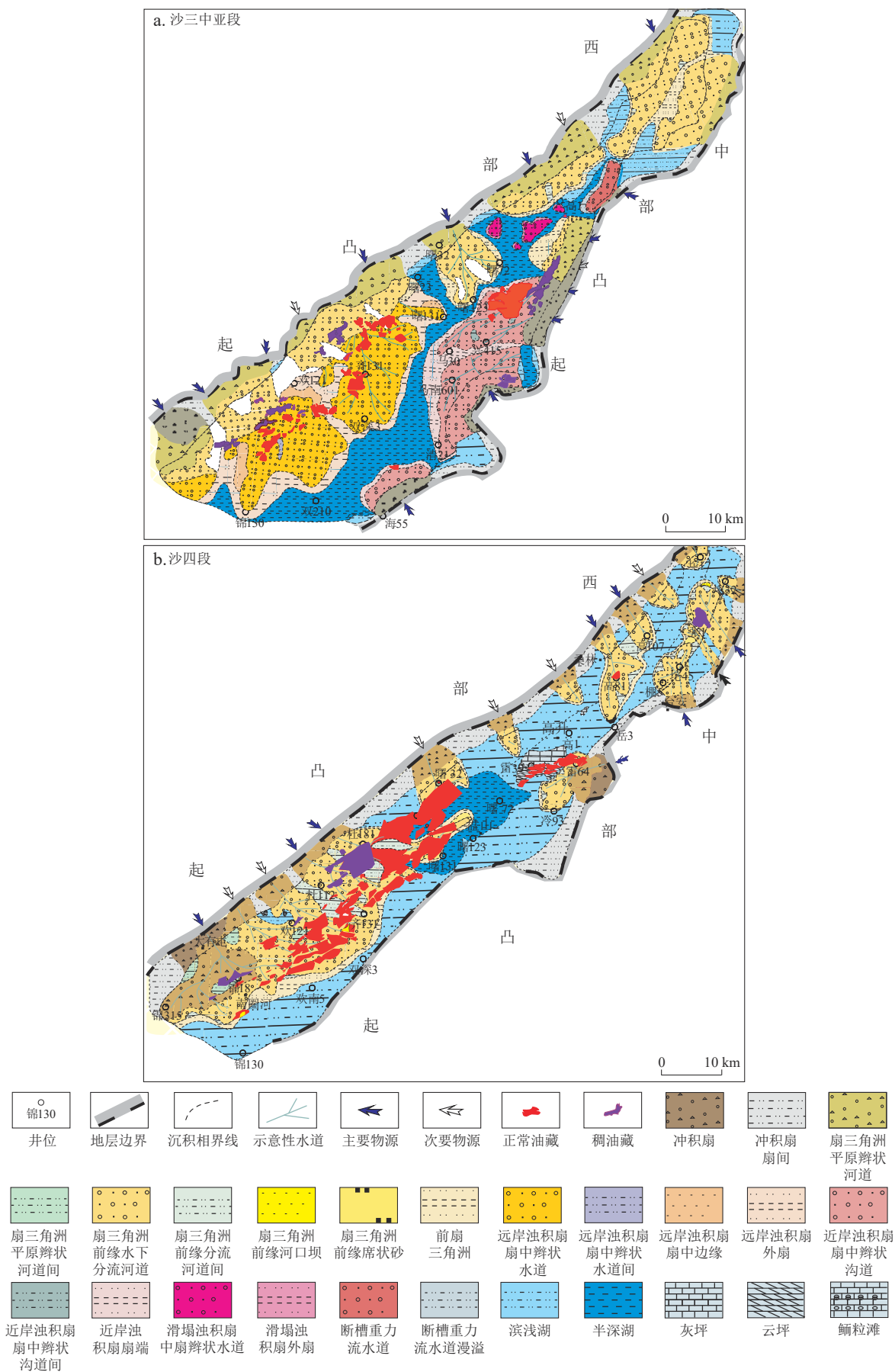


图2 辽河坳陷西部凹陷部分层系沉积相和油气分布特征

Fig. 2 Sedimentary facies and hydrocarbon distribution characteristics in partial sequences of the Western Sag, Liaohe Depression

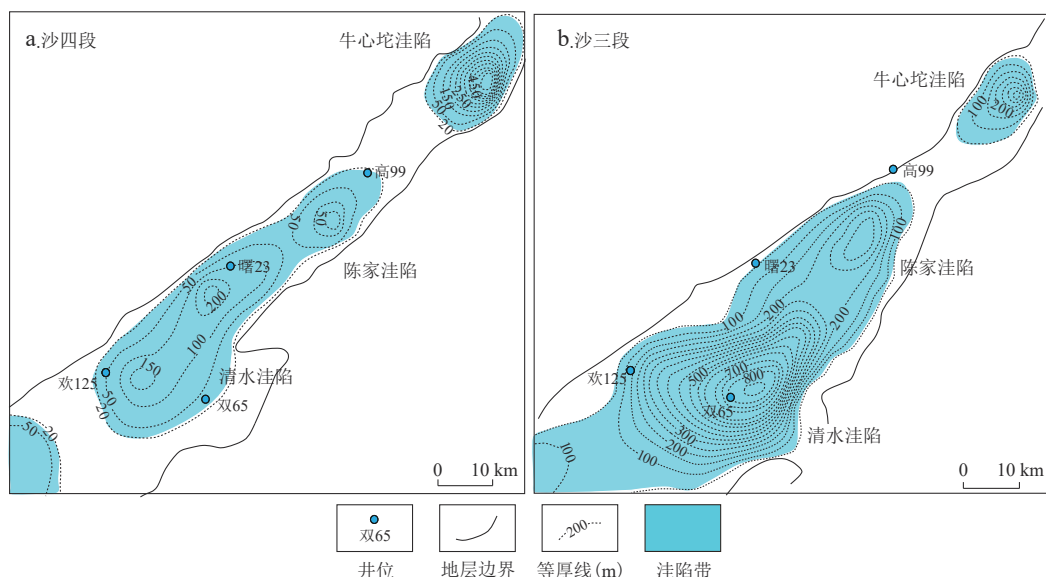


图3 辽河坳陷西部凹陷优质烃源岩厚度等值线图

Fig. 3 Isopach maps of high-quality source rocks in the Western Sag, Liaohe Depression

太古宇,元古宇,古生界,中生界,古近系沙四段、沙三段、沙二段、沙一段和东营组,以及新近系馆陶组共18套含油气层系^[19]。其中,新生界发育古近系房身泡组油层,沙四段牛心坨、高升和杜家台油层,沙三段莲花、大凌河和热河台油层,沙一段-沙二段兴隆台、于楼和黄金带油层,东营组马圈子油层,以及馆陶组饶阳河油层。此外,在太古宇,元古宇以及中生界义县组、沙海组、阜新组和孙家湾组也分别发育油层^[19],充分展现了该凹陷极高的油气富集程度。

西部凹陷发育沙四段和沙三段2套主力烃源岩(图3),其中沙四段烃源岩品质优于沙三段^[19]。沙四段烃源岩呈北厚南薄分布,厚度在350~500 m;沙三段烃源岩则呈南厚北薄特征,南部最大厚度可达1 200 m^[19]。统计表明,无论横向上还是纵向上,距离生烃中心越近,油气藏分布越多;平面上离生烃边界大于15 km或者纵向上离生烃中心大于30 km,基本上都没有油气藏分布。锦州-欢喜岭油田的稠油和稀油主要分布在3 000 m以浅的埋深范围内,绝大多数原油来自邻近生油洼陷及原地深层烃源岩。其中,清水洼陷和鸳鸯沟洼陷是该油田的主要油源区,油气主要来自沙三段及其下部层系;东营组-沙二段烃源岩可能也具有一定的生油条件,所生原油主要分布于洼陷内侧;而曙光油田和高升油田原油主要来自沙四段烃源岩^[20]。

西部凹陷储层成因类型多样,以扇三角洲-湖底扇沉积体系储集层为主。其中,沙三段和沙四段以湖底扇或扇三角洲-湖底扇沉积体系为主(图2),沙一段

和沙二段以扇三角洲沉积体系为主,东营组则以河流沉积体系为主。这些沉积砂体具有多物源、近距离搬运、快速充填、规模小、垂向砂层多、累计厚度大和物性好等特点,为油气聚集提供了优越的储集空间。凹陷内油气藏明显受沉积微相控制,主要分布在扇三角洲前缘和前扇三角洲沉积内,扇三角洲前缘水下分支河道含油性最好(图2)。不同层段油气藏分布实际上主要受沉积体系中的粗碎屑沉积砂体的控制,即本质上是良好的储集层控制了油气藏的形成与分布。西部凹陷(特别是西部斜坡带)储层物性总体呈现随埋深变浅而变好的特征,孔隙度大于30%的储层多分布在1 500~2 000 m的埋深范围。根据西部凹陷621个油气藏的统计数据显示,储层孔隙度分布范围在8.25%~33.47%,渗透率在 $(0.358 \sim 15\,000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。西部凹陷古近系沙三上亚段和沙一中亚段存在全区分布的区域性泥岩盖层,而沙四段和沙三段既是良好的烃源岩(图3)^[23]、又是良好的直接盖层。这些盖层普遍具有排替压力高、封闭性能好的特点,为油气保存提供了有效保障。

2 油气分布特征

2.1 油气空间分布

西部凹陷具有丰富的油气资源和多样的油气藏类型(图4,图5)。作为中国重要的稠油发育基地,该区稠油和稀油资源量各占总资源量的约50%(图4)。稠

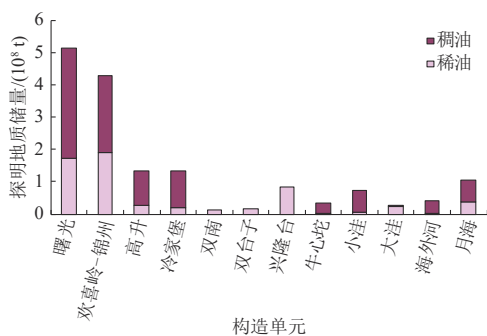


图4 辽河坳陷西部凹陷不同构造带原油探明地质储量分布柱状图

Fig. 4 Distribution of crude oil in various structural zones within the Western Sag, Liaohe Depression

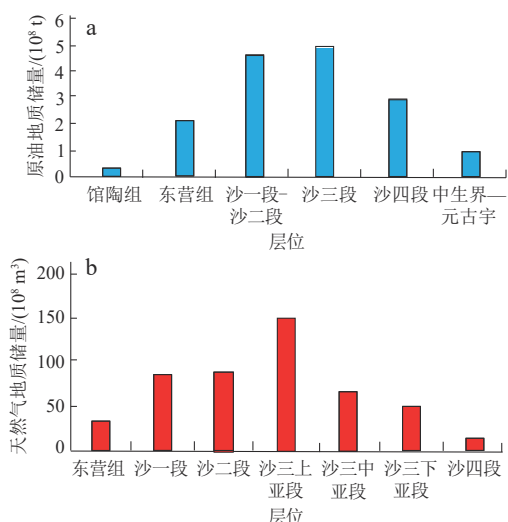


图5 辽河坳陷西部凹陷不同层系探明油气资源分布柱状图

Fig. 5 Distribution of proven hydrocarbon resources in various strata in the Western Sag, Liaohe Depression

油具有“围生油凹陷分布”“构造高部位赋存”和“浅埋藏”等特征,而稀油和天然气多赋存于构造低部位、深层及洼陷带内(图2,图6)。该凹陷已发现曙光、欢喜岭-锦州、高升、冷家堡、兴隆台、小洼、月海等含油气构造带(油气田),其中曙光和欢喜岭-锦州构造带是主要含油气区(图4)。不同构造带稠油-稀油分界深度存在显著差异:缓坡带的锦州、曙光、高升和牛心坨油田稠油油藏埋深分别在666~1 445, 500~1 500, 1 500~2 000和1 500~3 000 m;陡坡带小洼油田稠油油藏埋深范围在1 150~2 060 m,大洼油田油气藏埋藏相对较深,以稀油为主。概括而言,缓坡带稠油油藏埋深相对较浅(500~1 500 m),陡坡带稠油油藏相对较深(1 000~2 000 m),北部高升和牛心坨油田稠油油藏埋藏最深(1 500~3 000 m),反映了不同构造背景下稠油油藏形成条件的差异。从平面上看,西部凹陷油气平面分布范围较广但丰度不均(图2)。各构造单元含油性表现

为:断阶带油气最富集,其次为翘倾带、陡坡带、中央隆起带和深凹带;而中央凸起倾没带、挤压背斜带和斜坡带油气相对贫乏;牛心坨隆起带、牛心坨-台安洼陷带和盘山-陈家洼陷带仅见零星油气显示。

不同层系油气资源分布如图5所示,原油主要富集在沙三段,其次是沙一段-沙二段;天然气主要分布在沙三段,油气资源量垂向分布呈现“浅部少—中部多—深部少”的变化趋势(图5)。缓坡带原油从老至新地层均有分布,陡坡带油气则主要分布在东营组。

2.2 油气藏类型与分布

西部斜坡带油气藏类型多样,以构造油气藏和岩性-构造复合油气藏为主(图7a),占比超过70%。构造油气藏主要包括断块、断鼻和背斜油气藏3种类型,在纵向上主要分布在兴隆台油层,其次为大凌河和杜家台油层,侧向分布主要位于齐家下台阶和欢喜岭下台阶。复合油气藏主要是构造、岩性、地层之间的相互组合(如构造-岩性油气藏),纵向上看,各个层位皆有分布,且所占比例均比较高,侧向上在上台阶和下台阶均广泛分布。古隆起区和中央背斜带以构造、岩性-构造油气藏为主(图7b);陡坡带地区主要发育构造-岩性油气藏和岩性油气藏(图7c);高升-牛心坨地区主要发育构造油气藏和构造-岩性油气藏(图7d)。值得注意的是,西部凹陷稠油油藏以构造相关类型占绝对优势,表明古隆起和构造高点是控制稠油成藏的关键因素。

稠油油藏和凝析气藏的分布受构造埋深影响较大,稠油油藏一般分布在比较浅的部位,而凝析气藏分布在比较深的部位(图8)。总体上看,自斜坡区边缘向凹陷区,稠油油藏、稀油油藏、凝析气(油)藏依次呈阶梯状分布,埋深一般依次增加,纯气藏埋深一般浅于凝析气藏。纵向上,在长期发育的继承性大型构造中,多套含气层系呈现自下而上由气顶油藏渐变为纯气藏的特点;平面上,从中央凹陷向周边斜坡带,天然气赋存状态由单一的溶解气逐渐过渡为溶解气、气顶气和纯气藏共存,西部斜坡带稠油分布区未见气顶气和纯气藏气。统计数据显示,干气主要分布在埋深1 700 m以浅的浅层,而湿气埋深一般大于1 700 m,反映了油气运移过程中的相态分异作用。

3 油气性质分布序列

3.1 油气物性与相态特征

西部凹陷油气相态较为复杂,主要包括稠油、稀油

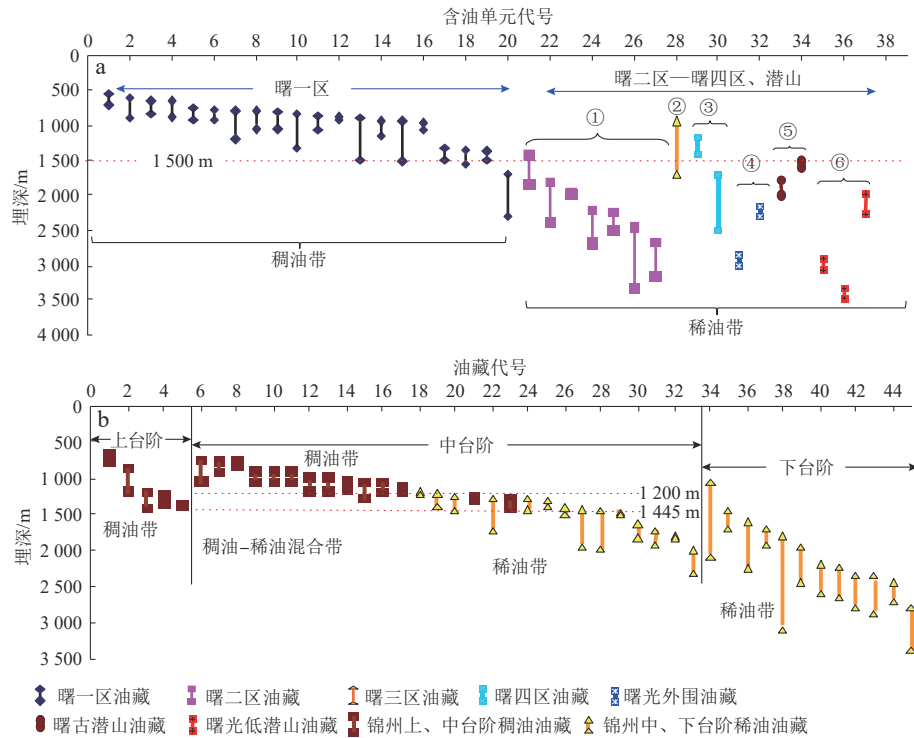


图6 辽河坳陷西部凹陷稠油和稀油随埋深分布特征

Fig. 6 Burial depth-varying distributions of heavy and light oils in the Western Sag, Liaohe Depression

a. 曙光油田, 37个含油单元; b. 锦州油田, 45个油藏, 据李素梅等(2008b)^[20]

①曙二区; ②曙三区; ③曙四区; ④曙光外围; ⑤曙古潜山; ⑥曙光低潜山

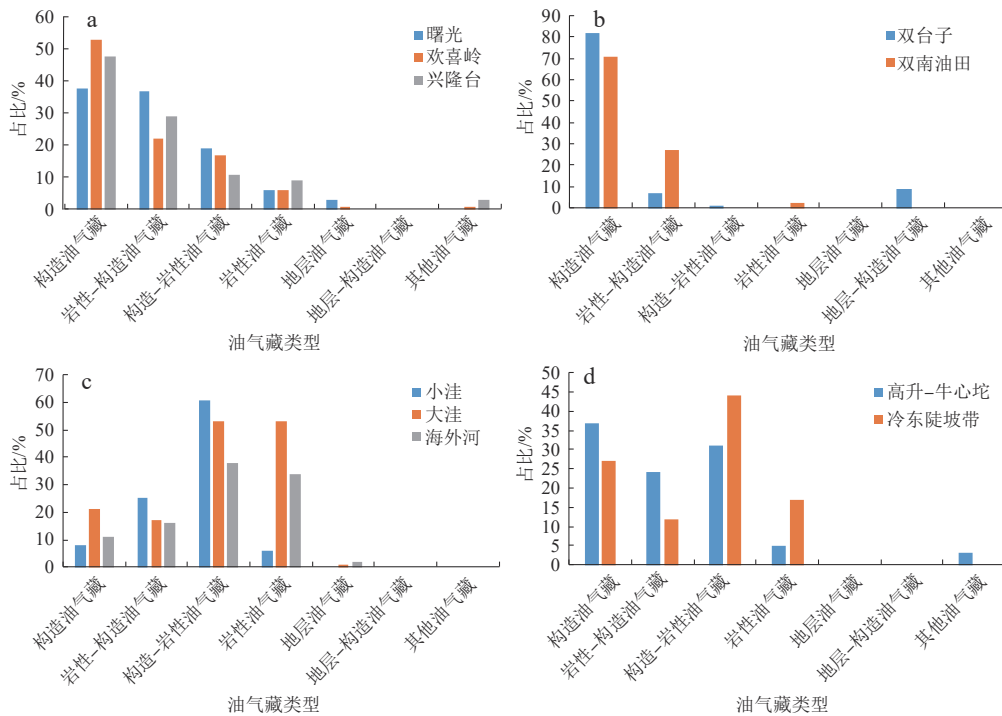


图7 辽河坳陷西部凹陷不同油气藏类型分布柱状图

Fig. 7 Distributions of various hydrocarbon reservoir types in the Western Sag, Liaohe Depression

a. 缓坡带+兴隆台油气藏; b. 古隆起-中央隆起带油气藏; c. 陡坡带油气藏; d. 高升+牛心坨油气藏

和凝析油等多种类型。稠油油藏均分布于凹陷边缘地区,集中发育于压实水与地表水交替带,随层位的由老

变新,油藏也依次从斜坡的外侧向内侧迁移。凝析气藏主要分布在齐家下台阶和欢喜岭下台阶,各凝析气

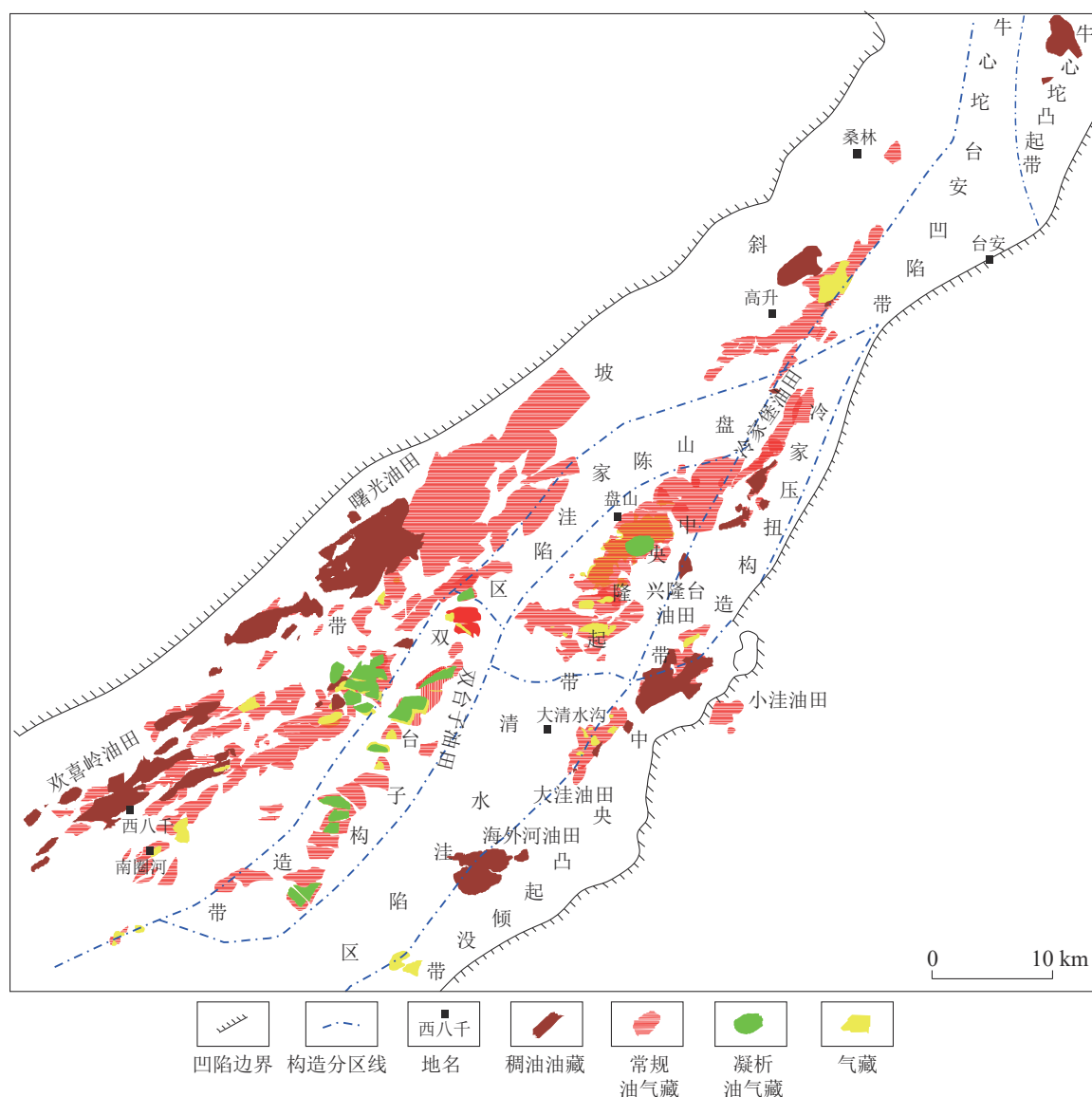


图8 辽河坳陷西部凹陷不同相态油气平面分布特征

Fig. 8 Distribution of hydrocarbons of various phases in the Western Sag, Liaohe Depression

藏在同一圈闭带内呈簇状分布。西部凹陷油气的平面分布特征显示了该区较高的油气富集度与高勘探成熟度,与全油气系统理念有极高的契合度。

统计数据显示,西部凹陷原油物性差异显著。随着油藏埋深的减小,原油密度和黏度逐渐增加,凝固点和含蜡量降低,胶质+沥青质含量增加^[21]。锦州油田原油物性发生显著变化的分界点约为埋深 1 500 m,表明该埋深是大多数稠油和稀油的相对分界线。锦州原油最高密度约为 1 g/cm^3 ,黏度基本小于 $20\,000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。曙光油田是超重质稠油发育区,曙一区原油最高黏度大于 $160\,000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。高升和牛心坨油田原油物性好于西部斜坡带。陡坡稠油油藏可能由于埋藏相对较深,原油物性相对较好,最高黏度小于 $8\,000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。

3.2 油气地球化学特征

依据原油烃类组成与分布特征,可将西部凹陷原油分为4种烃类成因类型:①锦州-欢喜岭“沙三段淡水成熟型”;②曙光-高升“沙四段咸水低成熟型”;③雷家-冷东“沙三段-沙四段淡水-咸水混源型”;④牛心坨“中生界深源成熟型”。锦州和欢喜岭油田的原油未遭受严重生物降解,具有较高的Pr/Ph比值(姥鲛烷/植烷含量比值,Pr/Ph=1.20~1.71)(图9f,图10b)、较低的伽马蜡烷丰度的特征(图9c,图10a),伽马蜡烷/C₃₀藿烷含量比值一般在0.05~0.33。曙光和高升油田原油具有明显的低Pr/Ph比值(Pr/Ph<1)(图9f,图10b)、较高的伽马蜡烷丰度特征(图9c,图10a)^[22],指示母源岩形成时水体还原性较强、盐度较高、分层显著^[23]。

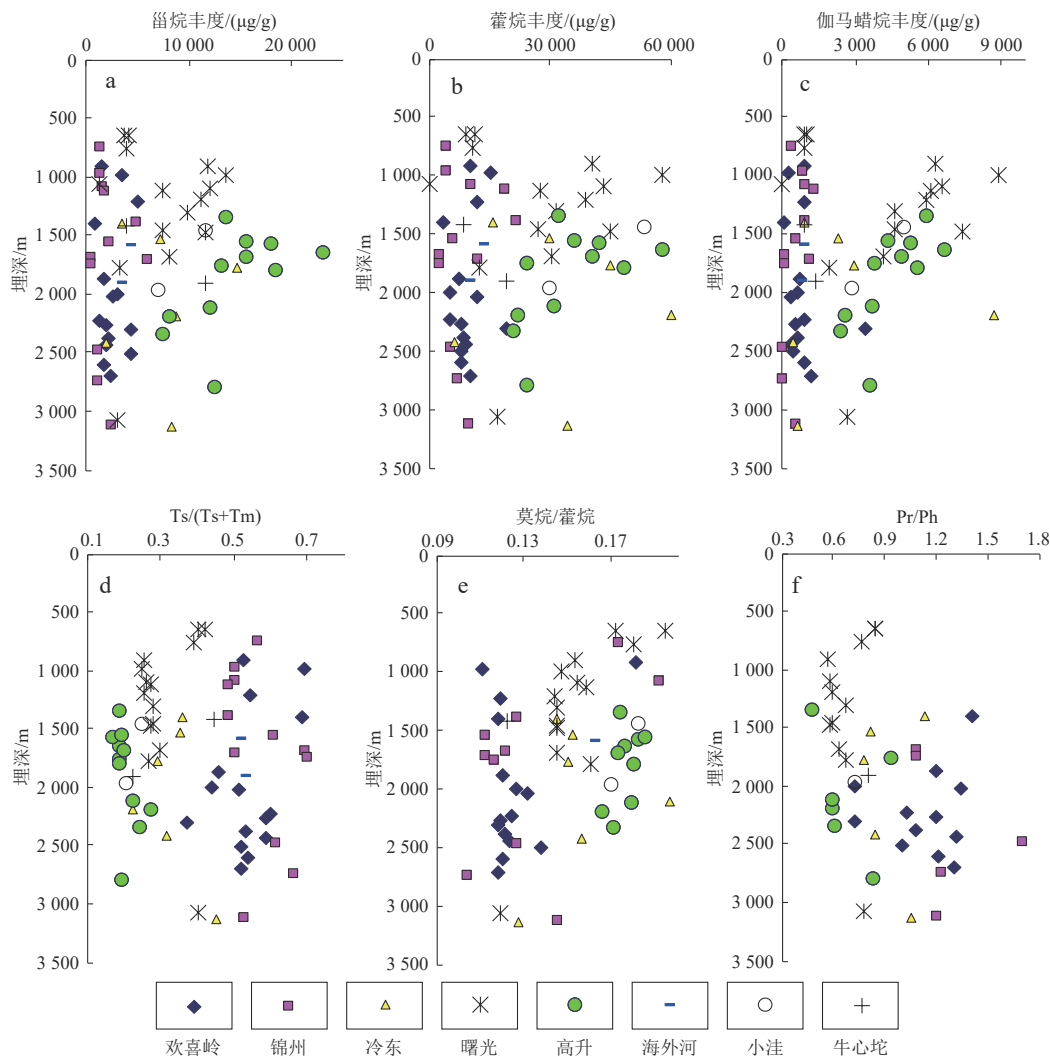


图9 辽河坳陷西部凹陷不同成因原油基本地化特征

Fig. 9 Fundamental geochemical characteristics of crude oil of varying origins in the Western Sag, Liaohe Depression

a. 甾烷系列丰度; b. 藿烷系列丰度; c. 伽马蜡烷丰度; d. $Ts/(Ts+Tm)$; e. 莫烷/藿烷; f. Pr/Ph

以上两类原油烃类特征分别与区内淡水成因的沙三段烃源岩、咸水成因的沙四段烃源岩具有一定的相关性。

雷家和冷东油田原油 Pr/Ph 比值既有沙三段淡水成因原油特征 ($Pr/Ph > 1$), 也有沙四段咸水成因原油特征 ($Pr/Ph < 1$); 伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷比值 (0.05 ~ 0.37) 反映出混合来源特征。牛心坨油田古近系-新近系原油似乎与咸水成因原油具有更多的亲缘关系 (图9c, f)。

除了沉积环境指标差异外, 生源和成熟度指标也反映不同成因原油间的差异。欢喜岭和锦州油田第一类原油具有相对较低的甾烷和藿烷系列丰度 (图9a, b), 其稀油与稠油在该特征上表现相似; 而曙光和高升油田第二类原油具有较高的甾烷和藿烷系列丰度 (图9a, b)。雷家-冷东油田原油以及小洼、海外河油田原油也具有相对较高的此类化合物丰度。从成熟度指标来看, $Ts/(Ts+Tm)$ 和莫烷/藿烷含量比值显示 (图9d, e), 曙光和高升等油田原油成熟度相对较低, 锦州和欢

喜岭油田原油成熟度相对较高。

不同相态、不同物理-化学性质油气的规律性分布, 体现了全油气系统的基本特征——油气性质差异显著, 有序变化, 主要受控于母源岩性质及其分布。

4 常规油气成因与成藏特征

4.1 油气成因特征

西部凹陷沙四段烃源岩主要为咸水相, 沙三段则为典型的淡水相^[24]。油-源对比表明, 西部斜坡带锦州、欢喜岭油田原油主要来源于沙三段烃源岩; 曙光、高升油田原油主要与沙四段烃源岩相关; 雷家-冷东油田原油具有沙三段和沙四段混合来源特征。小洼、海外河和牛心坨油田的古近系原油似乎与沙四段源岩具有更好的相关性^[24]。渤海湾盆地古近系咸水相烃

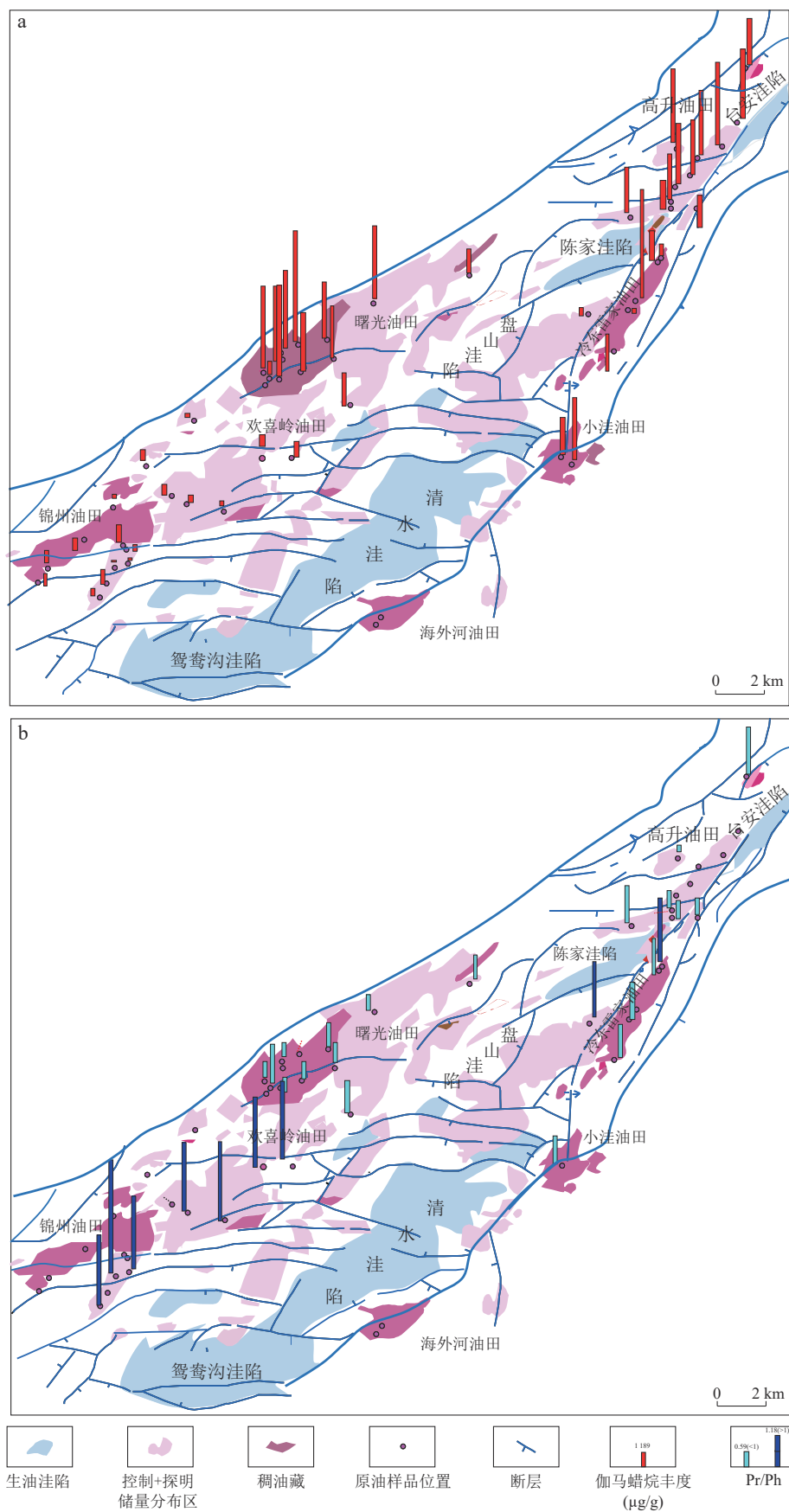


图 10 辽河坳陷西部凹陷原油伽马蜡烷丰度(a)和Pr/Ph比值(b)平面分布特征

Fig. 10 Maps showing the distributions of the gammacerane abundance (a) and Pr/Ph ratio (b) of crude oil in the Western Sag, Liaohede Depression

源岩常具有早生、早排的特征,是咸水相低成熟油的主力烃源岩之一^[25-29]。西部凹陷主要发育两种成因机制低成熟油。ESI FT-ICR MS 检测出高升油田低成熟油以 N_1 类(含有1个氮原子的杂原子化合物)为主,富含藿烷酸,大量的藿烷酸表明其生烃母质在早期成岩作用阶段经历了细菌改造作用,主要成因机制为藻类生物类脂物与细菌改造有机质的混合低温生烃^[27]。牛心坨油田低成熟油以 O_2 类(含有2个氧原子的杂原子化合物)为主,富含脂肪酸,藿烷酸含量较低,富含大量的脂肪酸和高等植物蜡质,生物类脂物低温生烃是其主要成因机制^[27]。

除了液态油外,西部凹陷还发育湿气(占主导)、凝析油和干气。西部凹陷天然气资源丰富,且分布较为广泛,一般处于低成熟或成熟阶段,主要为与原油相伴生的热降解气。天然气的主要来源为沙三段和沙四段烃源岩,不同地区烃源岩的有机质类型和成熟度等存在一定的差异,因此来源于这些烃源岩的天然气也具有不同的地球化学特征。天然气藏大多与油藏相伴生或共生(气顶气、凝析气),油气母质成熟度接近,为同源同期运移。

西部凹陷烃源岩包括沙一段-沙二段、沙三段和沙四段,其中沙三段和沙四段是主力烃源岩。不同层段烃源岩的发育如表1所示。沙四段有机质主要为腐泥组,干酪根类型指数为27~84,有机质类型为 $I-II_1$ 型;沙三段干酪根类型指数为-35~51,有机质类型为 II_1-II_2 型。从岩石类型看,棕色油页岩和褐灰色钙质泥岩为优质烃源岩(总有机碳含量 TOC 中值大于2.0%),其对油气生成可能有重要贡献。沙四段烃源

岩镜质体反射率(R_o)为0.4%~2.6%,清水洼陷和鸳鸯沟洼陷 R_o 大于2.0%,局部达到过成熟阶段;陈家洼陷 R_o 最大可达1.2%,牛心坨洼陷 R_o 最大可达1.0%,有机质基本都已达到成熟-高成熟阶段。沙三段烃源岩现今的 R_o 一般在0.4%~3.0%,其中清水洼陷和鸳鸯沟洼陷 R_o 高达3.0%,达到过成熟阶段;盘山洼陷和陈家洼陷 R_o 最大值为1.2%;牛心坨洼陷 R_o 最大可达0.8%,有机质已达到成熟晚期-高成熟阶段。沙一段-沙二段烃源岩 R_o 一般在0.4%~1.8%,其中鸳鸯沟洼陷 R_o 达1.6%,达到成熟-高成熟阶段;清水洼陷 R_o 达到1.2%;盘山和陈家洼陷 R_o 多分布在0.6%左右,有机质基本处于未成熟-低成熟和成熟早期阶段。

不同成因类型油气的规律性分布体现了全油气系统油气的基本特征——成因类型多样,分布有序,主要受控于烃源岩的类型及其分布。西部凹陷南侧主要分布淡水相成熟-高成熟油气,北侧主要分布咸水相低成熟油气,与南、北侧分别集中分布淡水相和咸水相烃源岩的分布规律相吻合。

4.2 油气成藏特征

西部凹陷常规油气成藏特征主要表现在以下几个方面:①源控作用。图10中伽马蜡烷丰度及 Pr/Ph 比值显示不同成因油气围绕相邻区烃源岩分布。沙四段咸水相烃源岩的厚度中心主要分布于牛心坨地区、陈家洼陷和西部斜坡带中南端,相关油气主要分布于高升、曙光和牛心坨(古近系)地区,原油的高丰度伽马蜡烷和甾、萜类生物标志物含量及低姥/植比($Pr/Ph < 1$)指示典型的咸水还原性成因原油特征(图10)^[24]。与

表1 辽河坳陷西部凹陷不同岩性烃源岩分布统计

Table 1 Statistical distribution of source rocks with varying lithologies in the Western Sag, Liaohe Depression

层位	构造带	烃源岩厚度/m					R _o /%	
		棕色 油页岩	褐灰色钙 质泥岩	黑灰- 深灰色泥岩	灰色- 浅灰色泥岩	灰绿色- 暗棕色泥岩		
沙四段	牛心坨	24		> 600	225		1.0	0.4 ~ 2.6
	陈家洼陷	> 180		> 240	> 90		1.2	
	西部斜坡带中、南端	> 20		120	150	70	2.0	
沙三段	清水洼陷	> 91		> 900	—		3.0	0.4 ~ 3.0
	陈家洼陷	> 90		> 950			1.2	
	盘山洼陷	54		> 950			1.2	
	牛心坨洼陷	> 20		> 400			0.8	
沙一段-沙二段	清水洼陷	> 70		> 600	—		1.2	0.4 ~ 1.8
	鸳鸯沟洼陷						1.6	
TOC/%		> 3.0	2.0 ~ 6.0	1.5 ~ 4.0	1.0 ~ 2.0	0.2 ~ 1.0	—	
有机质类型		I 型	I - II ₁ 型	II ₁ -II ₂ 型	II ₂ -III型	III型	—	

注:表中“—”表示无数据。

之相反,沙三段淡水成因的生物标志化合物特征与沙四段相反,相关油气主要分布在锦州、欢喜岭和海外河等油田,与沙三段主力烃源岩为清水洼陷和陈家洼陷等相吻合。②古隆起和构造高点是控制西部凹陷常规油气成藏的重要因素。纵观西部凹陷不同层系常规油气藏的分布,几乎都与构造高点有关,特别是稠油油藏,如缓坡带曙光、锦州、欢喜岭、雷家、冷东、小洼与海外河、高升油田等(图8,图10)。③西部凹陷主干断层控制常规油气的运移和聚集,具体表现为控制构造形态及圈闭形成、为油气运移提供通道以及控制油气分布。其中,深切油源的断层控制了油气的垂向运移,而斜坡带相对新层系的主干断层则主要控制稠油的聚集。在陡坡带,稠油油藏几乎都分布在深切断层附近,这些断层附近易发育一系列快速沉积的冲积扇和扇三角洲砂体,对稠油油藏的形成发挥了至关重要的作用。洼陷带的沙一段和沙二段油气的聚集,主要也得益于垂向断层的油气输导。④已探明常规油气藏显著受控于砂体运载层的发育程度、分布以及储层物性,如西部凹陷沙三中亚段和沙四段油层(图2)。欢喜岭和锦州油田多期次发育的西八千和齐家扇三角洲沉积砂体连片分布,为油气运移和聚集提供了良好的储集空间,其中沙三段和沙四段砂体直接与烃源岩相接触。⑤沉积相带和储层物性控烃。统计表明,油气藏在不同沉积相带中聚集的频率按浊积扇—扇三角洲—水下扇—三角洲—冲积扇—滩坝依次降低,前三者是主要的聚集相带。根据原油与沉积相关关系分析表明,稠油与稀油直接受三角洲砂体分布的控制,原油可通过指状接触直接进入砂体运载层,进而沿斜坡上倾方向侧向运移。西部凹陷稠油油藏极其发育,多数发育于高孔、高渗的储集层中,反映储层物性较强的控藏作用。⑥生、排烃期与成藏期有较好的匹配关系。东营期是油气生、排、运、聚的最主要时期,成藏资源量约为 15.45×10^8 t。根据包裹体数据统计结果显示,西部凹陷油气从沙三期末就开始了运移和聚集过程,但油气主要成藏期为东营末期。⑦油气成藏模式多样。陡坡带和缓坡带受构造样式和沉积砂体类型不同的控制,形成不同的运聚成藏模式,缓坡带连片“长砂体”被断层切割,构成阶梯型输导体系,而陡坡带“短砂体”被断层串起,形成“Y”型输导体系。兴隆台构造带具有“多方向汇聚、多渠道输导、多层系聚集、多期次成藏”的油气复式运聚成藏特点。

西部凹陷上述成藏特征体现了全油气系统常规油气成藏的基本规律——充注有先后、通道有优劣、成藏要协同、富集有条件。按照全油气系统理论,常规油气

藏成藏主要受控于浮力控制下的自由流体动力场,埋深一般小于3 500 m(孔隙度 $\geq 12\%$,图12),与实际勘探具有非常高的吻合度(图6)。

5 非常规油气勘探潜力与方向

西部凹陷油气勘探开发已经进入高成熟阶段,常规油气探明率较高,主要为受断层、砂体运载层及其组合模式控制下的、以浮力为主导运移动力的异地源及近源油气藏。相比之下,受局限流体动力场控制的源内滞留型页岩油气藏、近源致密油气藏以及潜山油气藏等非常规油气资源的勘探开发程度仍然较低。依据全油气系统理论及油气成藏地质条件,非常规油气勘探是当前及今后油气勘探的重要领域,其勘探方向可包含以下4个方面。

5.1 源内滞留页岩油气勘探

西部凹陷页岩油气勘探的有利因素体现在沙三段和沙四段优质泥页岩层系广泛发育,且普遍达到成熟—过成熟演化阶段。勘探数据显示,区内各主要生油洼陷均发育棕色油页岩和钙质泥岩沉积,部分洼陷单层厚度可达90~180 m。此类烃源岩有机质剪度高,TOC平均可达5%,最高超过9%,如曙13井(表2);有机质类型(I—II₁)好(表1),其中沙四段咸水相泥页岩生、排烃潜力最高。页岩的成熟度分布范围涵盖低成熟—过成熟各个阶段(表1;图11)。基于上述优越的成藏条件,该区页岩油气资源潜力巨大,据胡英杰等(2019)^[19]研究估算,仅雷家油田沙四段页岩油地质资源量就高达 2.3×10^8 t。在具有类似页岩发育区的济阳坳陷,已取得页岩油勘探的重大突破^[30],陆相盆地富有机质页岩层系蕴含丰富的页岩油资源^[31]。

5.2 深层致密油气勘探

西部凹陷已发现油气大多富集在区域性盖层沙二下亚段和东营组之下,埋深普遍在3 800 m以浅,绝大部分聚集在2 200~2 800 m埋深区间。从储层物性特征来看,常规油气储层的临界孔隙度约为12%,绝大部分油藏的孔隙度范围在16%~20%,其次为12%~16%。西部凹陷烃源岩经历过完整的生烃演化过程,具备大规模生油、生气的有利地质条件。依据该区烃源岩生烃演化模式和已发现油气藏的分布模式(图12),埋深在3 500 m以深的深层油气藏(主要为致密油气藏和页岩油气藏)将是今后油气勘探的重要接

表 2 辽河坳陷西部凹陷部分页岩热解和有机碳数据

Table 2 Data on pyrolysis and organic carbon content of partial shales in the Western Sag, Liaohe Depression

井号	深度/m	层位	岩性	总有机碳含量 (TOC)/%	可溶烃含量(S ₁)/ (mg/g)	热解烃含量(S ₂)/ (mg/g)	生烃潜量 (S ₁ +S ₂)/ (mg/g)	最高热解 峰温 (T _{max})/°C	氢指数 (HI)/ (mg/g)	产率 指数	烃指数	降解 率/%
杜 16	1 708.2 ~ 1 708.8	沙四段	灰褐色油页岩	8.02	1.08	52.82	53.9	432	1 176	0.02	24.05	55.99
张 1	1 878.1 ~ 1 878.2	沙四段	褐色油页岩	1.68	1.62	13.05	14.67	442	1 070	0.11	132.79	72.62
杜 22	1 252.8 ~ 1 254.9	沙四段	褐灰色页岩	2.20	0.32	8.79	9.11	427	1 157	0.03	42.11	34.55
杜 22	1 379.8 ~ 1 381.4	沙四段	灰褐色油页岩	7.01	1.66	50.16	51.82	429	1 164	0.03	38.52	61.48
高 8	1 438.2 ~ 1 443.4	沙四段	黄褐色油页岩	7.93	1.54	45.55	47.09	422	1 156	0.03	39.09	49.68
欢 11	2 382.3 ~ 2 382.6	沙四段	灰褐色油页岩	5.19	0.93	31.08	32.01	441	1 168	0.03	34.96	51.25
雷 40	2 741.1 ~ 2 745.7	沙四段	灰褐色油页岩	8.73	0.72	51.67	52.39	451	1 188	0.01	16.55	49.83
齐 18	2 038.1 ~ 2 038.3	沙四段	灰褐色油页岩	2.00	0.14	8.23	8.37	432	1 176	0.02	20.00	35.00
曙 13	1 415.4 ~ 1 416.5	沙四段	褐灰色灰质页岩	9.03	1.37	59.40	60.77	436	1 174	0.02	27.08	56.04
曙 609	1 781.1 ~ 1 781.7	沙四段	灰褐色油页岩	7.63	1.81	44.95	46.76	429	1 153	0.04	46.41	51.11
坨 16	2 311.0 ~ 2 313.0	沙四段	灰褐色油页岩	3.27	0.58	18.03	18.61	430	483	0.03	15.55	47.07
齐 5	1 365.7 ~ 1 367.8	沙三段	深灰色泥岩	2.70	0.24	11.56	11.80	432	1 168	0.02	24.24	36.67
齐 5	1 424.6 ~ 1 425.9	沙三段	黑褐色油页岩	6.88	1.90	43.74	45.64	427	1 148	0.04	49.87	55.38
曙 74	1 036.9 ~ 1 041.5	沙三段	灰色灰质页岩	3.68	0.55	15.94	16.49	433	1 155	0.03	39.86	37.50

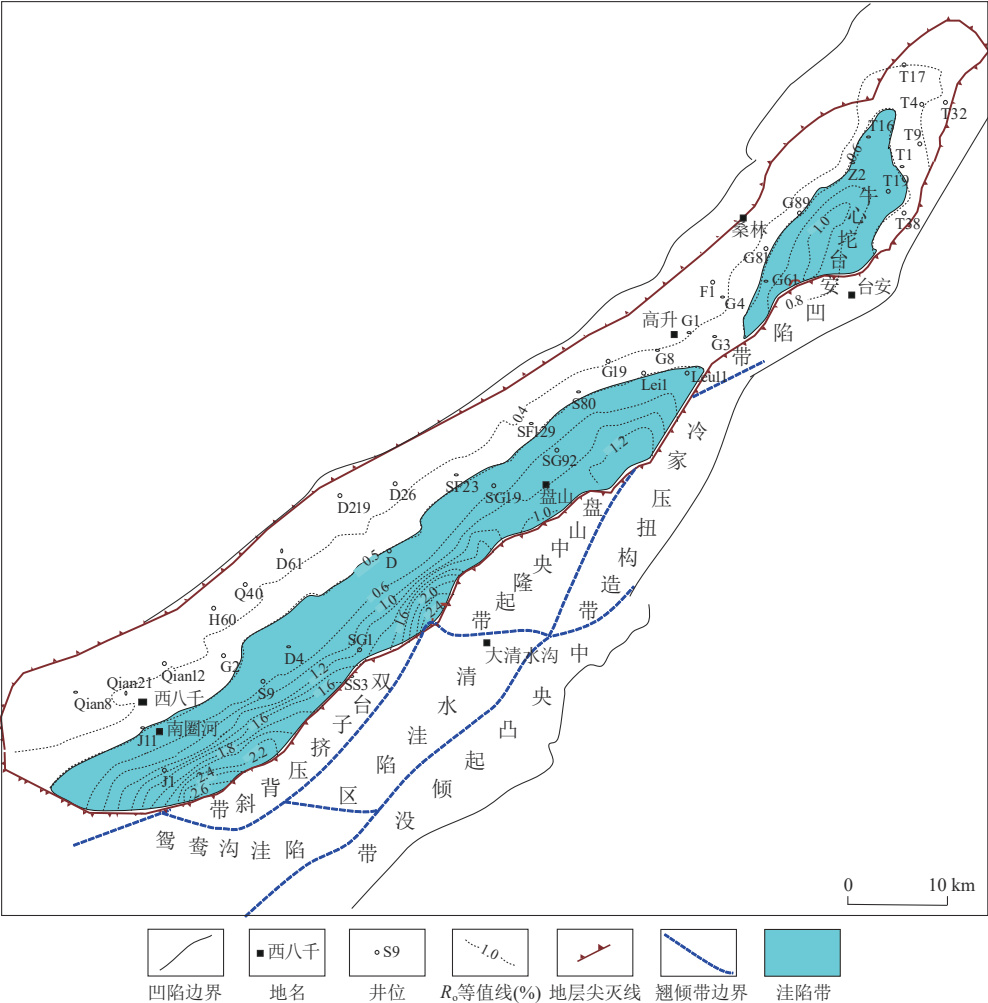


图 11 辽河坳陷西部凹陷沙四段烃源岩 R_o 等值线图

Fig. 11 Contour map of the R_o values of source rocks in the 4th member of the Shahejie Formation, Western Sag, Liaohe Depression

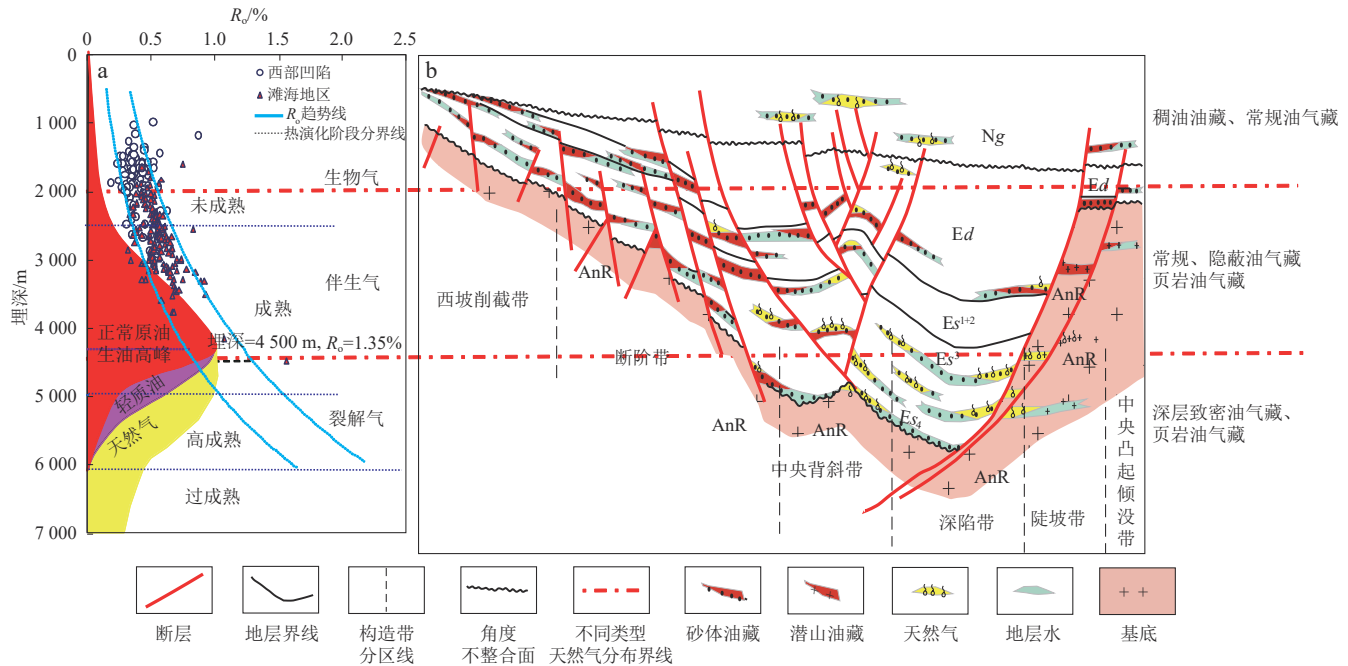


图12 辽河坳陷西部凹陷全油气系统下的油气纵向分布模式

Fig. 12 Vertical distribution pattern of hydrocarbon reservoirs in the WPS of the Western Sag, Liaohe Depression

a. 烃源岩生烃演化模式; b. 油气藏纵向分布模式

替层系。西部凹陷深层烃源岩发育良好,特别是沙三段和沙四段烃源岩处于高-过成熟阶段(表1;图11),为深部天然气生成提供了有利条件。在储层发育方面,西部凹陷(尤其是沙一段-沙三段)储层分布广泛。一般来说,碎屑岩油气储集层孔隙度下限为10%,渗透率下限为 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[6-7],西部凹陷优质储层普遍发育,其孔隙度下限可定为12%(埋深约3500 m,相当于浮力成藏下限和非常规致密油气藏上限)^[7],超过该深度后,主要为致密油气藏发育段(图12)。由此可见,西部凹陷深部致密油气等深部油气勘探将是下一步油气勘探的重要方向。

5.3 岩性油气藏勘探

西部凹陷具有复杂的构造演化史和沉积体系时-空配置特征,为岩性油气藏的形成提供了得天独厚的地质条件。勘探实践证实,该凹陷在西部缓坡带和东部陡坡带均发现了大量的岩性地层油气藏,特别是在深陷带沙三段发育的大型浊积砂岩体(图3),具有较广阔的勘探前景,是辽河油田今后增储和稳产的重要目标。

西部凹陷坡-洼过渡带沙河街组发育2大沉积旋回:沙四段-沙三段旋回和沙二段-沙一段旋回。由于物源近、搬运距离短,大量砂砾岩体在此快速堆积,形成了优质的储集体。该区沉积相类型丰富且相带狭窄,频繁的水进-水退旋回导致不同类型沉积体在垂向上相互叠置,显著增强了储层非均质性,

为岩性-地层圈闭的形成创造了有利条件。洼陷带内低位域各类砂体与水进-高位域浊积砂体广泛发育,具备形成规模性岩性油气藏的地质基础,且油气捕获条件优越。

陡坡带主要发育冲(洪)积扇-近岸水下扇-浊积扇、扇三角洲或辫状河三角洲沉积体系,并且紧靠烃源岩,易形成以岩性油气藏群为主体的油气聚集带。沙四期,中央凸起和西部斜坡带扇三角洲前缘的河口坝席状砂,以及牛心坨、雷家、高升和齐家等地区是有利的岩性圈闭发育区;高升、曙光、杜家台、齐家和欢喜岭-西八千地区是有利的地层圈闭发育区。沙三期,牛心坨、雷家、曙光、小洼、欢南和西八千等地区发育由扇三角洲前缘水下分流河道砂体形成的岩性圈闭;高升、雷家、杜家台、兴隆台、齐家和欢喜岭-西八千等地区发育由浊积扇砂体所形成岩性圈闭;双南地区发育由扇三角洲前缘组成的岩性圈闭;高升、曙光、杜家台、欢喜岭-西八千和冷家地区则发育地层圈闭。西部凹陷岩性砂体位于排烃范围内,油、气源比较充足。目前已在上下成藏组合(分别对应东营组-沙三段和沙四段)内发现隐蔽油气藏,打开了清水洼陷岩性油气藏勘探的新局面^[1]。

5.4 潜山油气藏勘探

潜山是西部凹陷今后的主要勘探领域之一。辽河坳陷作为中-新生代板块构造和古生代槽台构造叠加

形成的复合盆地,其正向构造叠加部位形成了9大潜山带。其中西部凹陷主要发育3大潜山带:西斜坡潜山带、兴隆台-双台子潜山带以及牛心坨潜山带,主要潜山油气藏如图13所示。

西部凹陷二级断层主要呈NE向延伸,控制了潜山带的分布,如西部凹陷内的兴-欢断层和曙-欢断层控制了曙-杜潜山带、齐-欢潜山带的分布;三级断层为NE向及WE向,控制了潜山带及潜山的分布,如西部凹陷西部斜坡带NW向的大凌河、齐-欢、绕阳河和曙-杜等三级断层把曙-杜和齐-欢潜山带分割成块状,形成单个的欢喜岭、齐家、杜家台和曙光潜山。四级断层为NE向、NW向和WE向,控制了单个潜山及潜山上的单个山头。

潜山的成藏模式主要包括:①顶生式成藏模式。潜山顶直接与沙三段烃源岩接触,之间没有致密隔层,其成藏条件好、效率高,如西部斜坡带曙光潜山油气藏和中央凸起冷123潜山油气藏。②侧断式成藏模式。如齐家—曙光潜山带,该模式是区内最主要的一种成藏模式,潜山顶面没有生油岩,油气只能通过断层垂向向上运移进入潜山顶面聚集成藏。③内幕成藏模式。该模式是指潜山内部地层产状、储层-隔层组合及与

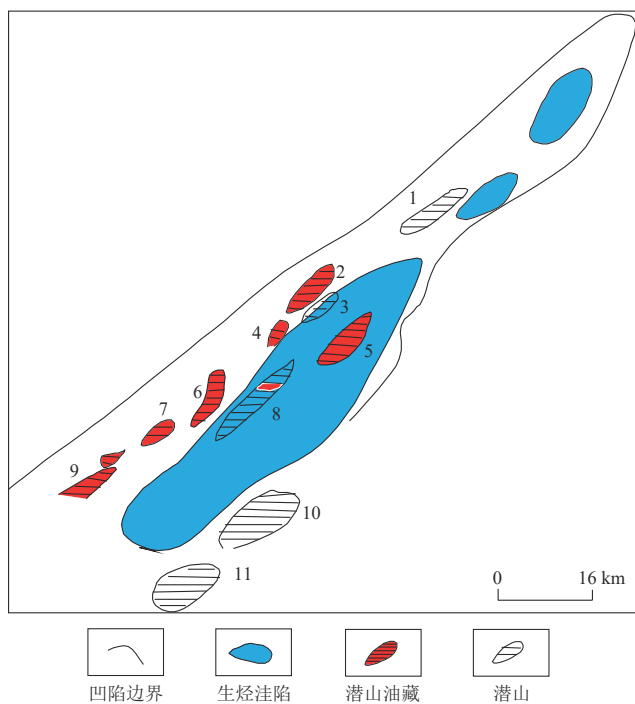


图13 辽河坳陷西部凹陷主要潜山分布示意图

Fig. 13 Sketch diagram showing the distribution of major buried-hill hydrocarbon reservoirs in the Western Sag, Liaohe Depression

1. 高升潜山;2. 曙光潜山;3. 盘山潜山;杜家台潜山;5. 兴隆台潜山;
6. 齐家潜山;7. 欢喜岭潜山;8. 曙光低潜山;9. 西八千潜山;10. 海外
河潜山;11. 海南潜山

古地貌形态的配置关系不同而形成的潜山内幕地层油气藏,如兴隆台潜山内幕油气藏。断层活动使生油岩与内幕圈闭侧向直接对接,因而油气可以直接通过断层以及裂缝侧向运移至圈闭中聚集成藏。西部凹陷目前已发现的潜山油气藏主要为中生界火山岩油藏,辽河油田变质岩潜山油藏中探明石油地质储量已达亿吨以上^[1]。西部凹陷潜山勘探需要进一步加强从高潜山向低潜山的勘探进程,深化块状潜山油气藏和潜山内幕层状油气藏的勘探。

6 结论

1) 结合地质与地球化学研究方法,综合分析了辽河坳陷西部凹陷全油气系统石油地质特征、油气分布、油气成因与成藏特征,揭示了常规油气的分布规律与富集机制,指明了非常规油气的勘探潜力与勘探方向。

2) 西部凹陷油气平面与纵向分布广泛,发育12个油气田,分布于基底及新生界沙河街组、东营组和馆陶组等18套含油气层系。

3) 西部凹陷油气相态多样、成熟度(低成熟-过成熟)范围广,该区沙三段和沙四段近乎完整序列的优质烃源岩发育(有机质类型好、丰度高、规模大),上述2套主力烃源岩及浅层次要烃源岩(沙一段-沙二段),为西部凹陷丰富的常规及潜在的非常规油气资源提供了物质基础。

4) 西部凹陷已探明油气藏具有源控烃、古隆起与构造高点控藏、主干断裂控油气运聚、沉积相及砂体分布与储层物性控烃、生-排烃期与成藏匹配良好及不同构造带油气成藏模式多样等高效成藏特征,主要分布于埋深在3 500 m以浅的自由流体动力场。

5) 依据全油气系统理论,进一步明确了辽河西部凹陷非常规油气勘探有利方向与区带。成熟度适中的页岩油气藏、深层致密油气藏(埋深>3 500 m)、缓坡带-陡坡带-深洼带岩性油气藏、低潜山与块状潜山-内幕潜山等是西部凹陷重要的非常规油气勘探领域。

致谢:感谢中国石油大学(北京)庞雄奇教授及其领衔的“辽河探区西部凹陷深化勘探理论与实践”项目组的支持与协助!感谢《石油与天然气地质》编辑部张玉银老师为本文的辛勤付出!

参 考 文 献

[1] 李晓光,陈昌,韩宏伟. 辽河坳陷成熟探区油气深化勘探认识及实践[J]. 特种油气藏, 2022, 29(6): 73-82.

LI Xiaoguang, CHEN Chang, HAN Hongwei. Understanding and

- practice of oil and gas deepening exploration in mature exploration area of Liaohe Depression [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2022, 29(6): 73–82.
- [2] JIA Chengzao. Breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geology theory [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(1): 1–10.
- [3] JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. Whole petroleum system and ordered distribution pattern of conventional and unconventional oil and gas reservoirs [J]. *Petroleum Science*, 2023, 20(1): 1–19.
- [4] 贾承造, 庞雄奇, 宋岩. 全油气系统理论基本原理[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(4): 679–691.
- JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. Basic principles of the whole petroleum system [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(4): 679–691.
- [5] 贾承造, 姜林, 赵文. 全油气系统中的致密油气: 成藏机理、富集规律与资源前景[J]. *石油学报*, 2025, 46(1): 1–16, 47.
- JIA Chengzao, JIANG Lin, ZHAO Wen. Tight oil and gas in Whole Petroleum System: Accumulation mechanism, enrichment regularity, and resource prospect [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2025, 46(1): 1–16, 47.
- [6] 庞雄奇, 李丕龙, 陈冬霞, 等. 陆相断陷盆地相控油气特征及其基本模式[J]. *古地学期刊*, 2011, 13(1): 55–74.
- PANG Xiongqi, LI Pilog, CHEN Dongxia, et al. Characteristics and basic model of facies controlling oil and gas in continental fault basin [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2011, 13(1): 55–74.
- [7] 庞雄奇, 贾承造, 宋岩, 等. 全油气系统定量评价: 方法原理与实际应用[J]. *石油学报*, 2022, 43(6): 727–759.
- PANG Xiongqi, JIA Chengzao, SONG Yan, et al. Quantitative evaluation of whole petroleum system: Principle and application [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(6): 727–759.
- [8] PANG Xiongqi. Quantitative evaluation of the whole petroleum system [M]. Singapore: Springer, 2023: 217–324.
- [9] 白雪峰, 陆加敏, 李军辉, 等. 松辽盆地北部全油气系统成藏模式与勘探潜力[J]. *大庆石油地质与开发*, 2024, 43(3): 49–61.
- BAI Xuefeng, LU Jiamin, LI Junhui, et al. Hydrocarbon accumulation patterns and exploration potential of whole petroleum systems in northern Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2024, 43(3): 49–61.
- [10] 刘国勇, 吴松涛, 伍坤宇, 等. 柴达木盆地西部坳陷古近系全油气系统特征与油气成藏模式[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(5): 951–961.
- LIU Guoyong, WU Songtao, WU Kunyu, et al. Characteristics and hydrocarbon accumulation model of Paleogene whole petroleum system in western depression of Qaidam Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(5): 951–961.
- [11] 李小冬, 郑伟, 史原鹏, 等. 基于全油气系统理论的油气资源评价方法——以冀中坳陷武清凹陷沙河街组三段为例[J]. *断块油气田*, 2024, 31(5): 778–785.
- LI Xiaodong, ZHENG Wei, SHI Yuanpeng, et al. Oil and gas resource assessment method based on whole oil-gas system theory: Taking the 3rd Member of Shahejie Formation in Wuqing Sag of Jizhong Depression as an example [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2024, 31(5): 778–785.
- [12] 贾承造, 庞雄奇, 郭秋麟, 等. 基于成因法评价油气资源: 全油气系统理论和新一代盆地模拟技术[J]. *石油学报*, 2023, 44(9): 1399–1416.
- JIA Chengzao, PANG Xiongqi, GUO Qiulin, et al. Assessment of oil-gas resources based on genetic method: Whole petroleum system theory and new generation basin modeling technology [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(9): 1399–1416.
- [13] 王飞宇, 冯伟平, 庞雄奇, 等. 全油气系统生、排烃和运聚定量分析中的关键问题与解决途径[J]. *石油学报*, 2023, 44(9): 1434–1444.
- WANG Feiyu, FENG Weiping, PANG Xiongqi, et al. Key problems and solutions in quantitative analysis of hydrocarbon generation, expulsion, migration and accumulation in whole petroleum system [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(9): 1434–1444.
- [14] 姜福杰, 郭婧, 庞雄奇, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷全油气系统3类油气资源联合评价[J]. *石油学报*, 2023, 44(9): 1472–1486.
- JIANG Fujie, GUO Jing, PANG Xiongqi, et al. Joint evaluation of three types of oil-gas resources in whole petroleum system of Nanpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(9): 1472–1486.
- [15] 宋岩, 贾承造, 姜林, 等. 全油气系统内涵与研究思路[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(6): 1199–1210, 1226.
- SONG Yan, JIA Chengzao, JIANG Lin, et al. Connotation and research strategy of the whole petroleum system [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(6): 1199–1210, 1226.
- [16] TANG Yong, CAO Jian, HE Wenjun, et al. The whole petroleum system with ordered coexistence of conventional and unconventional hydrocarbons: Case from the Junggar Basin, China [J]. *AAPG Bulletin*, 2024, 108(7): 1261–1290.
- [17] 张宇琦, 彭光荣, 姜福杰, 等. 全油气系统成藏理论在低勘探程度区的应用及其地质意义——以珠江口盆地开平凹陷为例[J/OL]. *地学前缘*: 1–17[网络访问日期缺失]. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2024.11.4>.
- ZHANG Yuqi, PENG Guangrong, JIANG Fujie, et al. Application and geological significance of whole petroleum system accumulation theory in low exploration degree areas: A case study of Kaiping Sag in the Pearl River Mouth Basin [J/OL]. *Earth Science Frontiers*: 1–17[网络访问日期缺失]. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2024.11.4>.
- [18] 贾承造, 庞雄奇. 深层油气地质理论研究进展与主要发展方向[J]. *石油学报*, 2015, 36(12): 1457–1469.
- JIA Chengzao, PANG Xiongqi. Research processes and main development directions of deep hydrocarbon geological theories [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(12): 1457–1469.
- [19] 胡英杰, 王延山, 黄双泉, 等. 辽河坳陷石油地质条件、资源潜

- 力及勘探方向[J]. 海相油气地质, 2019, 24(2): 43-54.
- HU Yingjie, WANG Yanshan, HUANG Shuangquan, et al. The geological conditions, resource potential, and exploration direction of oil in Liaohe Depression[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2019, 24(2): 43-54.
- [20] 李素梅, 庞雄奇, 高先志. 辽河西部凹陷稠油的形成与分布[C]//第四届油气成藏机理与资源评价国际学术研讨会论文集, 北京, 2006. 北京: 中国石油学会, 2006: 375-385.
- LI Sumei, PANG Xiongqi, GAO Xianzhi. Formation and distribution of heavy oil in the western depression of Liaohe River [C]//Proceedings of the 4th International Symposium on Oil and Gas Reservoir Formation Mechanism and Resource Evaluation, Beijing, 2006. Beijing: Chinese Petroleum Society, 2006: 375-385.
- [21] 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.
- [22] DENG Shuo, LI Sumei, LI Xiaodong, et al. New geochemical proxies of nitrogen- and oxygen-containing compounds characterized by ESI (-) FT-ICR MS[J]. Energy & Fuels, 2023, 37(20): 15505-15522.
- [23] 郭旭升, 马晓潇, 黎茂稳, 等. 陆相页岩油富集机理探讨[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1333-1349.
- GUO Xusheng, MA Xiaoxiao, LI Maowen, et al. Mechanisms for lacustrine shale oil enrichment in Chinese sedimentary basins[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1333-1349.
- [24] 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: 地球科学, 2008, 38(增刊1): 138-149.
- LI Sumei, PANG Xiongqi, LI Xiaoguang, et al. Genetic mechanism of heavy oil in the western depression of Liaohe River [J]. Science China Earth Sciences, 2008, 38(S1): 138-149.
- [25] 王铁冠, 钟宁宁, 侯读杰, 等. 低熟油气形成机理与分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
- WANG Tieguan, ZHONG Ningning, HOU Dujie, et al. Formation mechanism and distribution of low maturity oil and gas [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.
- [26] 李小雪, 李志军, 李熹微, 等. 冀中坳陷保定凹陷清苑构造带低熟油成因解析[J]. 现代地质, 2024, 38(5): 1338-1353.
- LI Xiaodong, LI Zhijun, LI Xiwei, et al. Genetic mechanism of low-maturity oil in the Qingyuan tectonic belt, Baoding Sag, Jizhong Depression[J]. Geoscience, 2024, 38(5): 1338-1353.
- [27] 邓硕, 李素梅, 曹敬涛, 等. 辽河西部凹陷低熟油的高分辨质谱特征及其成因机制[J]. 现代地质, 2024, 38(5): 1354-1369.
- DENG Shuo, LI Sumei, CAO Jingtao, et al. High-resolution mass spectrum characteristics and formation mechanism of low maturity oil in the Liaohe western depression [J]. Geoscience, 2024, 38(5): 1354-1369.
- [28] LI Sumei, PANG Xiongqi, LI Maowen, et al. Geochemistry of petroleum systems in the Niuzhuang South Slope of Bohai Bay Basin—Part 1: Source rock characterization [J]. Organic Geochemistry, 2003, 34(3): 389-412.
- [29] PANG Xiongqi, LI Maowen, LI Sumei, et al. Geochemistry of petroleum systems in the Niuzhuang South Slope of Bohai Bay Basin. Part 2: Evidence for significant contribution of mature source rocks to “immature oils” in the Bamianhe field[J]. Organic Geochemistry, 2003, 34(7): 931-950.
- [30] 倪良田, 杜玉山, 蒋龙, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷陆相断陷湖盆中-低成熟度页岩“富烃-成储-富集-高产”的理论认识与开发实践[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(5): 1417-1430.
- NI Liangtian, DU Yushan, JIANG Long, et al. Medium-to-low maturity shales in the faulted lacustrine basin in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin: Theoretical understanding of their hydrocarbon generation, reservoir formation, and shale oil enrichment and high-yield nature and exploitation practices [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(5): 1417-1430.
- [31] 张瑞, 金之钧, 朱如凯, 等. 中国陆相富有机质页岩沉积速率研究及其页岩油勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 829-845.
- ZHANG Rui, JIN Zhijun, ZHU Rukai, et al. Investigation of deposition rate of terrestrial organic-rich shales in China and its implications for shale oil exploration [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 829-845.

(编辑 张玉银)