

文章编号: 0253-2697(2024)05-0755-16 DOI:10.7623/syxb202405001

陆相断陷盆地深凹区致密油气成藏模式与勘探实践

——以渤海湾盆地黄骅坳陷为例

周立宏 陈长伟 杨飞 李宏军 刘国全 崔宇 吴雪松 石倩茹 徐雯婧 董文韬

(中国石油大港油田公司 天津 300280)

摘要:断陷盆地是中国重要的油气生产基地。随着勘探工作的日益深入,中浅层(深度 <3500 m)常规油气资源探明程度超过70%,寻找大规模油气藏的难度增加,勘探重点逐步转向深凹区。基于黄骅坳陷深凹区成因机制、岩性储集体发育条件和生烃条件等研究,系统梳理了断陷盆地深凹区致密油气的成藏条件。研究认为:受断陷活动、湖平面升降和物源供给强度控制,近物源区发育扇三角洲平原、扇三角洲前缘和近岸水下扇,湖盆中部发育湖底扇、斜坡扇、远岸水下扇、滑塌浊积体和退积型三角洲前缘等多类型岩性储层;当埋深大于3500 m后,储层受压实作用控制而逐渐致密化;深凹区在湖泛期具有相对较大的可容纳空间,有利于富有机质页岩的形成和保存,具备更好的源岩条件。通过建立孔西斜坡、板桥次凹和歧口主凹区的油气成藏模式,提出了孔西次凹孔店组二段扇三角洲前缘、歧口主凹东营组三段盆底扇—斜坡扇等有利目标区。2023年,部署实施的CT1井和HT1井分别获得118.9 t/d和33.2~35.7 t/d的高产工业油流,即发现2个亿吨级规模增储战场,证实黄骅坳陷深凹区具备大型致密岩性油气藏勘探潜力,为老油田的可持续发展提供了重要的资源基础。

关键词:黄骅坳陷;古近系;深凹区;成因机制;岩性油气藏;油气成藏;勘探实践

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Accumulation models and exploration practice of tight oil and gas in the deep sag areas of continental fault basins: a case study of Huanghua depression in Bohai Bay Basin

Zhou Lihong Chen Changwei Yang Fei Li Hongjun Liu Guoquan Cui Yu Wu Xuesong
Shi Qianru Xu Wenjing Dong Wentao

(PetroChina Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China)

Abstract: Fault basins are the important oil-gas production bases in China. With the deepening of exploration work, the proven conventional oil-gas resources in the middle and shallow layers (depth <3500 m) exceeds 70%, the difficulty of discovering large-scale oil-gas reservoirs increased, and the exploration focus gradually shifted to deep sag area. Based on studying the genetic mechanisms, development conditions of lithologic reservoirs, and hydrocarbon generation conditions in the deep sag area of Huanghua depression, the paper systematically summarizes the accumulation conditions of tight oil and gas in the deep sag areas of fault basin. The research suggests that the fan delta plains, fan delta fronts, and nearshore underwater fans are developed near the provenance, as a result of being controlled by fault activities, lake level fluctuations, and source supply intensity. Multiple types of lithologic reservoirs are developed in the central part of the lake basin, including sublacustrine fans, slope fans, far-shore underwater fans, slump turbidites, and regressive delta fronts. When the burial depth is greater than 3500 m, the reservoirs are gradually densified under the control of compaction. Deep sag areas have a large accommodation space during lake flooding, which is conducive to the formation and preservation of organic-rich shale, and thus has better source rock conditions. The accumulation models for Kongxi slope, Banqiao sag, and Qikou main sag are established, respectively, and it is proposed that the fan delta front in Member 2 of Kongdian Formation in Kongxi sag, the basin-floor fans and slope fans in Member 3 of Dongying Formation in Qikou main sag are favorable target areas. Well CT1 and Well HT1 were deployed and drilled in 2023, from which a high-yield industrial oil flow of 118.9 t/d and 33.2-35.7 t/d were obtained respectively, indicating two fields of hundred million ton scale for increasing reserves were discovered. This confirms the exploration potential of large-scale tight lithologic oil-gas reservoirs in the deep sag areas of Huanghua depression, providing a

基金项目:中国石油天然气股份有限公司前瞻性基础性战略性科技项目“大港探区斜坡带油气藏分布序列与富集高产规律研究”(2021DJ0702)和中国石油天然气股份有限公司油气和新能源分公司重点科技项目“大港沧东孔二段页岩油效益开发技术研究与先导试验”(2022KT1002)资助。

第一作者:周立宏,男,1968年7月生,2006年获中国科学院地质与地球物理研究所博士学位,现为中国石油大港油田公司教授级高级工程师,主要从事油气勘探研究与生产管理。Email:zhoulh@petrochina.com.cn

通信作者:陈长伟,男,1983年11月生,2007年获吉林大学硕士学位,现为中国石油大港油田公司高级工程师,主要从事油气勘探研究与生产管理。Email:chenchwei@petrochina.com.cn

crucial resource base for the sustainable development of old oil fields.

Key words: Huanghua depression; Paleogene; deep sag area; genetic mechanism; lithologic oil-gas reservoir; hydrocarbon accumulation; exploration practice

引用:周立宏,陈长伟,杨飞,李宏军,刘国全,崔宇,吴雪松,石倩茹,徐雯婧,董文韬. 陆相断陷盆地深凹区致密油气成藏模式与勘探实践——以渤海湾盆地黄骅坳陷为例[J]. 石油学报, 2024, 45(5): 755-770.

Cite: ZHOU Lihong, CHEN Changwei, YANG Fei, LI Hongjun, LIU Guoquan, CUI Yu, WU Xuesong, SHI Qianru, XU Wenjing, DONG Wentao. Accumulation models and exploration practice of tight oil and gas in the deep sag areas of continental fault basins: a case study of Huanghua depression in Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(5): 755-770.

断陷盆地是中国重要的油气生产基地。新生代太平洋板块 NEE 向大规模俯冲、挤压和印度洋板块的强烈碰撞作用,加速了东部深部地幔物质的热扩张,形成了松辽盆地、渤海湾盆地、珠江口盆地等一系列拉张断陷盆地^[1],发现了大庆油气田、大港油气田、胜利油气田、渤海油气田等大型油气田。随着盆地勘探程度提高和新技术发展,中浅层(深度 < 3 500 m)构造、地层和岩性等常规油气藏的探明程度已超过 70%,大规模油气藏的发现难度日益加大,中国已全面进入“深层、深水、非常规”油气勘探阶段^[2],深层(深度为 3 500~4 500 m)一超深层(深度 > 4 500 m)油气资源是未来中国石油工业发展的重要领域。

断陷湖盆深凹区具有埋深大、沉积相变快、储层致密、多期成藏等特征,不同成因类型的深凹区有其独特的成岩、成储、生烃和成藏机制。笔者以黄骅坳陷深凹区为例,开展了断陷湖盆深凹区形成机制、大型岩性储集体发育条件、生烃条件和致密储层成藏条件等综合研究。以深凹区致密岩性油气藏为重点勘探目标,在沧东凹陷孔西斜坡和歧口主凹取得风险勘探突破,发现了 2 个亿吨级油气藏增储战场,证实断陷湖盆深凹区具备大型致密岩性油气藏的勘探潜力。

1 地质背景

黄骅坳陷位于渤海湾盆地中部,发育在华北地台之上,是由地幔上涌和裂隙作用形成的多期叠合负向构造单元。黄骅坳陷整体呈 NNE 走向,东南部以埕宁隆起与济阳坳陷相隔,西部以沧县隆起与冀中坳陷相望,东部以沙垒田凸起与渤中坳陷相连,北端与燕山褶皱带相连^[3-7],总面积约为 $1.17 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。新生代,黄骅坳陷经历了初始断陷期、扩张深陷期、断陷活动稳定期、断陷活动衰减期和坳陷期 5 个构造演化阶段。地层差异沉降形成了孔店凸起、港西凸起、黑龙江凸起、徐杨桥凸起、东光凸起和润南凸起 6 个凸起。隆起与凸起间为凹陷区,以孔店—羊三木凸起为界,南部为沧东凹陷,包括孔西次凹、孔东次凹、南皮次凹、盐山次凹和吴桥次凹 5 个次级凹陷,北部为歧口凹陷,包括歧口主凹、北塘次凹、板桥次凹、歧北次凹、歧南次凹和埕

海次凹 6 个次级凹陷(图 1、图 2)。间接性构造沉降形成了孔店组、沙河街组三段(沙三段)、沙河街组二段(沙二段)一沙河街组一段(沙一段)和东营组 4 个具备独立油气成藏条件的三级层序单元^[8-10]。持续性断陷活动形成了孔西斜坡、板桥斜坡和歧口主凹 3 个深凹区,也是现阶段油气勘探的空白区。

2 黄骅坳陷断陷结构特征

黄骅坳陷受沧东断层和羊二庄—埕西断层 2 个一级控凹断层控制,整体呈 NNE 向展布,内部构造受海河断层、歧东断层和孔西断层等 28 个二级断层控制,形成了凹陷区和凸起区^[11-12]。沿岸构造转换带把歧口凹陷分割为 2 个断层组合特征不同的构造单元^[6]:板桥—歧北—歧南半地堑组合带和北塘—歧口主凹—埕海多断阶地堑带(图 1)。

沧东凹陷主要受沧东断层与徐西断层的相向断陷活动控制^[13][图 2(a)]。沧东凹陷在孔店组二段(孔二段)一孔店组三段(孔三段)沉积期由于整体沉降,形成简单斜坡;在孔店组一段(孔一段)沉积期,由于沧东断层和孔东断层加速沉降,而孔店凸起及其周缘沉降速度相对较慢,早期沉积地层的倾角发生改变,在沧东断层和孔东断层之间形成地垒结构[图 2(b)]。断层活动在南皮斜坡区相对稳定,地层倾向未发生反转,从而形成宽缓斜坡。

板桥—歧北—歧南半地堑组合带主要受沧东断层、北大港断层和南大港断层控制,在沧东断层与埕宁隆起之间沿 NW—SE 向形成 3 个断陷规模逐渐减小的半地堑组合带[图 2(c)],每个半地堑单元内发育与主断层倾向相反的调节断层(主要包括大张坨断层、唐家河断层和港东断层等)。在次级凹陷内,控凹断层与反向调节断层构成局部地堑组合带。

北塘—歧口主凹—埕海多断阶地堑带主要受 NNE 倾向断层(茶淀断层、海河断层和白东断层等)和 EW 倾向断层(歧中断层、歧东断层、张东断层和赵北断层等)两组不对称雁列式正断层控制,形成多阶地堑构造[图 2(d)]。在歧东断层与新港断层以及断层两边的构造转换带之间构成了歧口主凹区,该地区的构

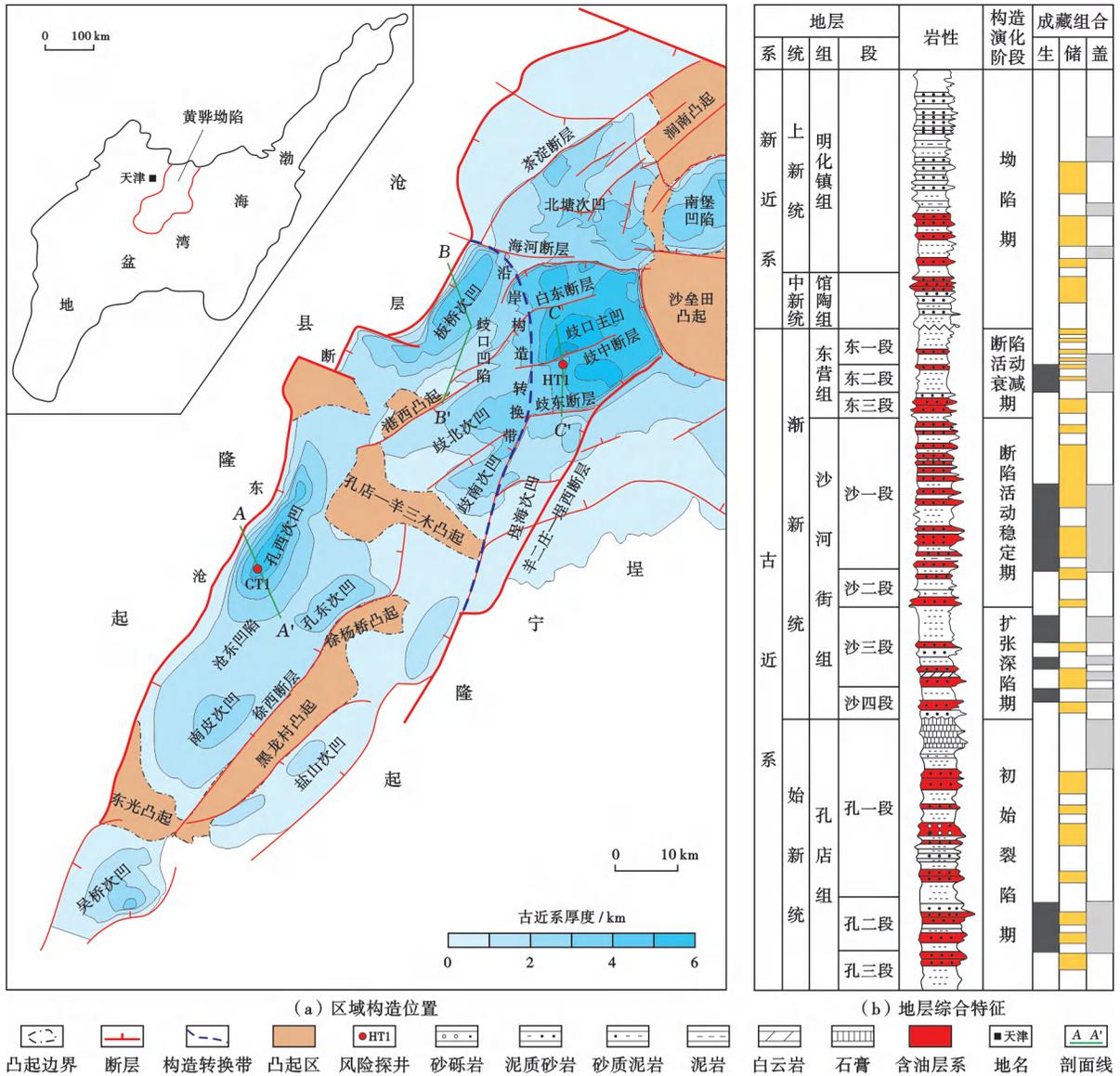


Fig. 1 Regional tectonic location and comprehensive stratigraphic characteristics of Huanghua depression

造具有左旋拉张走滑的特征,反向调节断层与白东断层组合,形成了典型的“花状”走滑断层构造。

3 深凹区的沉积体系展布与储集物性特征

黄骅坳陷的古近系从湖盆边缘至中心主要发育 4 种沉积相组合:近岸水下扇—远岸水下扇—滑塌浊积体、扇三角洲—远岸水下扇—滑塌浊积体、冲积扇—辫状河—曲流河—斜坡扇—盆底扇,以及曲流河—三角洲—远岸水下扇(图 3)。受幕式断层活动、湖平面升降和多物源供给条件控制,次凹区主要发育近岸水下扇、扇三角洲和远岸水下扇砂体,主凹区主要发育滑塌浊积体、远岸水下扇、盆地扇、斜坡扇和三角洲成因砂体。受欠压实作用、溶蚀作用和异常压力等因素控制,

在黄骅坳陷深凹区中—深层的岩性储集体中存在多个异常孔隙带,形成了有效的油气储集空间。

3.1 次凹区近源聚砂特征

断层强烈活动期,黄骅坳陷在一级控凹断层与盆内二级断层的控制下产生差异沉降,形成次级凹陷区。由于断控陡坡带的地形高差大,水动力条件强,辫状河可携带大量含砾石的碎屑物进入湖盆,并在滨—浅湖区形成辫状河三角洲(图 3、图 4)。当湖平面较高时,河流入湖后直接进入半深湖—深湖区,形成近岸水下扇—远岸水下扇,扇体两侧以半深湖—深湖泥质沉积为主。当湖平面相对较低时,河流入湖后直接进入滨—浅湖,形成扇三角洲,短期湖平面升降控制了扇体在纵向上形成多期叠置(图 4)。在断层幕式活动的间歇期,断层活动趋于稳定,黄骅坳陷次凹区可容纳空间

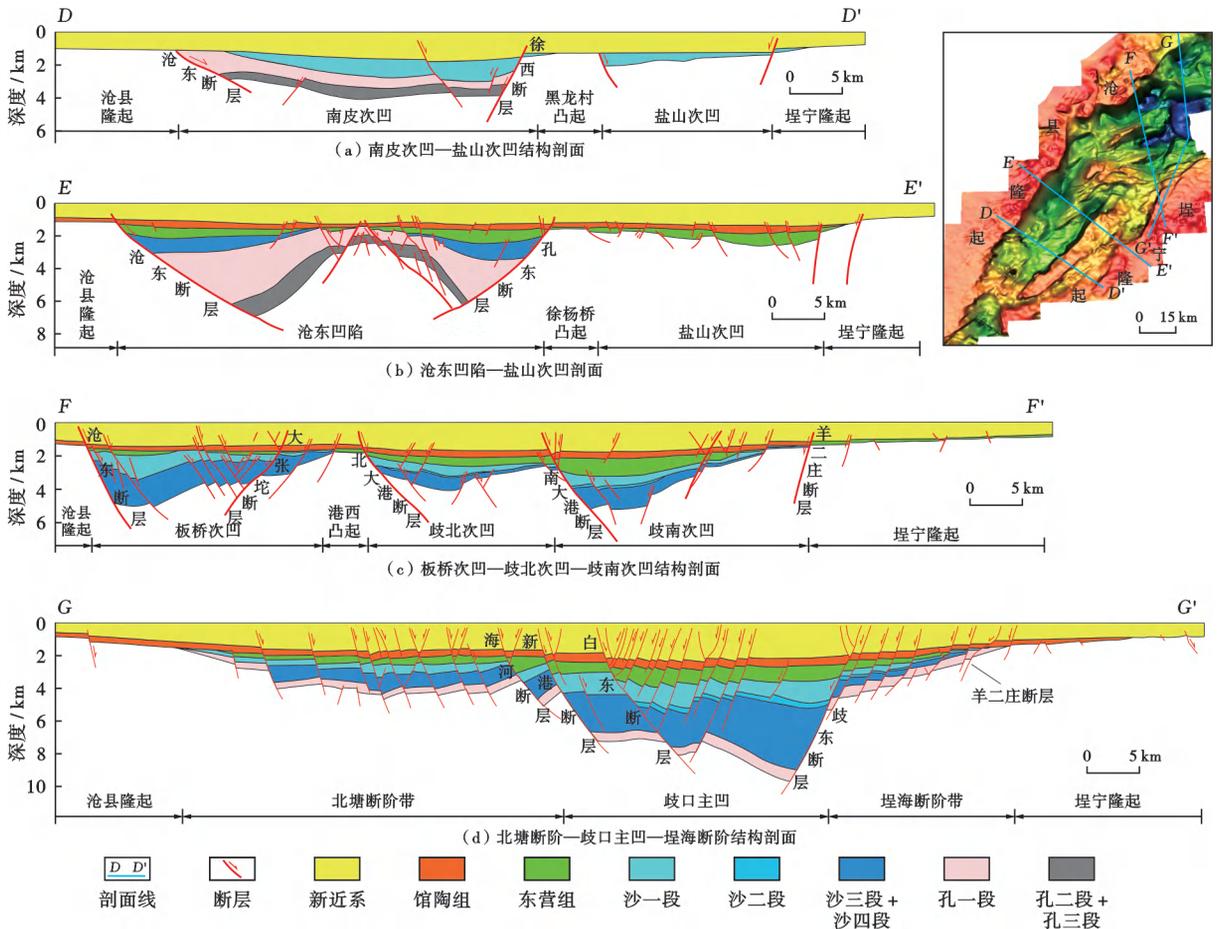


图2 黄骅拗陷新生界地质结构剖面

Fig. 2 Profile of the Cenozoic geological structure in Huanghua depression

的变化主要受湖平面升降控制。当湖平面降低时,次凹区出露于侵蚀基准面之上,发生河流下切侵蚀作用,以发育辫状河河道、曲流河河道和平原沼泽沉积为主。

3.2 主凹区远源聚砂特征

黄骅拗陷主凹区距离物源较远,地层长期欠补偿,持续性断陷和继承性断陷造成可容纳空间累积,形成半深湖—深湖沉积环境,且以泥页岩沉积为主,局部发育滑塌浊积体(图3、图5)。低位体系域沉积期,断层活动趋于稳定,受干旱气候条件控制,湖平面下降,河流携带碎屑物质经次凹区长距离输送至主凹区,形成进积型斜坡扇和盆底扇(图3)。当湖平面进入上升周期时,形成退积型斜坡扇,局部发育滑塌浊积体,沉积中心逐渐向中—高部位的斜坡区迁移,主凹区砂体规模逐渐减小^[14]。断陷活动末期,湖盆经历早期填平补齐后,黄骅拗陷的古地貌演化为以歧口主凹为中心的均一湖盆,古地貌差异较小,湖盆开始萎缩,曲流河入湖后形成三角洲前缘,并逐步向湖盆中心迁移,形成多期叠置型三角洲前缘砂体。黄骅拗陷主凹区受多期砂体物源体系和沉积旋回控制,砂体在平面上交互沉积,在纵向上呈叠置发育,构成既“富泥”又“富砂”的沉积格局。

3.3 深层岩性储集体物性特征

黄骅拗陷中深层(深度>3 500 m)岩性储集体的孔隙度一般小于20%,且随着埋深增加,孔隙度呈降低趋势[图6(a)]。在断陷盆地内,受重力流控制的混杂沉积格局和成岩压实作用是导致其中深层储层致密化的2个主要因素。近源陡坡带扇三角洲和近岸水下扇砂体的岩石成分复杂、分选和磨圆较差,在埋深约为4 000 m处的碎屑颗粒以点接触为主,能够保留部分粒间孔[图6(b)],孔隙度一般分布在8%~15%。在远源深凹区,碎屑颗粒的分选性和磨圆度较好,储层的致密化主要受成岩压实作用控制,碎屑颗粒间以线接触为主,孔隙类型为以溶蚀成因为主的粒间溶蚀孔、颗粒内溶孔和颗粒铸模孔,原生粒间孔很少见,储层孔隙度一般小于10%。储层主要集中在3 500~4 500 m深度段,对应中成岩阶段A期,孔隙度主体介于10%~20%,长石和岩屑的溶蚀作用[图6(c)]在一定程度上改善了储层物性,为油气聚集提供了有利条件^[15-18]。埋深大于4 500 m的储层,其成岩作用对应中成岩阶段B期,孔隙度主体介于8%~15%,地层超压段的储集物性相对较高。

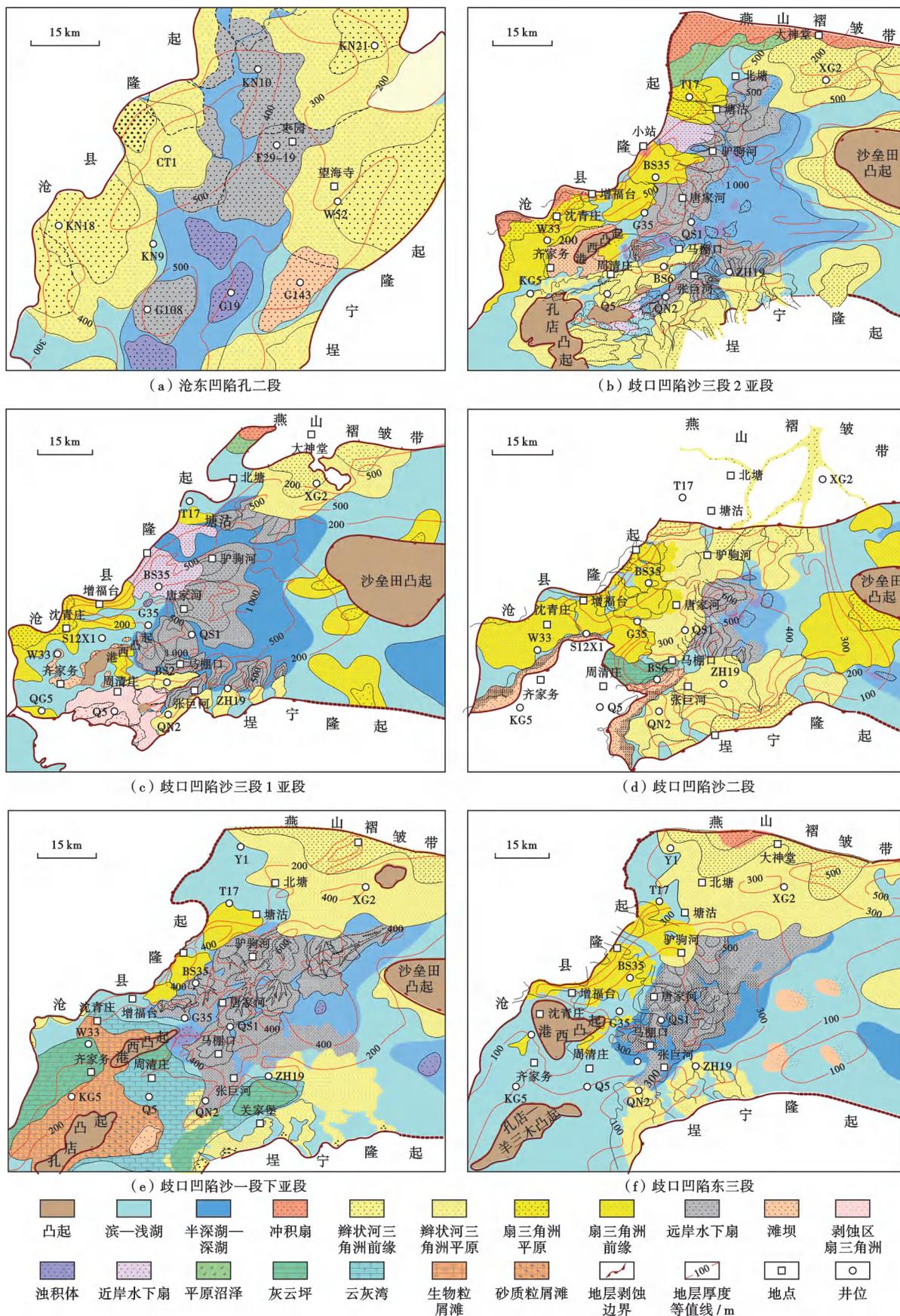


图 3 黄骅坳陷古近系重点勘探层系的沉积体系

Fig. 3 Sedimentary systems of the key Paleogene exploration strata in Huanghua depression

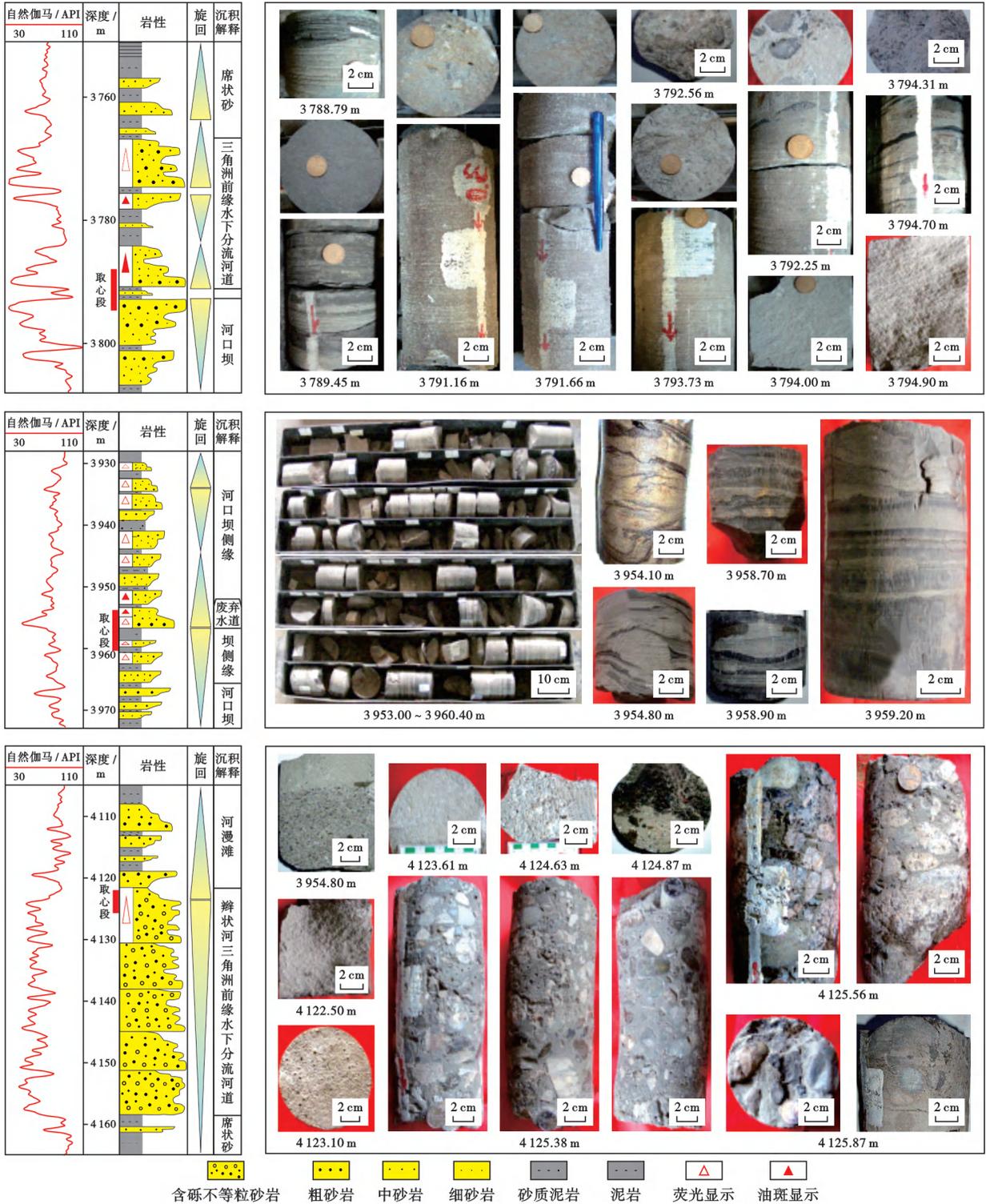


图4 黄骅坳陷歧口凹陷沙三段近源陡坡带典型沉积特征(BS35井)

Fig. 4 Typical sedimentary characteristics of the near-source steep slope in Member 3 of Shahejie Formation in Qikou sag, Huanghua depression

前期针对黄骅坳陷中深层开展了大量勘探实践工作,并在 BinH4 井 5385.4~5467.6m、BinH8 井 4541~4545m、QS1 井 4823.9~5088.0m、QS6 井 4432.9~4494.2m、BS35 井 4720~4744m 和 BinS22 井 4615~4663m 钻遇工业油气层,但由于产量递减快、累积产

量低,储层供液能力不足,无法实现效益建产。2013—2023年,油公司通过持续深化深层页岩油领域的探索实践,攻关形成了深层纹层型页岩储层高效体积压裂改造技术,实现了对湖相深层页岩油的规模效益开发,为开发动用深层岩性油气藏提供了关键工程技术手

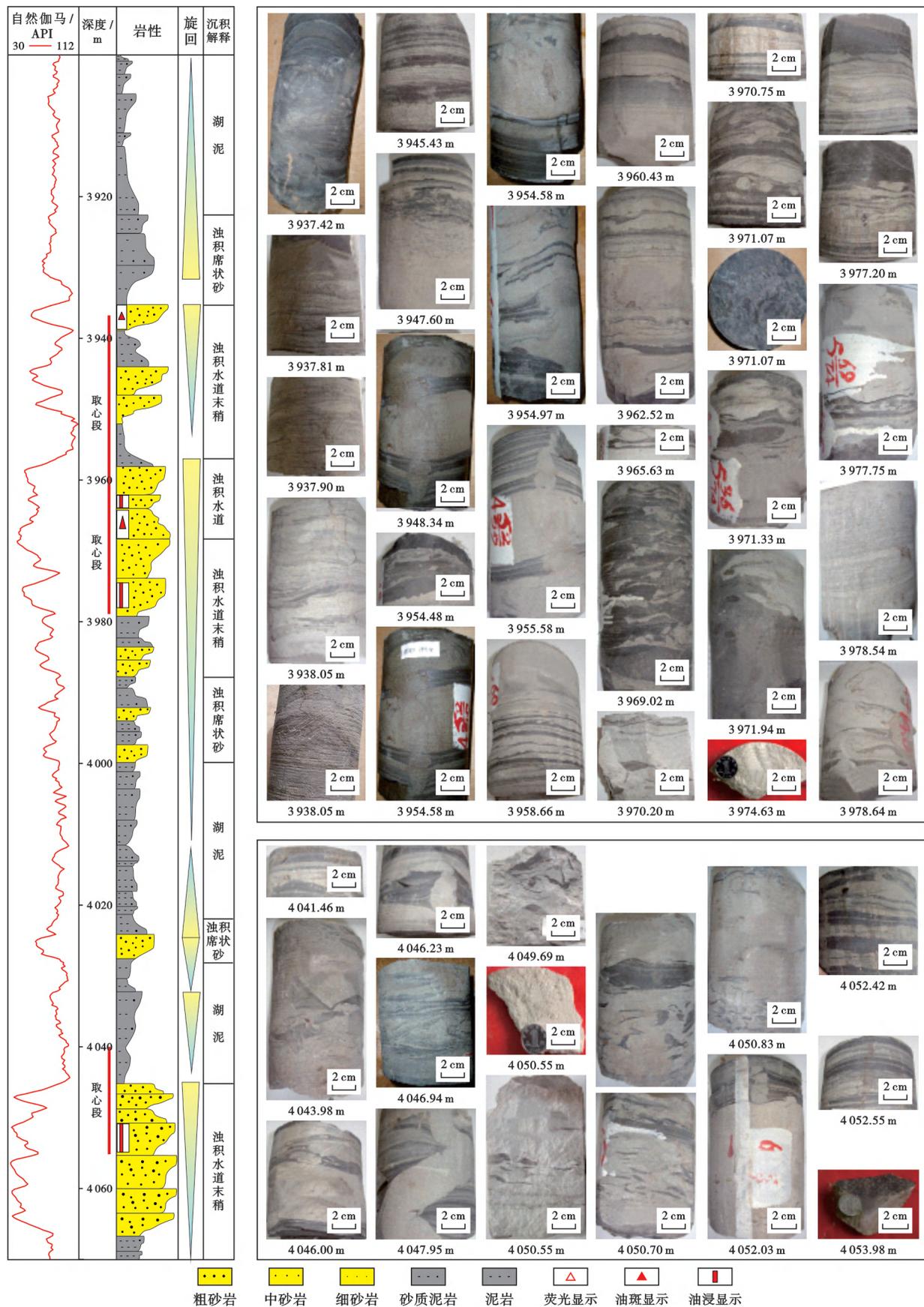
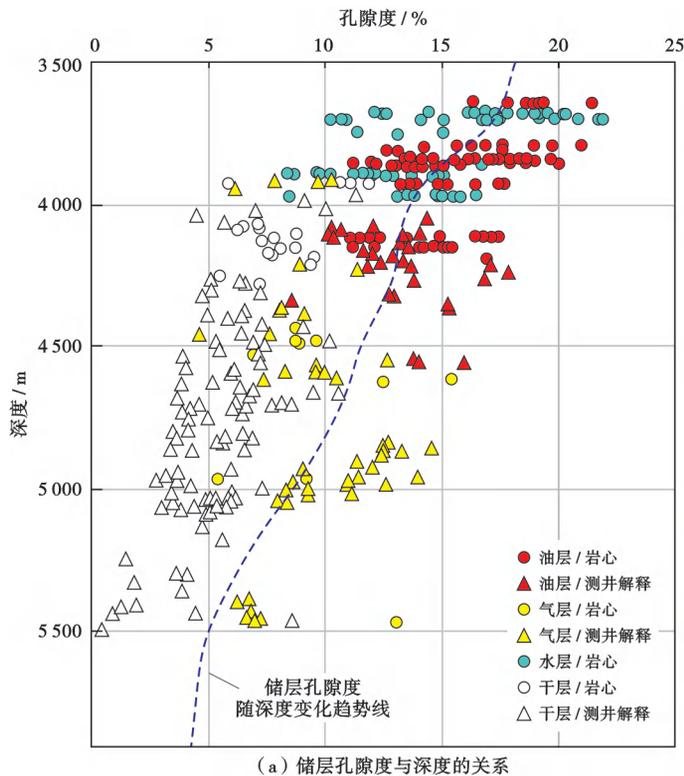
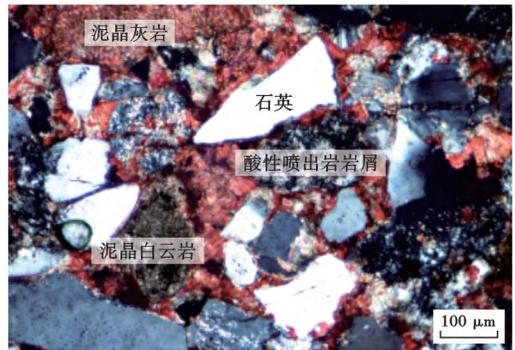


图 5 黄骅坳陷歧口凹陷沙一段远源深凹区重力流沉积特征(GS72 井)

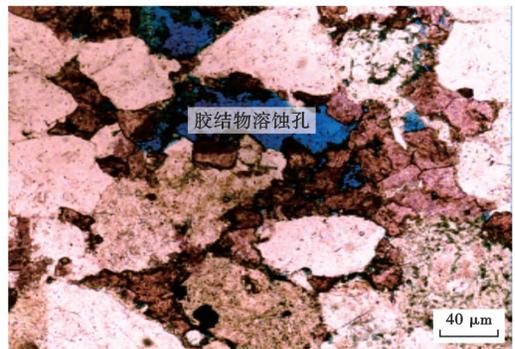
Fig. 5 Sedimentary characteristics of gravity flow in the far-source deep sag areas of Member 1 of Shahejie Formation in Qikou sag, Huanghua depression



(a) 储层孔隙度与深度的关系



(b) 残余粒间孔, 沙三段, BS35井 3 981 m, 正交偏光



(c) 胶结物溶蚀孔, 沙一段, BH22井 4 616 m, 单偏光

图6 黄骅拗陷歧口凹陷沙河街组中深层碎屑岩储层的孔隙度与埋深关系

Fig. 6 Relationship between porosity and burial depth of middle-deep clastic reservoirs in Shahejie Formation of Qikou sag, Huanghua depression

段。针对黄骅拗陷深凹区岩性储集体, 优选扇三角洲前缘水下分流河道、河口坝、远岸水下扇主水道等优势储集岩相, 配套使用体积压裂改造技术, 大幅度提升储层供液能力, 提高单井产量。

4 深凹区的优质生烃条件

4.1 半深湖—深湖区富有机质泥页岩的累积厚度大

黄骅拗陷古近系形成了巨厚的湖相烃源岩, 具有有机质丰度高、母质类型丰富、生烃强度大的特点, 为油气生成提供了良好基础^[19-22]。

沧东凹陷孔西斜坡暗色泥岩集中发育在孔二段, 厚度为 200~450 m[图 7(a)], 总有机碳(TOC)含量为 2%~5%, 干酪根类型以 I—II₁ 型为主。

歧口凹陷板桥次凹的暗色泥岩集中发育在沙河街组, 累计厚度为 850~2 100 m。其中: 沙河街组四段(沙四段)暗色泥页岩的厚度为 200~500 m[图 7(b)], TOC 含量为 1.7%~4.3%(平均为 2.7%)、干酪根类型以 I 型为主; 沙三段暗色泥页岩的厚度为 400~800 m[图 7(c)], TOC 含量为 0.6%~1.3%, 干酪根类型以 II₂—III 型为主; 沙二段暗色泥页岩的厚度为 50~100 m[图 7(d)], TOC 含量为 0.5%~0.8%, 干酪根类型以 II₁—II₂ 型为主; 沙一段暗色泥页岩的厚度为

200~700 m[图 7(e)], TOC 含量为 0.5%~1.0%, 干酪根类型以 II₂—III 型为主。

歧口主凹古近系沙河街组和东营组作为湖盆中心沉积, 其暗色泥页岩厚度大, 累积厚度为 2 200~3 920 m, 具备较好的生烃条件。其中: 沙四段暗色泥页岩的厚度为 200~400 m[图 7(b)], 有机质丰度及类型待落实; 沙三段暗色泥页岩的厚度为 800~1 500 m[图 7(c)], TOC 含量为 1.0%~5.0%(平均为 2.7%), 干酪根类型以 II 型为主; 沙二段暗色泥页岩的厚度为 100~220 m[图 7(d)], TOC 含量为 1.5%~3.3%(平均为 2.1%), 干酪根类型以 II 型为主; 沙一段暗色泥页岩的厚度为 800~1 200 m[图 7(e)], TOC 含量为 2.0%~7.0%(平均为 4.3%), 干酪根类型以 I—II₁ 型为主; 东营组暗色泥页岩的厚度为 300~600 m[图 7(f)], TOC 含量为 2.0%~3.7%, 干酪根类型以 I—II₁ 型为主。

4.2 深凹区中—高成熟烃源岩整体处于大量生油气阶段

中生代以来, 黄骅拗陷岩浆活动频繁, 导致最大地热流值是正常值的 1.3~1.7 倍, 盖层的地温梯度可达 3.6~4.3 °C/hm^[3], 较高的古地温场条件对于烃源岩有机质热演化具有加速和催化作用。

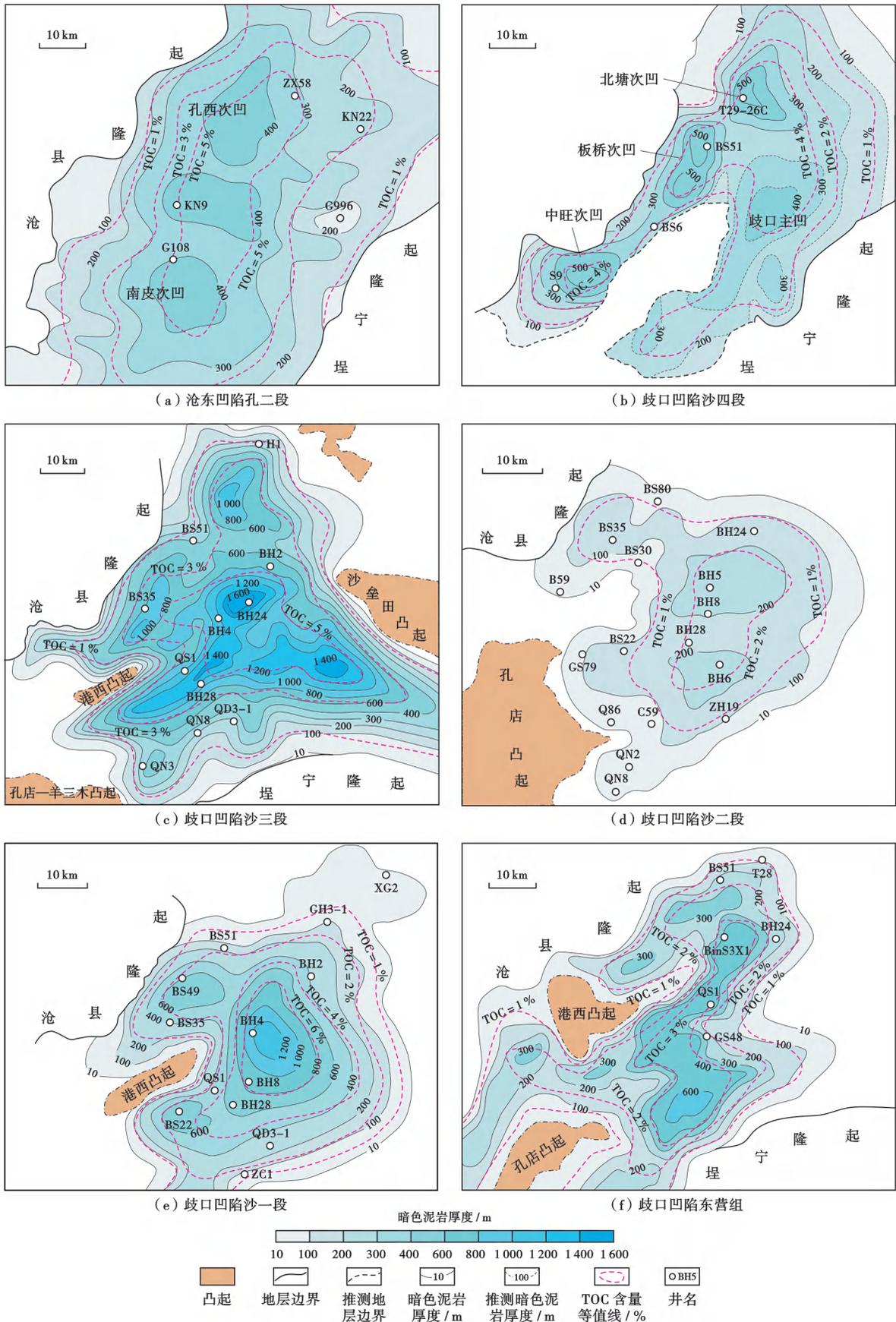


图 7 黄骅坳陷古近系重点生烃层系的暗色泥岩厚度

Fig. 7 Dark shales thickness in the key Palaeogene hydrocarbon generation strata in Huanghua depression

沧东凹陷孔二段沉积后经历了相对较长的热演化过程,对有机质的热成熟度具有一定补偿作用。成熟生油的门限深度约为 2 600 m,生气门限深度约为 4 600 m,大量生气的门限深度约为 4 800 m。孔西次凹孔二段的埋深为 3 000~5 100 m,镜质体反射率(R_o)为 0.7%~1.3%,处于中一高热演化阶段,以大量生油为主,在深凹区,孔二段中下部已进入大量生气阶段。

歧口凹陷的主力生烃层系具有有机质类型更加丰富、优质烃源岩发育、埋藏深度大、演化程度高的特点^[4]。沙河街组的成熟生油门限深度约为 3 100 m,生气门限深度约为 4 500 m,大量生气的门限深度约为 4 850 m。由于东营组的成岩演化时间相对较短,且新近系地温梯度具有降低的趋势,其成熟生油的门限深度相对较深,约为 3 300 m。板桥次凹深凹区的埋深可达 5 000~6 500 m,歧口主凹深凹区的最大埋深可达 11 000 m,已进入大量生气阶段。

此外,新生代始新世—更新世共有 6 期火山喷发^[23-26],连续的火山活动改变了渤海湾盆地的局部地温梯度,加速和催化了烃源岩的有机质热演化进程,促进了黄骅拗陷古近系烃源岩的生烃。

5 深凹区油气成藏模式

黄骅拗陷古近系“两期充注、先油后气、差异聚集”,形成了“高油低气”的油气分布特征,具体表现为在中一高斜坡区以油藏为主,在低斜坡—深凹区以气藏为主^[27-33]。多期构造活动、多类型岩性储层、多期次油源耦合形成了从孔二段到东营组的多套成藏组合,以及大面积岩性地层油气藏呈叠置连片分布的富油气格局。

5.1 沧东凹陷孔西次凹的油气成藏模式

孔二段沉积期,沧东断层和孔西断层的活动趋于稳定,古地貌也趋于平缓,地层倾角小于 10° ,构造尚未发生反转,湖盆中心位于现今中一高斜坡区[图 8(a)],沧东凹陷孔西次凹的孔二段整体处于半深湖—深湖沉积环境,发育一套厚度为 400~500 m 的富有机质页岩。

孔二段 1+2 亚段沉积期,来自沧县隆起的物源(沧州市物源)供给能力增强,扇三角洲前缘砂体前积至中斜坡区,高斜坡区局部发育远岸水下扇砂体,深凹区形成一套岩性储集体。孔一段沉积期,沧东断层加速沉降,孔二段下倾砂体发生构造反转,扇三角洲前缘砂体与湖相泥岩之间形成岩性圈闭。由于孔西次凹内不发育二、三级断层,整装断块条件使得圈闭具有优越的保存条件。孔一段上亚段沉积期,孔二段进入生油门限,并在新近纪进入大量生油气阶段,油气近距离运移、持续充注形成了岩性油气藏。孔二段的成岩演化、有机质热演化与油气充注具有协同性。

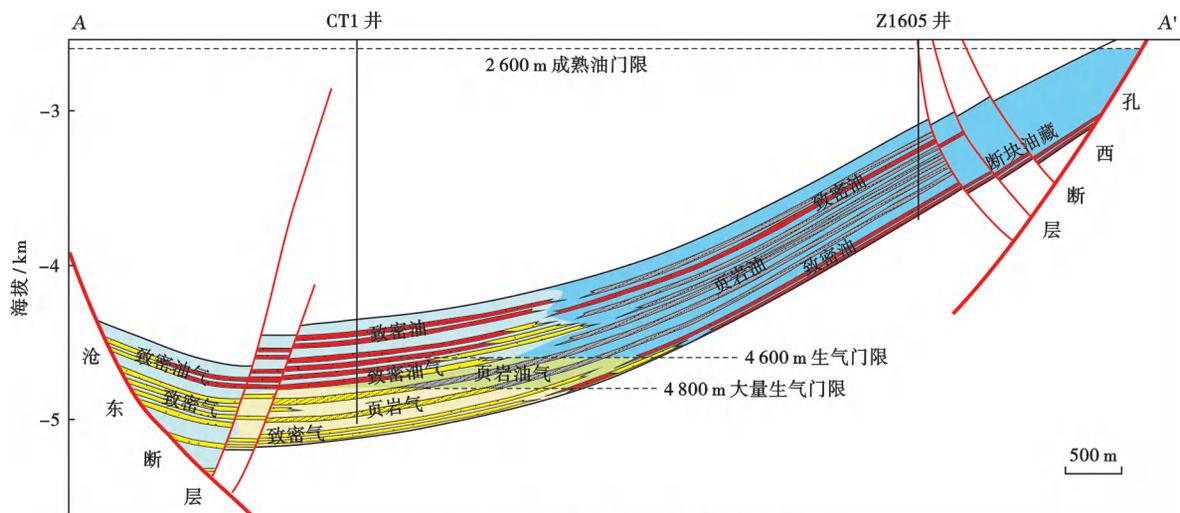
随着埋深增加,孔二段的储层物性逐渐变差,并在 3 500 m 以深逐渐致密化。但由于孔西次凹圈闭条件较好,油气在持续充注过程中会形成超压,这对储层的致密化进程具有一定的抑制作用。此外,干酪根在生烃过程中产生的有机酸也会对储层形成溶蚀,这在一定程度上也可改善储层物性。现阶段,孔西次凹的泥页岩整体处于中一高热演化阶段,泥页岩在大量排烃的同时仍残留大量可开发动用的游离烃,因而具备页岩油富集条件。

孔西斜坡区具备岩性圈闭形成时间早、经历生烃演化时间长、保存条件优越等特点。斜坡区常规和非常规油气的规模富集具有“中—低斜坡区为致密油、致密气和页岩油气”而“中—高斜坡区为致密油、页岩油、断块油藏”的有序分布状态[图 8(a)]。

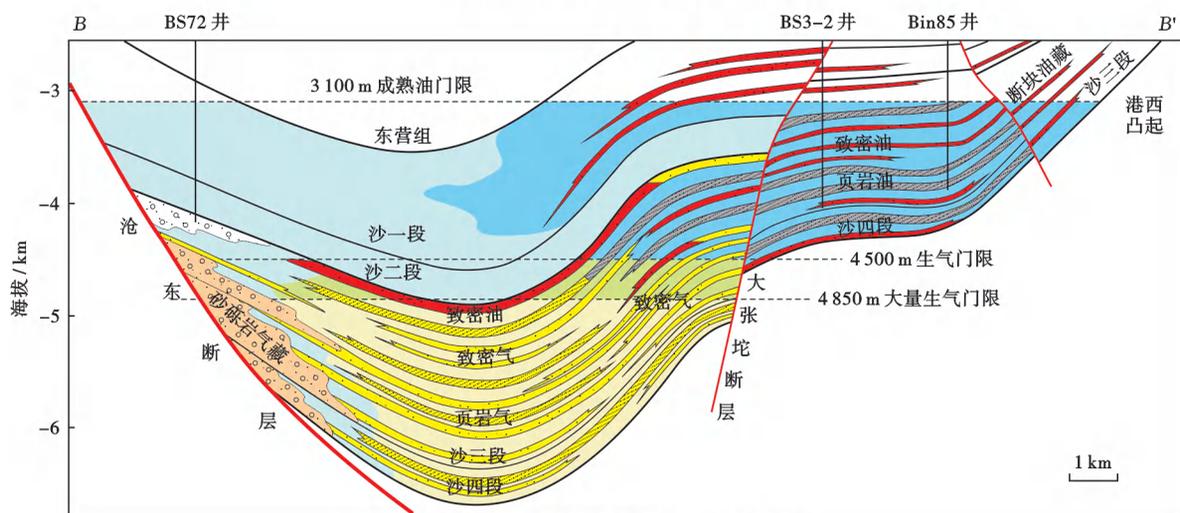
5.2 歧口凹陷板桥次凹的油气成藏模式

板桥次凹古近系发育沙三段+沙四段、沙一段+沙二段和东营组 3 套含油气系统。目前,板桥次凹的高斜坡区已发现板桥油气田和长芦油气田 2 个断块油气田,中—低斜坡区已部署实施 19 口探井,并在古近系各层系中均见油气显示,但在深凹区,东营组尚未进入成熟油门限,油气显示较弱。板桥次凹深凹区的沙一段+沙二段以滨—浅湖沉积环境为主[图 8(b)],有机质丰度较低,不利于生油,19 口探井均钻遇沙一段地层,见油气显示,但试油未获得工业油流。深凹区共有 7 口井钻遇沙三段 1 亚段,其中,6 口井试油,3 口井的产油量为 0.50~3.27 t/d;4 口井钻遇沙三段 2 亚段,其中,3 口井经试油有 2 口井获得工业油流:在 BinS62 井 4 255.83~4 318.03 m 井段,油层为 37 m/5 层,压裂后以 20 MPa 泵排,产油量为 2.00 t/d,累积产油量为 21.62 t,累积产气量为 $547.0 \times 10^4 \text{ m}^3$;在 BS35 井 4 719.6~4 743.9 m 井段,油层为 19.4 m/5 层,压裂后以 5 mm 油嘴试产,产油量为 6.32 t/d、产气量 $2.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,累积产油量为 33.90 t、累积产气量为 $12.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。总体上,沙三段+沙四段致密油气的勘探潜力相对较大。

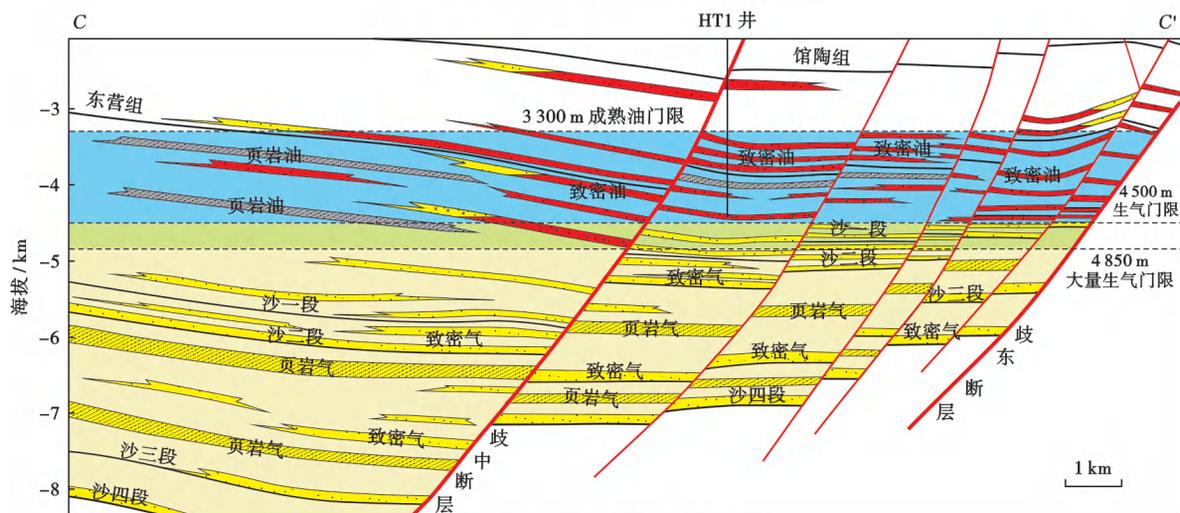
板桥次凹深凹区主要经历了 2 期成藏过程。第 1 期油气充注发生在东营组沉积末期,该时期沙三段烃源岩进入生油高峰期,原油沿着与烃源岩相叠或侧向对接的砂体运移,在断层封闭条件下可形成自生自储的岩性油藏。第 2 期发生在明化镇组下段沉积末期至今,该时期沙三段烃源岩进入大规模生气阶段,沙一段烃源岩进入大量生油气阶段。由于沙二段烃源岩的品质较差、东营组泥页岩尚未进入生烃门限,沙二段和东营组的油源主要来自于与断层沟通的沙三段、沙一段烃源岩。沙一段油气成藏具有“双源”供给的特点,其中,源内具备岩性油气藏的成藏条件,而在与沙三段沟通的断层发育区则具备形成构造-岩性油气藏的成藏条件。



(a) 沧东凹陷孔西次凹孔二段油气成藏模式



(b) 板桥次凹沙三段 + 沙四段油气成藏模式



(c) 歧口主凹古近系油气成藏模式



图 8 黄骅坳陷古近系深凹区油气成藏模式(剖面位置见图 1)

Fig. 8 Hydrocarbon accumulation models of the Paleogene deep sag areas in Huanghua depression

5.3 歧口主凹的油气成藏模式

环歧口主凹区的油气勘探始于20世纪60年代,按照“构造找油”的思路^[28],在北大港构造带东营组发现了唐家河油田,探明地质储量为 $1\,247.5 \times 10^4\text{t}$,已累积计产油 $421.45 \times 10^4\text{t}$,实现了高效开发。2021年,以断层-砂体耦合控藏的新认识为指导^[29],在沿岸构造转换带附近的东营组和沙河街组中发现了南港油田,新增探明储量+控制储量为 $4\,000 \times 10^4\text{t}$,实现了勘探新突破。

歧口主凹区发育沙四段、沙三段、沙二段、沙一段和东营组5套优质烃源岩[图8(c)],这些烃源岩均具备独立成藏条件。目前,埋深相对较浅的东营组已进入生油阶段,东营组三段(东三段)低位域湖底扇和斜坡扇砂体具备形成岩性油藏的条件。歧中断层与歧东断层之间的沙一段以生油为主,歧中断层下降盘的沙一段中亚段和下亚段进入大量生气阶段。沙二段、沙三段和沙四段整体进入大量生气阶段。

断层对于歧口主凹的油气运聚和成藏起着非常重要

的作用,不仅可以作为油气运聚的有利通道,也可以有效地封堵油气。断层的展布、组合关系、封闭性以及活动时期等各种因素都影响着油气运聚。垂向上,断层可以作为油气运移的有利通道,使油气通过断层发生垂向运移。由于歧东断层、歧中断层以及与之派生的断层等与NS向的构造脊可形成有利匹配,这促进了歧口主凹内生成的油气在向断坡区运移的过程中会沿砂体和整合面输导层进行侧向运移,并在遇到断层遮挡面时进行垂向运移。因此,断层两侧的断鼻、断块圈闭区是油气聚集的良好场所。大断层形成的构造圈闭、砂体的发育条件以及良好的油气运聚条件使得歧口主凹在纵向上形成连通的多套含油气系统,具备优越的成藏条件,成为重要的油气富集带。

6 深凹区有利区带的优选与勘探实践

6.1 孔西次凹致密油和页岩油气勘探

孔西斜坡受沧州市物源控制,其孔二段扇三角洲砂体的地震相具有中—低频、中—强振幅的反射特征(图9)。

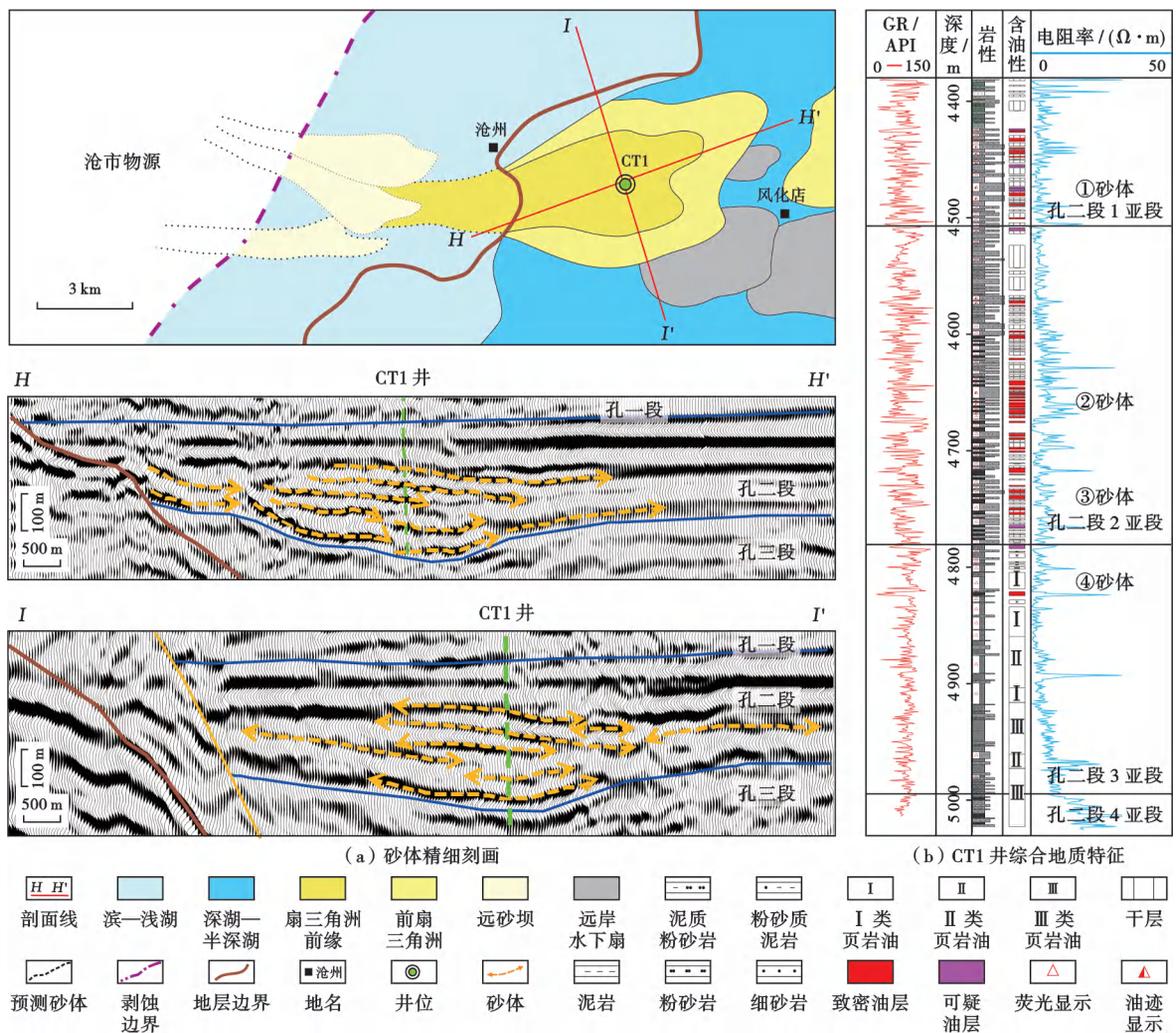


图9 沧东凹陷孔西次凹深凹区孔二段砂体精细刻画与CT1井综合地质特征

Fig. 9 Fine descriptions of sand bodies from Member 2 of Kongdian Formation in deep sag areas of Kongxi subsag in Cangdong sag and comprehensive geological characteristics of Well CT1

利用振幅-频率复合属性进行刻画,发现有利岩性圈闭 2 期 6 个,预测砂体厚度为 30~85 m、叠合面积为 41.4 km²,泥页岩厚度为 350~450 m;砂体两侧双向尖灭包裹于泥页岩之中,局部构造高点的埋深为 4 000~4 550 m。考虑到与砂体相邻的烃源岩已进入大规模排油阶段,孔西斜坡成藏条件优越,具备较大的勘探潜力。

在风险勘探中,为明确孔西低斜坡区扇三角洲前缘砂体的含油气性,油公司优选在鼻状构造的脊部砂岩主体区部署实施 CT1 井。该井完钻垂深为 5 021 m,共钻遇 4 期砂体、累计厚度为 236 m,储层孔隙度为 7%~13%,地层压力系数大于 1.2,其中,孔二段油气显示活跃。孔二段 1 亚段、2 亚段的常规砂岩解释油层为 75.5 m/37 层、差油层为 35.1 m/18 层;孔二段 3 亚段解释的页岩油 I 类“甜点”为 64.8 m/6 层,II 类“甜点”为 60.7 m/3 层。2023 年 9 月,针对 4 755.0~5 114.1 m 砂岩段,分 6 段 22 簇开展了体积压裂改造,压裂液量为 14 179.85 m³、加砂量为 914.8 m³,4 mm 油嘴放喷,获 118 t/d 的高产工业油流,落实砂岩油藏资源量 1.01×10⁸ t,实现了孔西斜坡深凹区岩性油气藏勘探的重大突破。

CT1 井落实孔二段 3 亚段的泥页岩厚度为 226 m,岩性主要为长英质页岩和长英质混合质页岩,其 TOC 含量为 2%~5%、干酪根类型以 I—II₁ 型为主,R_o

为 1.3%,游离烃(S₁)含量介于 0.75~2.85 mg/g(平均为 1.4 mg/g),页岩油的成藏条件优越。重新刻画孔西斜坡 7 个页岩油“甜点层”揭示,“甜点层”的叠合分布面积为 488 km²,预测资源量为 3.02×10⁸ t。目前,针对孔西斜坡孔二段 3 亚段 C6“甜点”已部署 GY15-6-1H 预探井,若实现突破,可落实孔西斜坡 50 万吨级页岩油规模建产区。

6.2 歧口主凹区致密油勘探

歧口主凹东三段低位体系域和早期湖侵体系域砂体的地震相呈低频、弱振幅、较连续的反射特征,分布在坡折带以下,向坡折带上倾方向尖灭(图 10)。纵向上可识别出多期叠置砂体,其分布面积为 133 km²,有利砂体的面积总计为 55 km²,圈闭资源量为 1.1×10⁸ t。

在风险勘探中,为明确歧口主凹东营组砂岩、沙一段上亚段和沙一段中亚段火山岩的成藏潜力,油公司优选在歧中断层上升盘构造-岩性圈闭中的东三段低位体系域和湖侵体系域砂体内部署实施 HT1 井。该井完钻垂深为 4 470 m,钻遇东三段 3 期砂体(图 10),解释油层厚度为 58.5 m,储层孔隙度为 12.80%~15.80%(平均为 12.32%)、渗透率为 3.75~7.32 mD(平均为 5.17 mD)。东三段深灰色泥页岩的累计厚度为 268 m,TOC 含量平均为 4.0%,S₁ 平均为 2.8 mg/g,实测 R_o 为 1.1%,达到大量生油阶段。东三段分 3 段

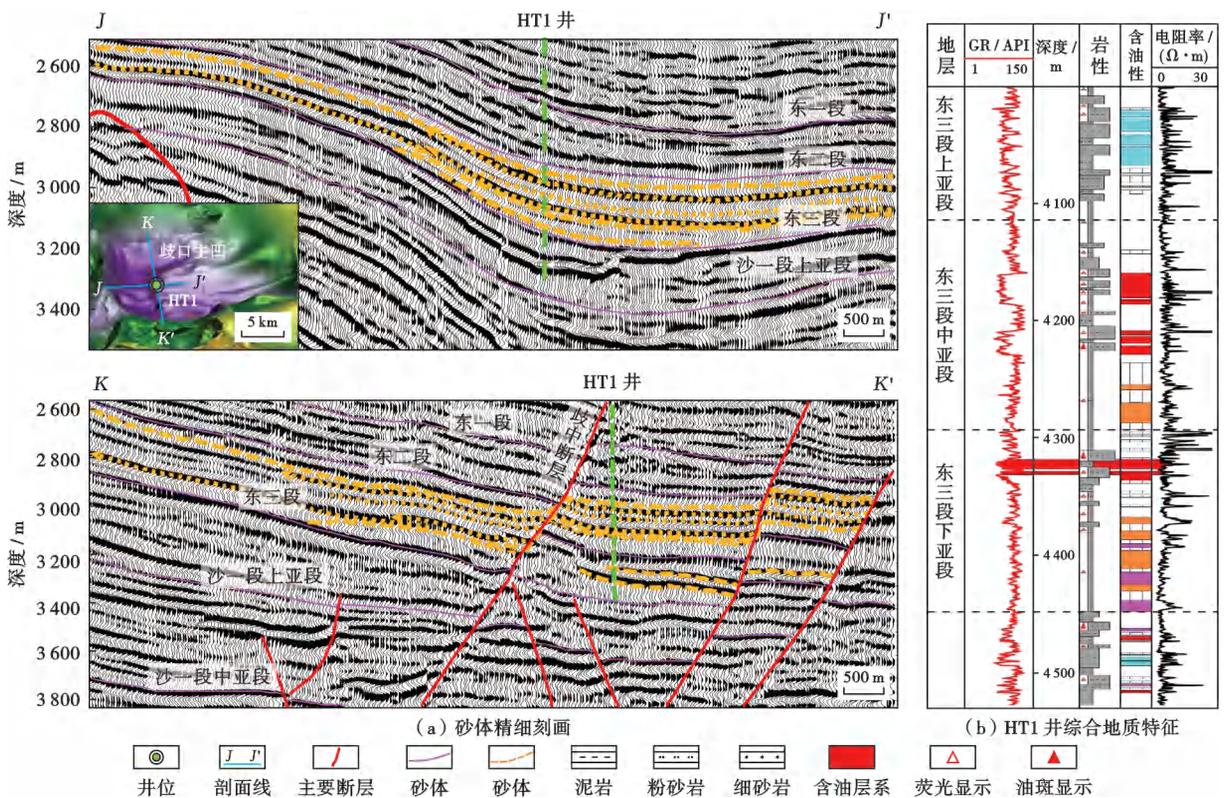


图 10 歧口主凹东营组砂体精细刻画与 HT1 井综合地质特征

Fig. 10 Fine descriptions of sand bodies from Dongying Formation in Qikou main sag and comprehensive geological characteristics of Well HT1

试油:第1段在4318.5~4331.5 m,油层为13 m/2层,三簇射孔,压裂的总液量为1361.2 m³、加砂量为123.9 m³,4 mm油嘴返排,有27.2%见油,压力为3.3 MPa,产油量为33.16 t/d,累计出油量为152.10 t,返排率为37.28%;第2段在4208.6~4229.1 m,油层为17.2 m/3层,均匀射孔,注入CO₂量为200 t,压裂的总液量为1535.0 m³、加砂量为124.7 m³,制氮排液,产油量为35.68 t/d,累计出油量为89.50 t,返排率为64.75%;第3段在4159.4~4171.4 m,油层为12 m/1层,制氮排液,产油量为6.10 t/d,累计出油量为24.53 t,累计出液量为882.57 m³,反排率为52.50%。

HT1井勘探证实,歧口主凹东三段的砂体与优质烃源岩呈叠置分布,形成了自生自储型岩性油气藏,新增预测储量为2128×10⁴ t,落实砂体面积为102 km²,区带圈闭资源量为1.2×10⁸ t,开辟了新的亿吨级增储

战场。

6.3 板桥次凹区致密油气勘探潜力

板桥次凹深层致密油气的勘探程度低,潜力大。通过储层反演与砂体精细刻画,在沙三段1亚段识别出南侧、北侧两个扇体。北侧扇体的总砂体面积为133 km²,有利圈闭面积为65.4 km²,圈闭资源量为155×10⁸ t;南侧扇体的总砂体面积为59.6 km²,有利圈闭面积为33.4 km²,圈闭资源量为79×10⁸ t。在沙三段2亚段,BinS62井和Bin85井在南侧扇体均获得工业油流,指示该地区具有较好的油气成藏条件。建议针对该扇体在靠近陡坡带一侧部署实施1口探井(图11),设计井深为4900 m,主要目的层为沙三段2亚段、兼探沙三段1亚段、沙二段和沙一段中亚段;该井若取得突破,可实现板桥次凹深凹区致密油气规模增储。

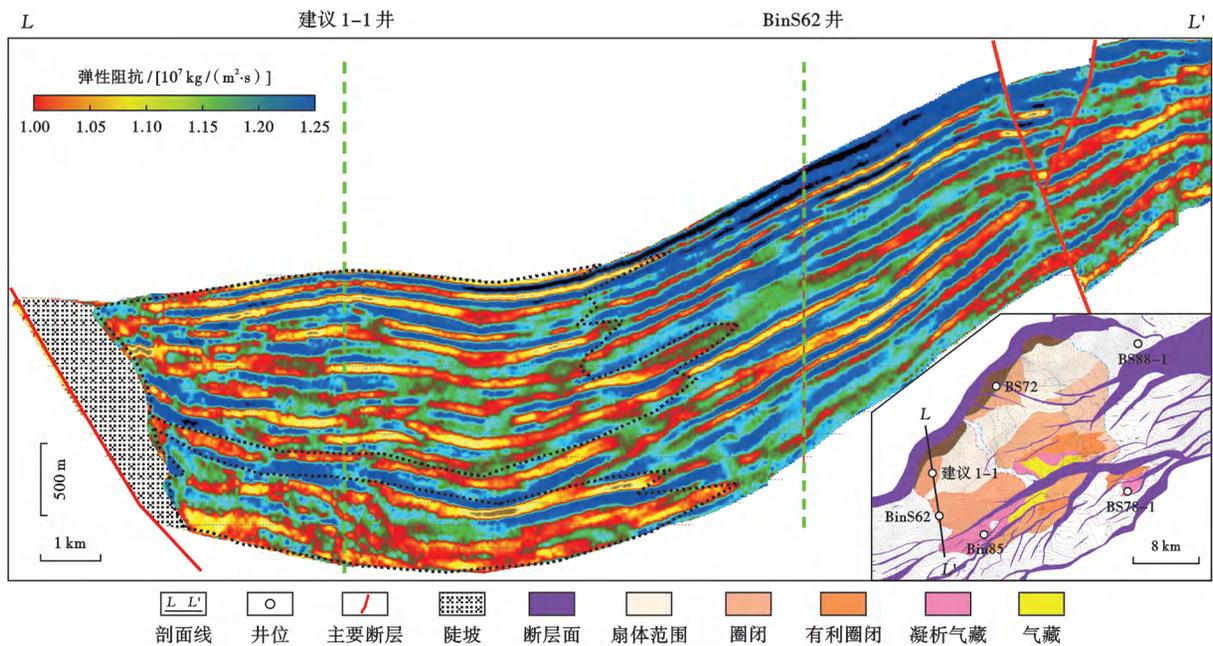


图11 歧口凹陷板桥次凹陷中一低斜坡区沙三段储层预测与含油气评价

Fig. 11 Reservoir prediction and oil-bearing evaluation of Member 3 of Shahejie Formation in the middle-low slope areas of Banqiao subsag, Qikou sag

7 结论

(1) 黄骅拗陷深凹区受多期断层活动、物源供给强度和短期基准面旋回变化控制,发育多种类型的储层,近物源区发育扇三角洲和近岸水下扇砂体,湖盆中部发育湖底扇、斜坡扇、远岸水下扇、滑塌浊积体和退积型三角洲前缘,二级断层周缘发育火成岩等多类型成因储层。当埋深大于3500 m后,储层受压实作用控制而逐渐致密化,深凹区具备发育大型致密岩性油气藏的储集条件。

(2) 黄骅拗陷深凹区的可容纳空间大于中一高斜坡区,且在湖泛期有利于富含有机质页岩的形成和保存,具备更好的源岩条件;深凹区的地层埋藏深度大,在歧口主凹内,东营组烃源岩已达到大量生油阶段,具备更好的生烃和保存条件。

(3) 通过建立黄骅拗陷孔西斜坡、板桥次凹和歧口主凹深凹区的油气成藏模式,提出在孔西斜坡的近源缓坡区、歧口主凹东三段的盆底扇和斜坡扇具备发育大型致密岩性油气藏的成藏条件。2023年,部署实施的CT1井和HT1井分别获得了产油量为118.9 t/d和

33.2~35.7 t/d 的高产工业油流,发现了2个亿吨级规模的增储战场,证实黄骅坳陷深凹区具备大型岩性油气藏的勘探潜力,为老油田的可持续发展提供了重要的资源基础。

参 考 文 献

- [1] 于兴河,姜辉,李胜利,等. 中国东部中、新生代陆相断陷盆地沉积充填模式及其控制因素——以济阳坳陷东营凹陷为例[J]. 岩性油气藏,2007,19(1):39-45.
YU Xinghe, JIANG Hui, LI Shengli, et al. Depositional filling models and controlling factors on Mesozoic and Cenozoic fault basins of terrestrial facies in eastern China——A case study of Dongying sag of Jiyang depression[J]. Lithologic Reservoirs, 2007,19(1):39-45.
- [2] 贾承造. 含油气盆地深层—超深层油气勘探开发的科学技术问题[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2023,47(5):1-12.
JIA Chengzao. Key scientific and technological problems of petroleum exploration and development in deep and ultra-deep formation[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2023,47(5):1-12.
- [3] 大港油气区编篡委员会编. 中国石油地质志:大港油气区[M]. 2版. 北京:石油工业出版社,2022.
Dagang Oil and Gas area Compilation Committee. Geology of China petroleum;Dagang oil and gas area[M]. 2nd ed. Beijing:Petroleum Industry Press,2022.
- [4] 蒲秀刚,吴永平,周建生,等. 歧口凹陷岩性地层油气藏特征及勘探潜力[J]. 石油学报,2007,28(2):35-39.
PU Xiugang, WU Yongping, ZHOU Jiansheng, et al. Characteristics and exploration potential of lithologic-stratigraphic hydrocarbon reservoirs in Qikou sag of Dagang oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica,2007,28(2):35-39.
- [5] 吴永平,于学敏. 黄骅坳陷天然气资源潜力与勘探开发对策[J]. 天然气地球科学,2003,14(4):235-239.
WU Yongping, YU Xuemin. Natural gas resource potential and the strategy of exploration and development in Huanghua depression[J]. Natural Gas Geoscience,2003,14(4):235-239.
- [6] 李三忠,索艳慧,郭玲莉,等. 渤海湾盆地大歧口凹陷变换构造与板内变形差异[J]. 海洋地质与第四纪地质,2017,37(4):98-109.
LI Sanzhong, SUO Yanhui, GUO Lingli, et al. Transfer zones and differences in intra-plate deformation in great Qikou sag of the Bohai Bay Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2017,37(4):98-109.
- [7] 李三忠,索艳慧,周立宏,等. 华北克拉通内部的拉分盆地:渤海湾盆地黄骅坳陷结构构造与演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2011,41(5):1362-1379.
LI Sanzhong, SUO Yanhui, ZHOU Lihong, et al. Pull-apart Basins within the North China craton: structural pattern and evolution of Huanghua depression in Bohai Bay Basin[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition),2011,41(5):1362-1379.
- [8] 国建英,齐雪宁,侯连华,等. 渤海湾盆地特低渗一致密砂(砾)岩天然气成因及成藏模式[J]. 天然气地球科学,2022,33(2):181-194.
GUO Jianying, QI Xuening, HOU Lianhua, et al. Origin and accumulation model of ultra-low permeability-tight sandstone (gravel) gas in Bohai Bay Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022,33(2):181-194.
- [9] 韩国猛,陈冬霞,马建英,等. 黄骅坳陷歧北斜坡油气成藏机制与成藏模式[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2021,51(6):1636-1653.
HAN Guomeng, CHEN Dongxia, MA Jianying, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism and accumulation model of Qibei slope in Huanghua depression[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition,2021,51(6):1636-1653.
- [10] 赵贤正,蒲秀刚,周立宏,等. 深盆湖相区页岩油富集理论、勘探技术及前景——以渤海湾盆地黄骅坳陷古近系为例[J]. 石油学报,2021,42(2):143-162.
ZHAO Xianzheng, PU Xiugang, ZHOU Lihong, et al. Enrichment theory, exploration technology and prospects of shale oil in lacustrine facies zone of deep basin: a case study of the Paleogene in Huanghua depression, Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021,42(2):143-162.
- [11] 王家豪,王华,任建业,等. 黄骅坳陷中区大型斜向变换带及其油气勘探意义[J]. 石油学报,2010,31(3):355-360.
WANG Jiahao, WANG Hua, REN Jianye, et al. A great oblique transition zone in the central Huanghua depression and its significance for petroleum exploration[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010,31(3):355-360.
- [12] 周立宏,韩国猛,董越崎,等. 渤海湾盆地歧口凹陷滨海断鼻断砂组合模式与油气成藏[J]. 石油勘探与开发,2019,46(5):869-882.
ZHOU Lihong, HAN Guomeng, DONG Yueqi, et al. Fault-sand combination modes and hydrocarbon accumulation in Binhai fault nose of Qikou sag, Bohai Bay Basin, East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019,46(5):869-882.
- [13] 周立宏,蒲秀刚,肖敦清,等. 渤海湾盆地沧东凹陷孔二段页岩油形成条件及富集主控因素[J]. 天然气地球科学,2018,29(9):1323-1332.
ZHOU Lihong, PU Xiugang, XIAO Dunqing, et al. Geological conditions for shale oil Formation and the main controlling factors for the enrichment of the 2nd Member of Kongdian Formation in the Cangdong sag, Bohai Bay Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018,29(9):1323-1332.
- [14] 周立宏,韩国猛,马建英,等. 歧口凹陷西南缘沙河街组一段下亚段古环境特征与沉积模式[J]. 石油学报,2020,41(8):903-917.
ZHOU Lihong, HAN Guomeng, MA Jianying, et al. Palaeoenvironment characteristics and sedimentary model of the lower submember of Member 1 of Shahejie Formation in the southwestern margin of Qikou sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020,41(8):903-917.
- [15] 王家豪,王华,肖敦清,等. 陆相断陷湖盆异重流与滑塌型重力流沉积判别[J]. 石油学报,2020,41(4):392-402.
WANG Jiahao, WANG Hua, XIAO Dunqing, et al. Differentiation between hyperpycnal flow deposition and slump-induced gravity flow deposition in terrestrial rifted lacustrine basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020,41(4):392-402.
- [16] 赵贤正,曾澍辉,韩国猛,等. 渤海湾盆地黄骅坳陷板桥凹陷深层低渗透(致密)砂岩气藏充注特征及成藏过程[J]. 石油与天然气地质,2020,41(5):913-927.
ZHAO Xianzheng, ZENG Jianhui, HAN Guomeng, et al. Char-

- ging characteristics and accumulation process of deep low-permeability (tight) sand gas reservoirs in Banqiao sag, Huanghua depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(5): 913-927.
- [17] 侯中帅, 周立宏, 金凤鸣, 等. 歧口凹陷热液流体活动及其对储集层的改造[J]. *地球科学*, 2021, 46(1): 200-214.
HOU Zhongshuai, ZHOU Lihong, JIN Fengming, et al. Hydrothermal fluid activity and its reformation on reservoirs in Qikou depression[J]. *Earth Science*, 2021, 46(1): 200-214.
- [18] 蒲秀刚, 周立宏, 王文革, 等. 黄骅坳陷歧口凹陷斜坡区中深层碎屑岩储集层特征[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(1): 36-48.
PU Xiugang, ZHOU Lihong, WANG Wenge, et al. Medium-deep clastic reservoirs in the slope area of Qikou sag, Huanghua depression, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(1): 36-48.
- [19] 周立宏, 何海清, 郭绪杰, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷古近系沙一下亚段中等成熟页岩油富集主控因素与勘探突破[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(5): 1073-1086.
ZHOU Lihong, HE Haiqing, GUO Xujie, et al. Main factors controlling the medium-mature shale oil enrichment and exploration breakthrough in the Paleogene lower E₃S₁^L in Qikou sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(5): 1073-1086.
- [20] 周立宏, 韩国猛, 杨飞, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷沙河街组三段一亚段地质特征与页岩油勘探实践[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(2): 443-455.
ZHOU Lihong, HAN Guomeng, YANG Fei, et al. Geological characteristics and shale oil exploration of E₃^{S1(1)} in Qikou sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(2): 443-455.
- [21] 周立宏, 陈长伟, 韩国猛, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷沙一下亚段地质特征与页岩油勘探潜力[J]. *地球科学*, 2019, 44(8): 2736-2750.
ZHOU Lihong, CHEN Changwei, HAN Guomeng, et al. Geological characteristics and shale oil exploration potential of lower first Member of Shahejie Formation in Qikou sag, Bohai Bay Basin[J]. *Earth Science*, 2019, 44(8): 2736-2750.
- [22] 周立宏, 蒲秀刚, 陈长伟, 等. 陆相湖盆细粒岩油气的概念、特征及勘探意义: 以渤海湾盆地沧东凹陷孔二段为例[J]. *地球科学*, 2018, 43(10): 3625-3639.
ZHOU Lihong, PU Xiugang, CHEN Changwei, et al. Concept, characteristics and prospecting significance of fine-grained sedimentary oil gas in terrestrial lake basin: a case from the second Member of Paleogene Kongdian Formation of Cangdong sag, Bohai Bay Basin[J]. *Earth Science*, 2018, 43(10): 3625-3639.
- [23] 周立宏, 李洪香, 杨朋, 等. 沧东中生界火山岩特征与油气成藏模式[J]. *特种油气藏*, 2017, 24(3): 9-14.
ZHOU Lihong, LI Hongxiang, YANG Peng, et al. Geologic characteristics and hydrocarbon accumulation model of Mesozoic volcanic rocks in Cangdong area[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2017, 24(3): 9-14.
- [24] 肖敦清, 王桂芝, 韦阿娟, 等. 黄骅坳陷火成岩成藏特征研究[J]. *特种油气藏*, 2003, 10(1): 59-61.
XIAO Dunqing, WANG Guizhi, WEI Ajuan, et al. Study on igneous reservoir forming conditions and distribution in Huanghua depression[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2003, 10(1): 59-61.
- [25] 周立宏, 吴永平, 肖敦清, 等. 黄骅坳陷第三系火成岩与油气关系探讨[J]. *石油学报*, 2000, 21(6): 29-34.
ZHOU Lihong, WU Yongping, XIAO Dunqing, et al. Characteristics of the tertiary igneous rocks and investigation of their relationships with hydrocarbon in Huanghua depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 21(6): 29-34.
- [26] 石彦民, 肖敦清. 黄骅坳陷枣北地区火山岩综合油藏描述[J]. *石油勘探与开发*, 2000, 27(1): 87-91.
SHI Yanmin, XIAO Dunqing. The integrated reservoir description of volcanic rock in Zaobei area of Huanghua depression[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2000, 27(1): 87-91.
- [27] 周立宏, 陈长伟, 韩国猛, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷陆相湖盆页岩气富集条件及勘探潜力[J]. *天然气工业*, 2021, 41(5): 1-10.
ZHOU Lihong, CHEN Changwei, HAN Guomeng, et al. Enrichment conditions and exploration potential of shale gas in continental lake basins in Qikou sag, Bohai Bay Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(5): 1-10.
- [28] 姜文亚, 宋泽章, 周立宏, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷地层压力结构特征[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2020, 50(1): 52-69.
JIANG Wenya, SONG Zezhang, ZHOU Lihong, et al. Characteristics of formation-pressure-structure of Qikou sag, Bohai Bay Basin[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2020, 50(1): 52-69.
- [29] 周立宏, 陈长伟, 韩国猛, 等. 陆相致密油与页岩油藏特征差异性及其勘探实践意义: 以渤海湾盆地黄骅坳陷为例[J]. *地球科学*, 2021, 46(2): 555-571.
ZHOU Lihong, CHEN Changwei, HAN Guomeng, et al. Difference characteristics between continental shale oil and tight oil and exploration practice: a case from Huanghua depression, Bohai Bay Basin[J]. *Earth Science*, 2021, 46(2): 555-571.
- [30] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 断陷湖盆湖相页岩油形成有利条件及富集特征——以渤海湾盆地沧东凹陷孔组二段为例[J]. *石油学报*, 2019, 40(9): 1013-1029.
ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, PU Xiugang, et al. Favorable formation conditions and enrichment characteristics of lacustrine facies shale oil in faulted lake basin: a case study of Member 2 of Kongdian Formation in Cangdong sag, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(9): 1013-1029.
- [31] 赵贤正, 周立宏, 肖敦清, 等. 歧口凹陷斜坡区油气成藏与勘探实践[J]. *石油学报*, 2016, 37(增刊2): 1-9.
ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, XIAO Dunqing, et al. Hydrocarbon accumulation and exploration practice of slope area in Qikou sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(S2): 1-9.
- [32] 国建英, 李剑, 于学敏, 等. 黄骅坳陷大港探区深层天然气成因类型与分布规律[J]. *石油学报*, 2013, 34(增刊1): 112-119.
GUO Jianying, LI Jian, YU Xuemin, et al. Origin and distribution of deep natural gas in Dagang exploration area of Huanghua depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(S1): 112-119.
- [33] 于学敏, 姜文亚, 何炳振, 等. 歧口凹陷古近系天然气藏主要特征[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(2): 183-189.
YU Xuemin, JIANG Wenya, HE Bingzhen, et al. Characteristics of the Paleogene gas reservoirs in Qikou sag[J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(2): 183-189.