

渤海湾盆地东濮凹陷盐湖相成烃成藏特征

徐田武¹,张洪安²,李继东¹,赵伟³

(1. 中国石化 中原油田分公司 勘探开发研究院,河南 濮阳 457001; 2. 中国石化 中原油田分公司,河南 濮阳 457001;
3. 中海油 能源发展股份有限公司 工程技术分公司,天津 300457)

摘要:盐湖相油气聚集是全球,特别是中国中生代陆相地层一个有特色的石油地质现象。为丰富发展这一领域研究,文章报道了中国东部渤海湾盆地东濮凹陷的研究进展,通过系统的烃源岩和原油地质地球化学研究,分析了盐湖相烃源岩的成烃和成藏特征,也为区域下步勘探部署提供依据。结果表明,典型盐湖相烃源岩发育在凹陷北部,主要层位为沙河街组三段下亚段(简称沙三下亚段)和沙河街组四段上亚段(简称沙四上亚段),岩性为页岩,发育“双层”结构(下层为有机质和粘土,上层为黄铁矿和方解石),生油具有早生与早排的特点。盐湖相油气聚集呈现出常规与非常规油气藏共同发育的特征,其中常规油气藏具有“有序分布、差异富集”的特点,而非常规页岩和致密油气藏的发育也与盐湖相富有机质烃源岩关系密切,反映了盐湖相富有机质烃源岩对油气成藏的控制。建议下步区域勘探围绕沙三下亚段和沙四上亚段这两套富有机质烃源岩发育区展开多类型油气藏的勘探。这些认识可供其他咸化湖盆油气地质研究和勘探参考。

关键词:盐湖;咸化湖盆;有机质聚集;页岩油气;致密油气;沙河街组;东濮凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Characters of hydrocarbon generation and accumulation of salt-lake facies in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

Xu Tianwu¹, Zhang Hong'an², Li Jidong¹, Zhao Wei³

(1. Exploration and Production Research Institute of Zhongyuan Oilfield Branch Company, SINOPEC, Puyang, Henan 457001, China;
2. Zhongyuan Oilfield Branch Company, SINOPEC, Puyang, Henan 457001, China; 3. CNOOC Ener Tech-Drilling & Production Co., Tianjin 300457, China)

Abstract: Hydrocarbon generation and accumulation in salt lakes are a typical petroleum geological phenomenon in the world, especially in the Mesozoic and Cenozoic continental strata of China. In order to advance research in this field, this paper discusses the research progress of Dongpu Sag in the Bohai Bay Basin, eastern China. The hydrocarbon generation and accumulation characteristics of salt-lake source rocks were analyzed through systematic geological and geochemical studies of source rocks and crude oils, providing clues for future regional deployments of exploration. Results show that the typical salt-lake source rocks were developed spatially in the north of the sag, specifically the lower section of the third member($E_s^{4(U)}$) and the upper section of the fourth member($E_s^{4(U)}$) of the Shahejie Formation vertically. Its lithology is shale featuring early hydrocarbon generation and expulsion, with a “double-layered” structure, i. e. the lower layer dominated by organic matters and clay minerals and the upper one dominated by pyrites and calcites. The hydrocarbon accumulation in salt lakes of Dongpu Sag develops along with the growth of both conventional and unconventional petroleum reservoirs. The conventional ones are characterized by “ordered distribution and differential enrichment”, while the development of unconventional oil and gas reservoirs is closely related to the organic-rich salt-lake source rocks, reflecting the control of organic-rich salt-lake source rocks on hydrocarbon accumulation. It is recommended that further regional exploration should be focused on the two organic-rich source rock areas, the $E_s^{4(U)}$ and the $E_s^{4(U)}$, and exploration of various petroleum reservoirs should be carried out. These understandings are of referential significance for the geological research of oil and gas and the exploration in other saline lacustrine basins.

收稿日期:2018-05-17;修订日期:2018-12-28。

第一作者简介:徐田武(1981—),男,博士,高级工程师,油气田勘探开发。E-mail:359329306@qq.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05006-004)。

Key words: salt lake, saline lacustrine basin, aggregation of organic matter, shale oil and gas, tight oil and gas, Shahejie Formation, Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

盐湖顾名思义是一种含盐的湖泊,湖盆水体盐度定义通常大于3.5%,属于咸化湖盆序列的一种,广泛分布于地史时期^[1-5]。在这种环境中,水体通常会因盐度高而发生盐度分层,从而导致表层水溶解氧量高而使得嗜盐性藻类产率高,而底层水由于基本不与表层水发生交换,且微生物呼吸作用耗尽游离氧而形成缺氧环境,从而造就了独特的表层高生物生产率与底层缺氧环境组合,形成烃源岩,为大油气田的形成奠定了物质基础^[6-8]。因此,盐湖相油气聚集是一个非常普遍的石油地质现象,特别是在中国的中新生代陆相湖盆中,如中国东部渤海湾盆地东营凹陷和东濮凹陷的始新统沙河街组^[9-11],中部的江汉盆地始新统潜江组^[12-13],以及西部的柴达木盆地始新统下干柴沟组^[14-15]。此外,最近也有学者报道了古生代的实例,而且是独特的碱性盐湖,即准噶尔盆地玛湖凹陷下二叠统风城组^[16]。因此对盐湖相油气地质的研究历来是石油地质地球化学领域的一个热点。

前人统计发现,在油与盐共生的盆地中,有46%的盆地的油气层产于盐系地层之下,41%的盆地的油气层产于盐系地层之上,13%的盆地的油气层产于盐系之间^[17-18]。可见,盐岩对油气成藏有着重要影响,可以涉及到成烃成藏的诸多方面,如盐岩成因^[19-20]、对烃源岩热演化的影响^[21-22]、对储层发育的影响^[23]以及对油气运聚的影响^[24]等,并取得了一些重要研究成果。如针对盐岩对有机质生烃的研究,盐岩环境在盐岩形成初期,由于水体盐度增加,或不同盐度水体的混合,底部水体几乎停滞,因此造成大量生物死亡,在弱氧化-还原环境下,对有机质的保存和生烃十分有利,因此盐岩环境可以具有巨大的有机质生成能力。Evans和Kirkland通过引证多方资料,强调高盐环境的原始生产率可超过正常海洋环境的高值^[25]。在盐岩对油气运聚的影响方面,一些学者多已指出,盐岩作为良好盖层,使得盐下保存异常高压,当盐构造发生活动,超压释放,形成良好的油气驱动动力^[26-27],也有学者指出,由于盐度和温度的共同影响,引起流体密度差,导致自由对流和油气运移等^[28]。

东濮凹陷是我国东部渤海湾盆地临清凹陷的一个三级构造单元,属于中国东部始新统沙河街组诸多盐湖相油气聚集的一个典型实例^[20,29-30],历经四

十余年的勘探开发,目前已进入高勘探成熟阶段,勘探难度愈来愈大^[31],因此落实后备资源,夯实稳产的资源基础已经成为当务之急^[30]。故开展东濮凹陷的盐湖相成烃成藏特征研究,为下步增储增产领域的接替提供理论指导,对中原油田实现油气稳产具有重大的现实意义,而且可为其他类似盐湖相盆地油气地质地球化学研究提供参考。目前勘探和地质研究中出现的关键问题是北部含盐区和南部无盐区成烃成藏的差异性,如烃源岩发育的差异及其原因?在成藏方面,含盐区具有含油层系多,含油层系逐渐变新,而无盐区含油层系少,含油层系逐渐变老,原因何在?北部含盐区与南部无盐区油藏出现最浅深度差异大、单位面积储量丰度相差近20倍,原因何在?北部含盐区超压-强超压,南部无盐区常压-弱超压,原因何在?北部含盐区自浅至深,油气性质差异大,原因何在?等等。本文拟通过系统的烃源岩和原油地质地球化学分析,结合地质背景对这些问题进行研究。

1 地质背景

渤海湾盆地东濮凹陷地处盆地西南端,是中国东部一个典型的中新生代陆相断陷盆地^[31-33](图1)。该凹陷整体呈北北东走向,长约140 km,南宽(62 km)、北窄(14~18 km),面积为5 300 km²。截止到2015年,累计已探明石油资源量 5.9×10^8 t,天然气 $1\,387 \times 10^8$ m³,其中近90%的石油与天然气探明储量分布在北部含盐区,南部无盐区资源贫乏,每平方千米储量探明丰度仅为北部含盐区的1/20,由此表明盐湖环境与油气聚集的关系异常紧密,可说是全球盐湖相油气聚集的一个典型范例^[34-38]。

北部含盐区主要发育了4套盐岩,由上至下包括沙一下亚段、沙三上亚段—沙三中上亚段(文9盐,也称卫城上盐)、沙三中下亚段(也称卫城下盐)、沙三下亚段—沙四亚段(也称文23盐)(图2)。盐岩在平面上和纵向上具有沉积中心频繁迁移的特征,碎屑岩地层与盐岩层在空间上形成“指状交叉带”^[39],如以沙三段为例,其主要岩性为深灰色、灰色泥岩、盐岩与浅灰、灰白色粉砂岩不等厚互层,夹有碳酸盐岩、页岩与油页岩,部分地区偶见棕红、灰绿色泥岩,具有“岩性、厚度变化大”的特点。

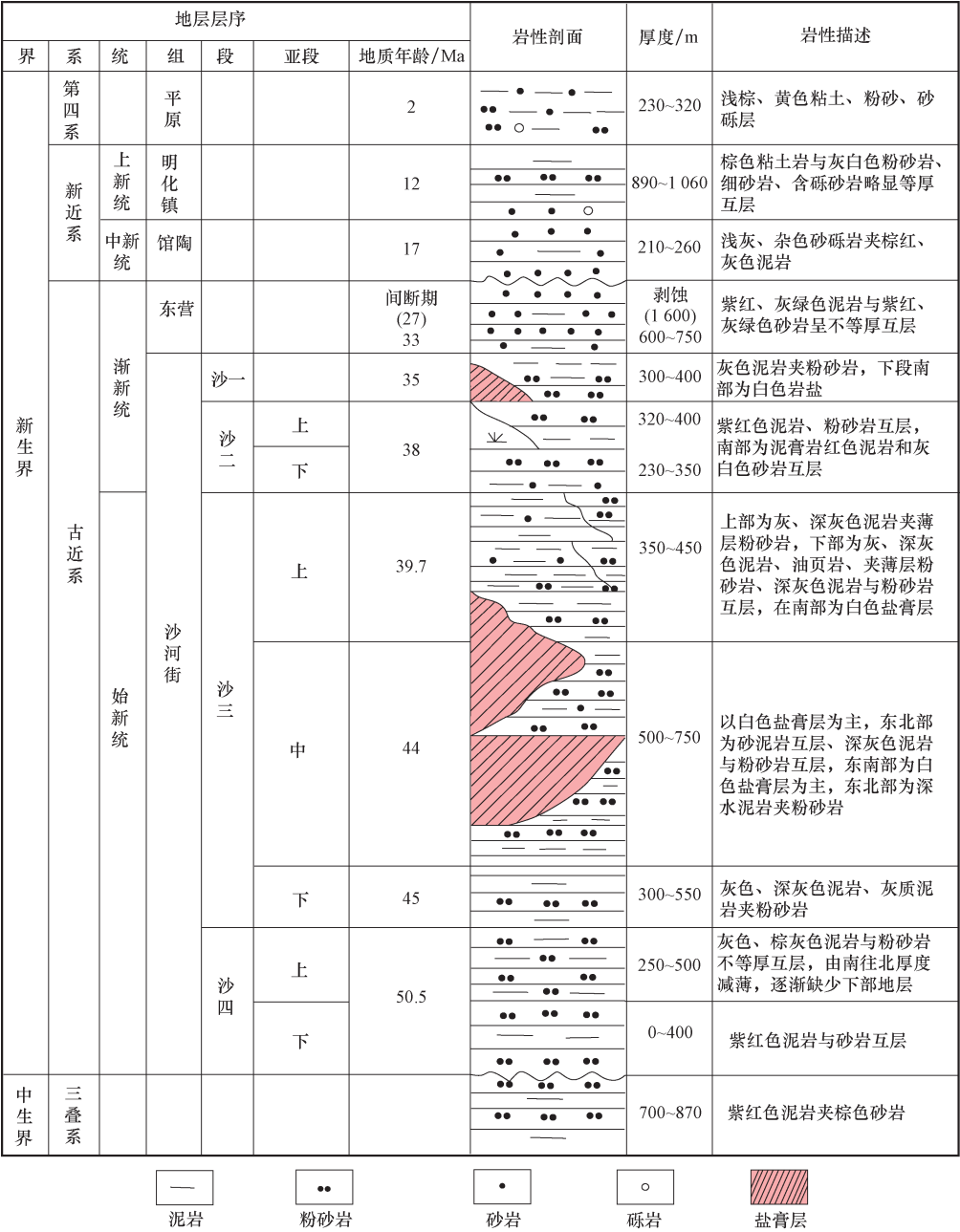


图 2 东濮凹陷古近系地层组合示意图

Fig. 2 General scheme of the Paleogene stratum association in Dongpu Sag

2.3 烃源岩形成环境与油源贡献

富有机质烃源岩的地球化学特征分析发现,其形成环境为还原,是研究区油藏的主要贡献者。首先,通过对研究区北部含盐区烃源岩样品进行 $V/(V + Ni)$ 测试分析研究沉积环境^[42-44]。前人研究表明, $V/(V + Ni)$ 比值为 0.4~0.6, 0.6~0.84, >0.84 分别表示水体呈弱分层的贫氧环境(弱氧化)、中等分层的缺氧环境(还原)、强分层的还原环境(强还原)^[43,45]。研究区北部含盐区的实际分析结果显示,在 95% 的烃源岩样品中发现 $V/(V + Ni)$ 介于 0.6~

0.84,表明富有机质烃源岩沉积时为缺氧的还原环境。

此外,烃源岩的有机地球化学表明,富有机质烃源岩(页岩+部分灰黑色泥岩)的生标具有伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷大于 0.5, Pr/Ph 小于 0.7 的特征(图 6),表明这是一种还原环境^[46-47],与研究区北部含盐区原油具有高度的相似性(图 6),表明富有机质烃源岩为油气藏的主要贡献者。相比而言,大量浅灰色-灰色泥岩则不具备这种有机生物标志化合物特征,其伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷通常小于 0.5, Pr/Ph 大于 0.7,说明其不是油藏的主要贡献者(图 6)。

表1 东濮凹陷文248单井古近系沙三下亚段岩性与TOC, $S_1 + S_2$ 相关关系

Table 1 Correlations of the lithology with TOC and $S_1 + S_2$ of Well Wen248 in the Es^{3L} in Dongpu Sag

井深/m	岩性	TOC/%	$S_1 + S_2 /$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
3 373.05	灰色泥岩	0.20	0.16
3 373.80	灰色、棕褐色泥岩	0.21	0.16
3 374.55	灰色泥岩	0.25	0.21
3 375.63	灰色泥岩	0.23	0.15
3 377.17	Es ³ (下)	0.33	0.26
3 380.00	含石膏灰色泥岩	0.28	0.002
3 381.70	深灰色泥岩	0.50	0.69
3 382.70	深灰色页岩	1.97	8.49
3 384.25	深灰色页岩	0.90	2.36
3 385.45	深灰色页岩	2.79	9.63
3 386.05	深灰色页岩	2.64	13.06
3 387.95	深灰色页岩	1.42	4.64
3 388.35	深灰色页岩	2.65	12.33
3 388.88	深灰色页岩	2.72	10.07
3 389.18	灰色泥页岩	0.62	0.91
3 389.77	灰色、紫红色泥岩	0.42	0.57
3 390.17	灰色泥岩、含石膏夹层	0.32	0.43
3 390.77	灰色泥岩夹薄层石膏	0.22	0.23
3 391.17	灰色、浅紫红色泥岩	0.52	0.54
3 391.83	深、灰色页岩夹薄层石膏	0.45	0.36
3 392.63	灰色泥岩与灰白色石膏薄互层	0.13	0.13
3 393.03	灰色泥膏岩	0.26	0.21

2.4 烃源岩生、排、烃特征

以上分析表明,东濮凹陷研究区富有机质烃源岩为还原环境下沉积的页岩,这种页岩通常以发育富硫干酪根为特色,并易于早期降解^[37];加之较为发育的纹层理(图4a)为烃类排驱提供了良好运移通道^[46],使得排烃门限变浅,具有早生、早排的生烃特征。以 $(S_1 + S_2)/TOC$ 变化特征为例,自马寨地区—柳屯地区—海通集地区,随烃源岩沉积水体盐度降低,排烃门限依次变深。马寨地区为2 800 m,柳屯地区为3 100 m,海通集地区为3 300 m(图7)。另外通过对含盐区卫20井的热模拟分析,发现灰色页岩在 R_o (镜质体反射率)=0.8%时即可达到生烃高峰(图8),比常见烃源岩的生油高峰(R_o 在1.0%左右)明显提前^[48]。

分析认为含盐区有机质类型好,活化能低,生烃门

限温度低^[30]。此外,盐的存在增加了烃源岩的热导率和聚热性能,有利于早期生烃^[33]。无机盐类溶液属于强电解质溶液,降低了C—C键的键能,从而有利于有机质的脱羧生烃^[49]。

3 油气成藏特征及模式

在盐湖相富有机质烃源岩发育的基础上,研究区的油气聚集呈现出常规与非常规油气藏共同发育的特征。

3.1 盐湖环境对油气成藏的宏观控制

分析发现,盐湖环境对油气成藏有着明显的控制,反映了盐湖相盆地油气的聚集特征^[24,37]。首先是对油气藏分布的宏观控制,北部含盐区的油气储量和发现程度都高于南部无盐区。其次是与油气显示也表现出良好的相关性。通过对东濮凹陷研究区近洼沙三段140余口井的录井统计分析,发现在一些页岩与油页岩发育层系,油气的显示作用比较活跃,而在一些页岩与油页岩发育零星层位,油气显示也比较微弱。如部5井3 350~3 410 m深度段(沙三下),页岩与油页岩发育,录井显示级别较高,主要为油斑或油迹,其下段3 410~3 510 m页岩与油页岩不发育,录井显示主要为荧光。进一步统计分析了114口井油气显示深度与页岩(油页岩)发育的深度关系,发现绝大部分油气层位于页岩集中发育段内部或者离页岩20 m的距离范围内。可见这些宏观数据及井的气录测信息表明,在这些层位的页岩和油页岩在一定程度上反映了油气的富集受宏观富有机质烃源岩的控制。

此外,烃源岩的生排烃特征与油藏的埋深也展示出一定的相关性。如前所述,烃源岩 $(S_1 + S_2)/TOC$ 的分析测试结果表明,咸化湖盆的生排烃门限要早于半咸水—淡水环境下的烃源岩生排烃门限。由于这种排烃门限的差异性,导致北部含盐区的油气层位、深度普遍浅于南部无盐区的油气分布层位,北部含盐区油藏的最浅深度为1 360~2 150 m,而南部无盐区油藏的最浅深度为2 575~2 950 m,北部比南部普遍要浅800~1 000 m。

3.2 常规油气藏成藏特征

3.2.1 有序分布

所谓有序分布,是指自构造高部位—低部位,原油的成熟度及充注期次具有有序分布的特征,可以北部

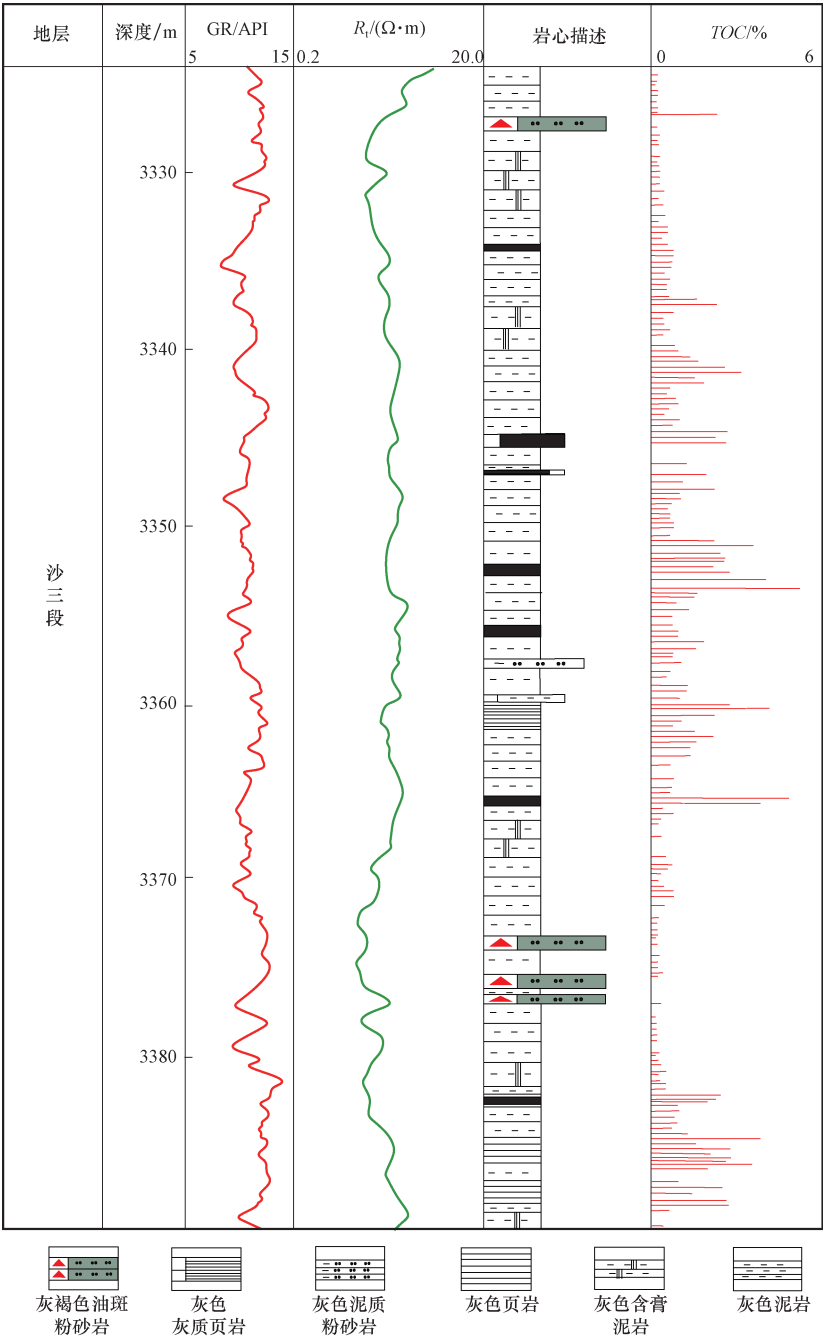


图 3 烃源岩的岩 - 电和地球化学特征(以东濮凹陷文 248 井沙三段为例)

Fig. 3 Rock-electric and geochemical characteristics of Paleogene Shahejie Formation source rocks in Dongpu Sag
(taking the Es³ from Well Wen248 as an example)

含盐文留地区的情况为例。如图 9,文留地区油气藏解剖发现,自构造浅层至深层,原油的物理性质具有明显变化,密度自 0.87 g/cm³ 逐渐过渡到 0.78 g/cm³,原油的气油比自 59 过渡到 13 518,油藏类型由黑油 - 挥发性油藏过渡为凝析气藏 - 低含凝析油的凝析气藏。油藏的地球化学性质也发生相应变化,自构造浅层至深层表现为原油成熟度逐渐增大,甲基苯指数 R_i 由 0.68% 过渡到 1.37%。包裹体荧光颜色由构造高部位的黄色荧光区,过渡为斜坡带的黄色和蓝白色混

合荧光区,直到洼陷带为蓝白色荧光区,也表明原油成熟度呈逐渐增大趋势。包裹体均一温度分析表明,构造浅层与烃类伴生的盐水包裹体均一温度低,主峰在 100 ~ 120 ℃,向斜坡带逐渐增大,至洼陷带很多地区,与烃类伴生的盐水包裹体均一温度主峰一般介于 150 ℃ 左右。结合埋藏史等信息表明,成藏期次具有逐渐变晚的趋势。综上证据表明,自构造高部位 - 低部位,原油的成熟度及充注期次具有有序分布的特征。

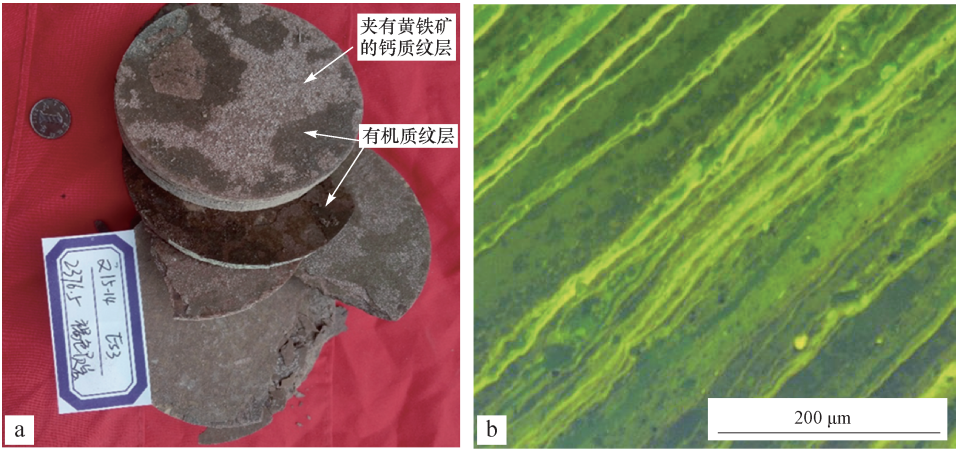


图4 东濮凹陷页岩两层结构发育特征(a)及其层状藻类体(b)

Fig. 4 Characteristics of double-layered structures (a) and lamalginites (b) in the Paleogene shale of Dongpu Sag

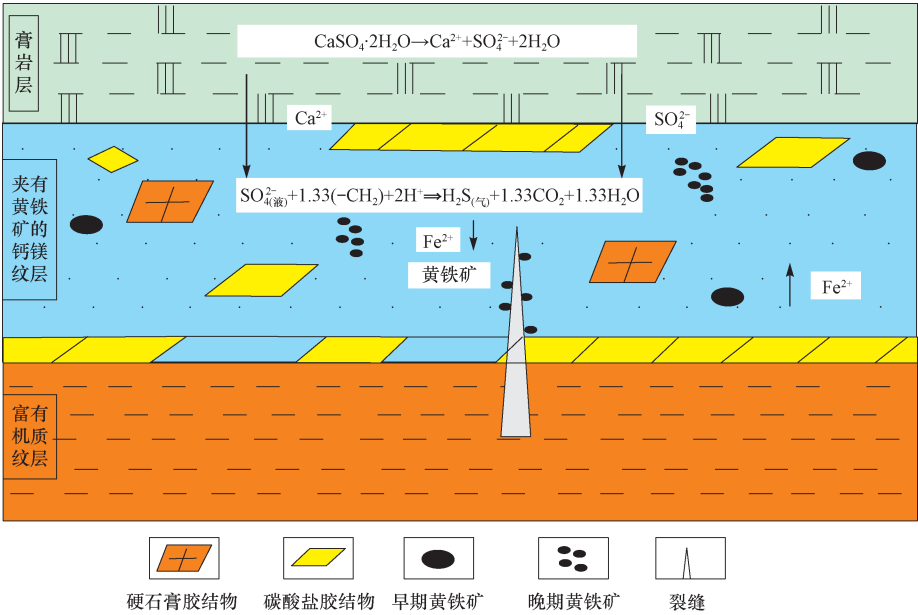


图5 东濮凹陷沙河街组优质页岩烃源岩“两层”结构形成模式

Fig. 5 Formation model of the double-layered structures in the high-quality shale source rocks in the Paleogene Shahejie Formation, Dongpu Sag

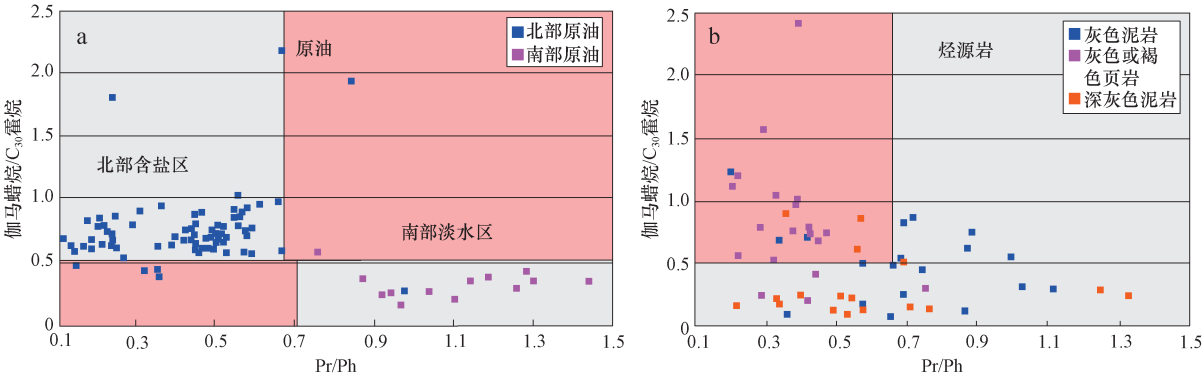
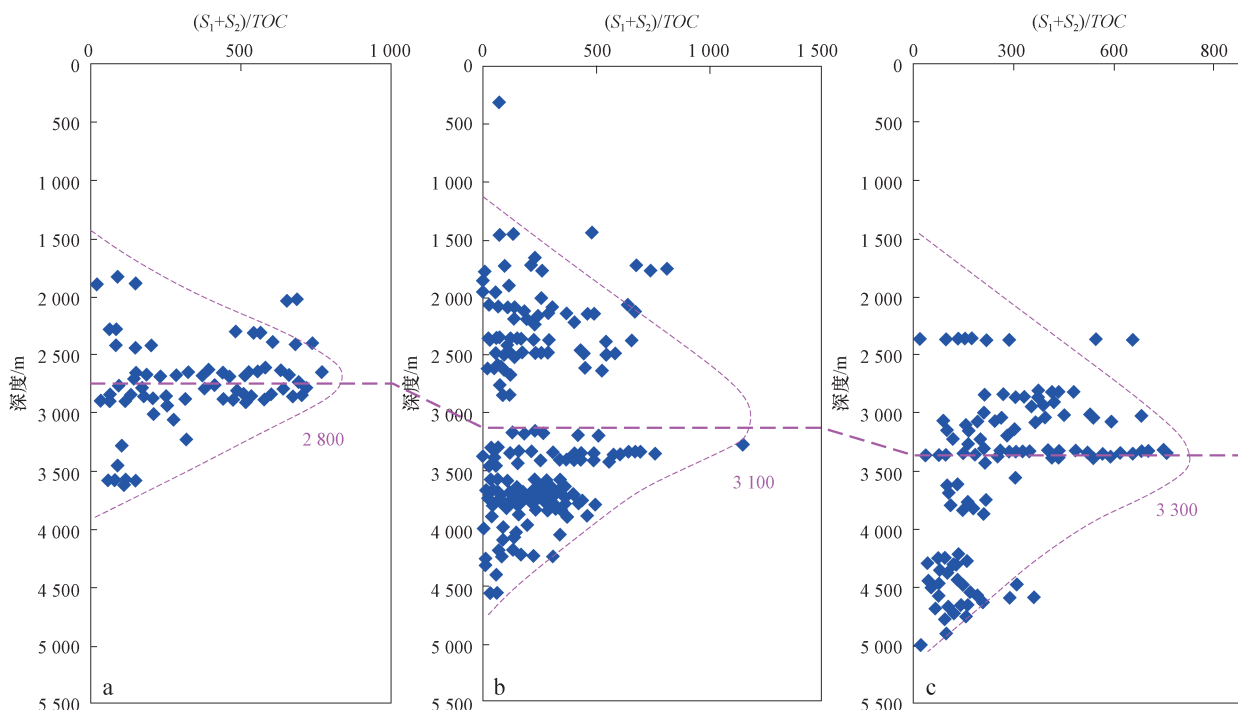


图6 东濮凹陷沙河街组烃源岩和原油典型生物标志物相关关系

Fig. 6 Correlations between source rocks and typical biomarkers of crude oils in the Paleogene Shahejie Formation, Dongpu Sag

a. 东濮凹陷南北油气差异性特征地化参数(104口井原油统计); b. 东濮凹陷不同类型烃源岩特征地化参数

图7 东濮凹陷不同地区沙河街组烃源岩 $(S_1 + S_2)/TOC$ 随深度变化Fig. 7 $(S_1 + S_2)/TOC$ vs. depth for Paleogene Shahejie Formation source rocks from different regions of the Dongpu Sag

a. 马寨地区; b. 柳屯地区; c. 海通集地区

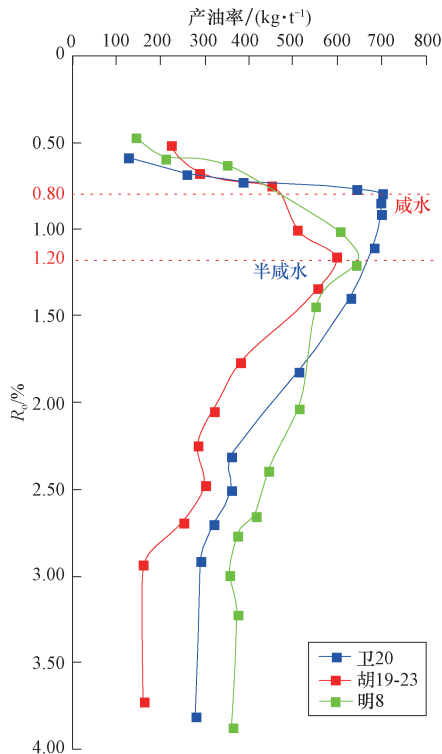


图8 东濮凹陷沙河街不同沉积环境烃源岩样品产油率随热演化变化特征

Fig. 8 Characteristics of oil productivity of source rocks changing with thermal evolution from Paleogene Shahejie Formation in various sedimentary settings of the Dongpu sag

3.2.2 差异富集

所谓差异富集,是指研究区的油气成藏可以分出4个区间:1 500 ~ 3 250, 3 250 ~ 3 750 m, 3 750 ~ 4 250, >4 250 m(深度)。这4个区间的油气成藏具有差异富集特征,与盐湖沉积环境的关系主要是表现在两方面,一是与盐湖相烃源岩的热演化程度有关,二是与盐湖相发育成盐高峰期沉积的膏盐岩有关。仍以北部含盐文留地区为例(图9)。第一是3 250 m深度常压与高压界面,界面之上为常压油藏,界面之下为高压油藏,此界面在文留地区为盐层发育段。第二是3 750 m深度处,为常规油气藏与致密油气藏的分界线,埋藏深度大于3 750m之后,储层的渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。第三个是4 250 m深度,这是致密油气藏与致密气藏的分界面,超过4 250 m深度之后油气相态类型主要为气藏,油气藏比较零星,这一深度对应的烃源岩热演化程度约为 $R_0 = 1.3\%$ 。这4个区间的油气藏特征存在差异,包括油气藏性质、成藏动力及油气富集特征等(图10)。

1 500 ~ 3 250 m 深度,常规常压油藏,浮力成藏,断砂输导、远距成藏、高点富集。

3 250 ~ 3 750 m 深度,常规高压油藏,浮力和超压成藏,高点富集。

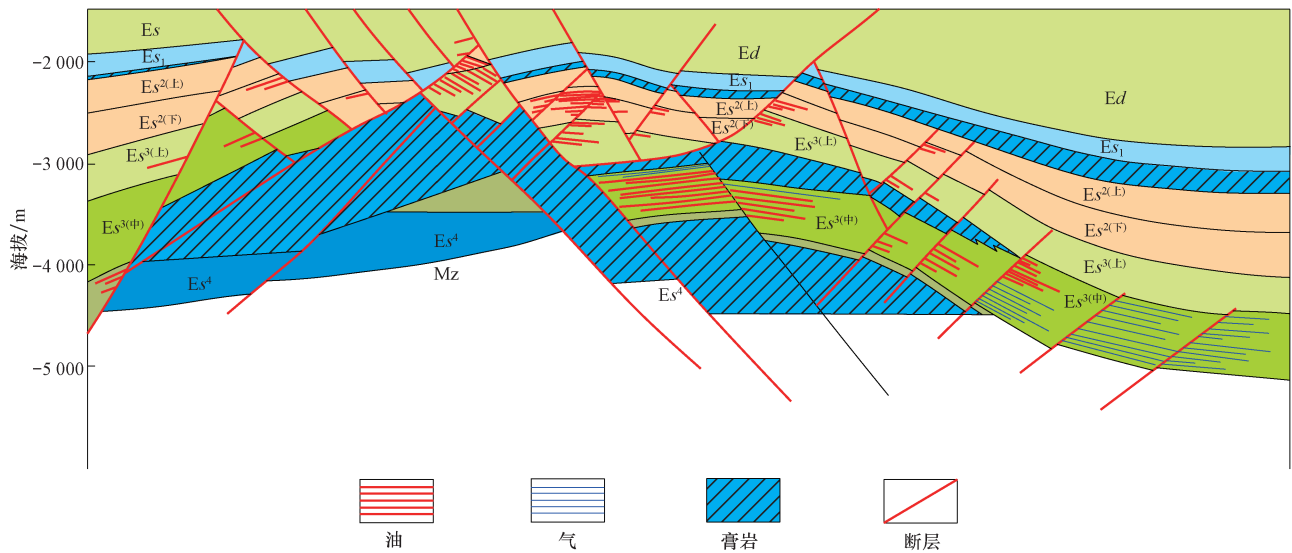


图 9 东濮凹陷沙河街文留地区油气“有序分布”成藏模式

Fig. 9 Accumulation model of oil and gas in “ordered distribution” in Wenliu area of the Dongpu Sag

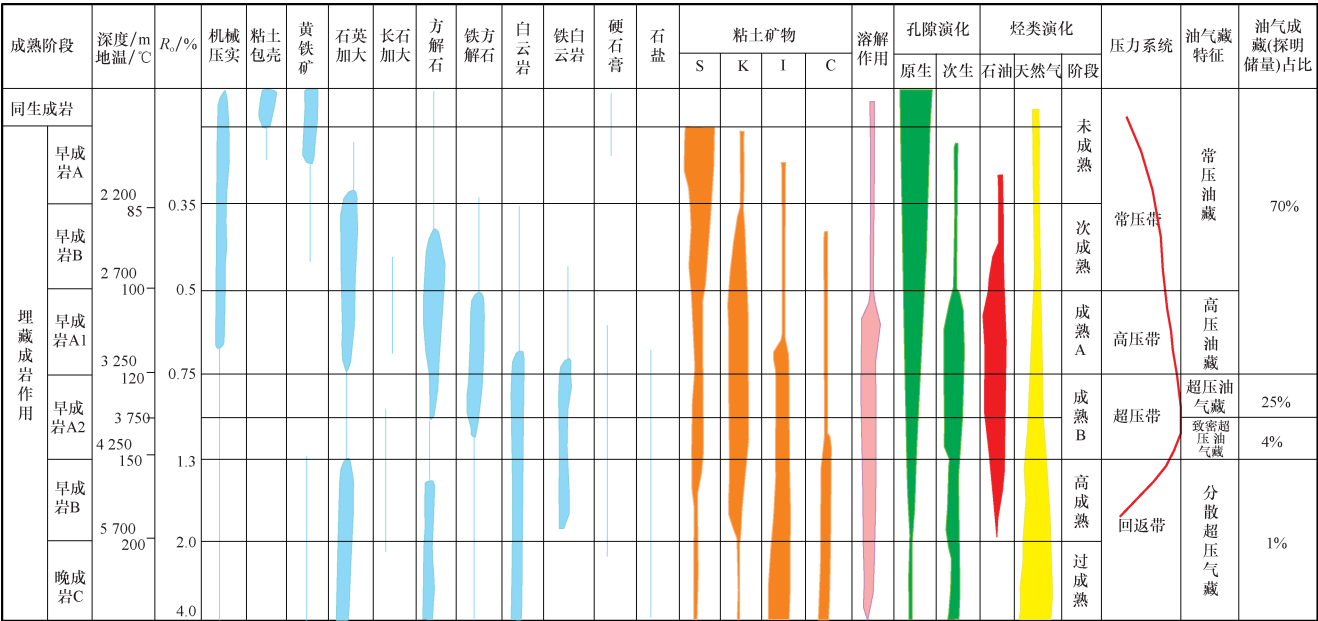


图 10 东濮凹陷油气藏“平面有序成藏,垂向差异富集”与成岩-成藏演化

Fig. 10 Reservoir distribution of “lateral hydrocarbon accumulation in order and vertical enrichment with differences” and its diagenesis-accumulation evolution in the Dongpu Sag

3 750 ~ 4 250 m 深度,致密高压油气藏,油气成藏的动力主要是源储压差,结果形成了大面积的致密凝析油气藏,紧邻富有机质烃源岩(油页岩、页岩)附近的储层甜点控藏,其中储层甜点离富有机质烃源岩 60 m 范围内最为有利。

大于 4 250 m,致密高压气藏,油气成藏的方式主要是天然气的扩散,结果形成了低丰度的大面积致密气藏,现有技术条件下无有效动用,是未来的潜在重要资源接替领域。

3.3 非常规油气藏成藏特征

21 世纪随油气勘探开发理论和技术的不断进步,对非常规油气藏越来越重视^[50-53]。在东濮凹陷研究区,主要的非常规油气藏类型包括泥页岩油气藏和致密油气藏^[53-55]。反映盐湖相烃源岩在有大量原油已排出的情况下,仍有相当规模的残留烃类,这可能是盐湖相油气聚集的一个基本特点,原因可能在于盐湖相烃源岩因富硫而生烃活化能低,所以早期易于生成

相对重质原油。这些原油当条件合适在源储压差的驱动下会向有利储层运移聚集,形成常规油气藏。但因为本身油质相对较重,所以仍会有原地的残留,形成非常规油气藏。这部分非常规原油的可采程度受复杂因素影响,包括生烃基础、存储空间、保存条件、储层改造条件、原油物性和开发方式等,是当前领域研究的热点与难点^[52]。

3.3.1 泥页岩油气藏

页岩油气系指赋存于富有机质泥页岩层系及其中的砂岩、碳酸盐薄夹层中的油气资源^[56-58],是21世纪重要的油气资源接替类型^[59-61]。前述分析表明,页岩是东濮凹陷北部含盐区常规油气藏的主要贡献者,因此理论而言,此处可以发育页岩油气藏。以濮深18-1井为证,该井在沙三上3258 m深度发生井喷,为高压油气藏,原油在20℃时的脱气原油密度为0.935 g/cm³,含蜡量为11.3%,表明原油油质重,没有发生远距离运聚。另外原油与相邻的泥页岩饱和烃色谱图具有很高的相似性,表明原油为泥页岩裂缝超压稠油油藏。

页岩油气藏得以形成的控制因素主要有三方面。首先,高丰度烃源岩是基础。濮深18-1井区沙三上

段泥页岩岩丰度高,TOC在1.0%~4.0%,平均为2.62%,这为形成页岩油气藏提供了物质基础。其次,有机质热演化程度控制富集。通过对濮深18-1井泥页岩裂缝油气藏的分析,可知该原油成熟度甲基菲指数为 R_o 为0.76%,对应着烃源岩 $R_o=0.8\%$ 的主力生烃高峰期(图8)。第三,超压是高产的关键。通过对东濮泥页岩油气藏的分析,其压力系数普遍高,大于1.5,濮深18-1井盐间泥岩油层的压力系数甚至高达2.2~2.3,为异常高压。超压发育特征分析发现,生烃增压是超压发育的一个重要因素^[62-63]。平面上压力系数的高低,将决定页岩油气藏是否高产^[64]。

据此,建立了研究区泥页岩裂缝油气藏的成藏模式(图11)。泥岩裂缝稠油油藏位于强超压顶界,即3200 m深度以下的泥页岩层中,当膏岩封闭层破裂时,油气可向上泄露运移。相比而言,稀油油藏则位于膏岩不发育层段,可沿断层向上运移形成次生油藏。

3.3.2 致密油气藏

致密油气藏具备两个关键标志和两个参数。两个关键标志之一是油气大面积连续分布、圈闭界限不明显,之二是无自然工业稳定产量、达西渗流不明显。两

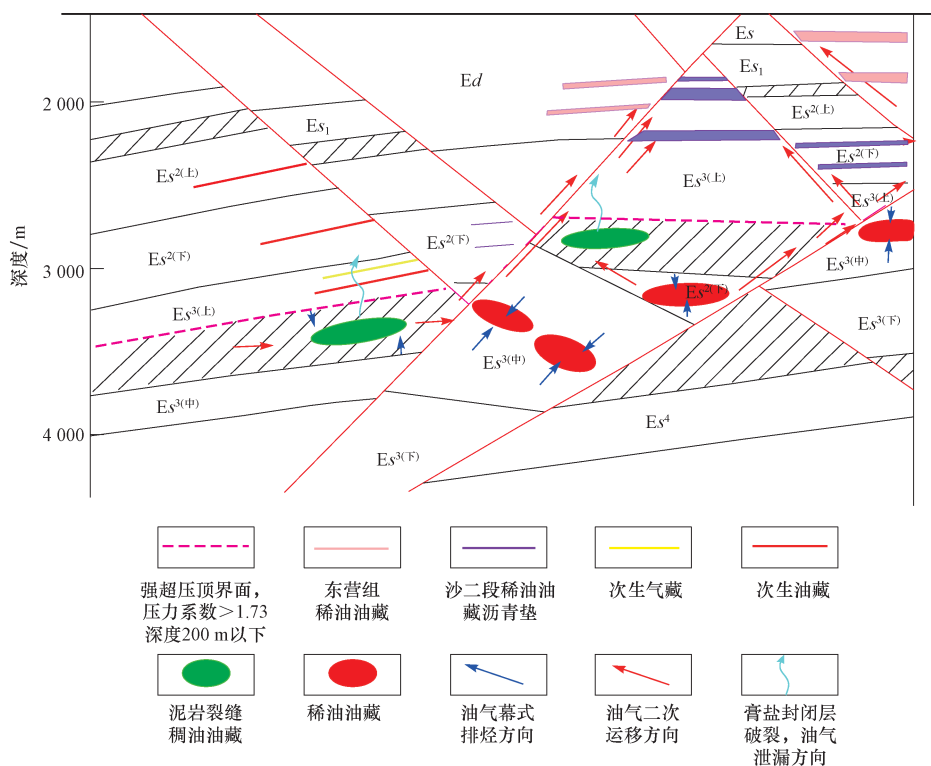


图11 东濮凹陷沙三上亚段盐间强超压泥页岩裂缝稠油油藏成藏模式

Fig. 11 Accumulation model of heavy oil reservoir in fractures within inter-salts of strong over-pressured shales of the Es^{3(L)}, Dongpu Sag

个关键参数之一是孔隙度小于10%,之二是渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (喉径 $<1 \mu\text{m}$)^[65]。据此标准对东濮凹陷的油气藏进行了梳理,发现研究区的确发育一些致密油气藏,其深度界限大致在3 750 m左右(图9)。进一步分析发现,致密油气藏的发育与烃源岩有机质丰度有紧密的关系,烃源岩TOC小于0.8%的圈闭14个,成功4个,钻探成功率28.6%;TOC大于0.8%的圈闭11个,钻探成功8个,钻探成功率72.7%。由此可见,烃源岩TOC是否大于0.8%是致密油气藏能否形成的一个基本关键参数。即只有烃源岩富有机质能产生足够数量油气,才有形成致密油气藏的可能。最终能否真正成藏富集还取决于许多复杂因素,如生烃基础、存储空间、保存条件、储层改造条件、原油物性和开发方式等^[52]。

在致密油气藏的勘探上,通过对研究区大量致密油气藏的统计,发现具有“深度”控效益特征,即研究区的致密油气藏当深度超过4 250 m之后,因储层过于致密,很难有井能够达到工业产能,可见深度对致密油气藏的富集具有重要控制作用。此外,砂体的规模及其储层质量也决定了油气藏是否高产及稳产。统计发现,在深层厚层砂体中发现的油气藏具有较好的稳定产能。以濮138-7井为例,该井位于濮城断层同沉积断层的下降盘,发育厚层浊积砂体,反映在致密油气藏的勘探中,应注意寻找有利于沉积厚层砂体的部位。

综上所述,东濮凹陷盐湖相区之所以油气藏丰度高,一个关键因素是发育了盐湖相富有机质页岩及深灰色泥岩烃源岩,因此在未来的勘探方向上应注重围绕富有机质烃源岩进行。油气成藏特征分析发现,在富有机质烃源岩发育地区,不仅要持续进行常规油气藏的勘探,也要注重页岩油气藏及致密油气藏的勘探。这些油气藏的选层本质上离不开富有机质烃源岩的发育。推广到东部具有相似地质背景的断陷盆地,在当前低油价形势和高勘探程度背景下,建议围绕富有机质烃源岩开展多种类型油气藏的勘探,注意页岩油气及致密油气。

4 结论

1) 渤海湾盆地东濮凹陷发育盐湖相富有机质烃源岩,其岩性以页岩为主,含部分深灰色泥岩,页岩普遍具有“两层”结构发育的特征,下层为有机质和粘土,上层为黄铁矿和方解石,生烃具有早生早排的特点。

2) 盐湖相油气成藏具有常规与非常规并存的特征,二者深度界线大致在3 750 m处。常规油气藏具有“有序分布、差异富集”的特征,非常规页岩和致密油气藏也与富有机质烃源岩关系密切。

3) 东部断陷盆地油气勘探当前在面临低油价和高程度的大背景下,建议进一步深化以“富有机质烃源岩”为核心的石油地质基础研究,围绕富有机质烃源岩展开多种类型油气藏的勘探,特别是页岩及致密等非常规油气类型。

参 考 文 献

- [1] 孙镇城,杨藩,张枝焕,等. 中国新生代咸化湖泊沉积环境与油气生成[M]. 北京:石油工业出版社,1997.
Sun Zhengcheng, Fang Fan, Zhang Zhihuan, et al. The sedimentary environment and oil and gas production of salt lakes in Cenozoic China[M] Beijing: Petroleum Science Press, 1997.
- [2] 郑绵平. 中国盐湖资源与生态环境[J]. 地质学报, 2010, 84(11): 1613-1622.
Zheng Mianping. Salt lake resources and eco-environment in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(11): 1613-1622.
- [3] Hammer U T. Saline lake ecosystem of the world[M]. Junk, Dordrecht, the Netherlands, 1986.
- [4] Zheng M P. Resources and eco-environmental protection of salt lakes in China[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 64(6): 1537-1546.
- [5] Mernagh T P, Bastrakov E N, Jaireth S, et al. A review of Australian salt lakes and associated mineral systems[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2016, 63(2): 1-27.
- [6] 金强,朱光有. 中国中新世咸化湖盆烃源岩沉积的问题及相关进展[J]. 高校地质学报, 2006, 12(4): 483-492.
Jin Qiang, Zhu Guangyou. Progress in research of deposition of oil source rocks in saline lakes and their hydrocarbon generation[J]. Geological Journal of China Universities, 2006, 12(4): 483-492.
- [7] 金强,朱光有,王娟. 咸化湖盆优质烃源岩的形成与分布[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008, 32(4): 19-23.
Jin Qiang, Zhu Guangyou, Wang Juan. Deposition and distribution of high-potential source rocks in saline lacustrine environments[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(4): 19-23.
- [8] Warren J K. Evaporites: A geological compendium [M]. Berlin: Springer, 2016.
- [9] 张林晔,徐兴友,刘庆,等. 济阳拗陷古近系深层成烃与成藏[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(5): 530-537.
Zhang Linye, Xu Xingyou, Liu Qing, et al. Hydrocarbon formation and accumulation of the deep Palaeogene of the Jiyang Depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(5): 530-537.
- [10] 张云献,刘海燕,巩卫芳,等. 东濮凹陷北部芳烃色谱-质谱分析及石油地质应用[J]. 断块油气田, 2012, 19(6): 727-731.
Zhang Yunxian, Liu Haiyan, Gong Weifang, et al. GC-MS analysis of

- aromatic hydrocarbon and its application in petroleum geology in north area of Dongpu Depression[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2012, 19(6): 727–731.
- [11] 谈玉明, 蒋有录, 赵利杰, 等. 东濮凹陷北部地区油气相态演化主控因素及充注模式[J]. *石油实验地质*, 2015(1): 28–34.
- Tan Yuming, Jiang Youlu, Zhao Lijie, et al. Main controlling factors of phase evolution and charging pattern of hydrocarbons in northern Dongpu Sag[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2015(1): 28–34.
- [12] 张永生, 杨玉卿, 漆智先, 等. 江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组含盐岩系沉积特征与沉积环境[J]. *古地理学报*, 2003, 5(1): 29–35.
- Zhang Yongsheng, Yang Yuqing, Qi Zhixian, et al. Sedimentary characteristics and environments of the salt-bearing series of Qianjiang Formation of the Paleogene in Qianjiang Sag of Jiangnan Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2003, 5(1): 29–35.
- [13] 王必金, 林畅松, 陈莹, 等. 江汉盆地幕式构造运动及其演化特征[J]. *石油地球物理勘探*, 2006, 41(2): 226–230.
- Wang Bijin, Lin Changsong, Chen Ying, et al. Episodic tectonic movement and evolutionary character in Jiangnan Basin[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2006, 41(2): 226–230.
- [14] Feng J L, Cao J, Hu K, et al. Dissolution and its impacts on reservoir formation in moderately to deeply buried strata of mixed siliciclastic-carbonate sediments, northwestern Qaidam Basin, northwest China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 39: 124–137.
- [15] Wang T T, Yang S Y, Duan S S, et al. Multi-stage primary and secondary hydrocarbon migration and accumulation in lacustrine Jurassic petroleum systems in the northern Qaidam Basin, NW China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 62: 90–101.
- [16] 曹剑, 雷德文, 李玉文, 等. 古老碱湖优质烃源岩: 准噶尔盆地二叠统风城组[J]. *石油学报*, 2015, 36(7): 781–790.
- Cao Jian, Lei Dewen, Li Yuwen, et al. Ancient high-quality alkaline lacustrine source rocks discovered in the Lower Permian Fengcheng Formation, Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(7): 781–790.
- [17] И Б Висожики. 天然气地质学[M]. 戴金星, 吴少华译. 北京: 地质出版社, 1975.
- И Б Висожики. *Natural gas geology*[M]. Translated by Dai Jinxing and Wu Shaohua. Beijing: Geological Publishing House, 1975.
- [18] Kirkland D W, Evans R. Source-rock potential of evaporitic environment[J]. *AAPG Bulletin*, 1980, 65(2): 733–733.
- [19] Manzi V, Lugli S, Lucchi F R, et al. Deep-water clastic evaporites deposition in the Messinian Adriatic foredeep (northern Apennines, Italy): did the Mediterranean ever dry out? [J]. *Sedimentology*, 2005, 52(4): 875–902.
- [20] 高红灿, 郑荣才, 肖应凯, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷古近系沙河街组盐岩成因——来自沉积学和地球化学的证据[J]. *石油学报*, 2015, 36(1): 19–32.
- Gao Hongcan, Zheng Rongcai, Xiao Yinggai, et al. Origin of the salt rock of Paleogene Shahejie Formation in Dongpu sag, Bohai Bay Basin: evidences from sedimentology and geochemistry[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(1): 19–32.
- [21] Volozh Y, Talbot C, Ismail-Zadeh A. Salt structures and hydrocarbons in the Pricaspian Basin[J]. *AAPG Bulletin*, 2003, 87(2): 313–334.
- [22] 吴海, 赵孟军, 卓勤功, 等. 膏盐岩对地层温度及烃源岩热演化的影响定量分析——以塔里木库车前陆盆地为例[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(4): 550–558.
- Wu Hai, Zhao Mengjun, Zhuo Qingong, et al. Quantitative analysis of the effect of salt on geothermal temperature and source rock evolution: A case study of Kuqa foreland basin, Western China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(4): 550–558.
- [23] Feng J L, Cao J, Hu K, Peng XQ, et al. Dissolution and its impacts on reservoir formation in moderately to deeply buried strata of mixed siliciclastic-carbonate sediments, northwestern Qaidam Basin, northwest China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 39: 124–137.
- [24] 李双建, 孙冬胜, 郑孟林, 等. 四川盆地寒武系盐相关构造及其控油气作用[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(5): 622–631.
- Li Shuangjian, Sun Dongsheng, Zheng Menglin, et al. Salt-related structure and its control on hydrocarbon of the Cambrian in Sichuan Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 2014, 35(5): 622–631.
- [25] Klemme H D and Ulmsiek G F. Effective petroleum source rocks of the world: Stratigraphic distribution and controlling depositional factors[J]. *AAPG Bulletin*, 1991, 75(12): 1809–1851.
- [26] 冷济高, 刘晓峰, 庞雄奇, 等. 盐间泥岩裂缝超压油气藏成藏作用——以东濮凹陷文留构造为例[J]. *石油勘探与开发*, 2006, 33(6): 692–696.
- Leng Jigao, Liu Xiaofeng, Pang Xiongqi, et al. Overpressured fractured mudstone reservoir in salt-mud interbed—A case from Wenliu structure in Dongpu Sag[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(6): 692–696.
- [27] 张磊, 向才富, 董月霞, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷异常压力系统及其形成机理[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(4): 664–675.
- Zhang Lei, Xiang Caifu, Dong Yuexia, et al. Abnormal pressure system and its origin in the Nanpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(4): 664–675.
- [28] 刘晓峰, 解习农. 与盐构造相关的流体流动和油气运聚[J]. *地学前缘*, 2001, 8(4): 343–349.
- Liu Xiaofeng, Xi Jienong. Fluid flow, hydrocarbon migration and accumulation associated with salt tectonics[J]. *Earth Science Frontiers*, 2001, 8(4): 343–349.
- [29] 徐田武, 张光斌, 张琛琛, 等. 东濮凹陷马厂油田断裂内部结构特征对油气成藏的意义[J]. *断块油气田*, 2012, 19(6): 692–695.
- Xu Tianwu, Zhang Guangbin, Zhang Chenchen, et al. Effect of internal structure characteristics of fracture on hydrocarbon accumulation in Machang Oilfield of Dongpu Depression[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2012, 19(6): 692–695.
- [30] 张洪安, 徐田武, 张云献. 东濮凹陷咸化湖盆优质烃源岩的发育特征及意义[J]. *断块油气田*, 2017, 24(4): 437–441.
- Zhang Hongan, Xu Tianwu, Zhang Yunxian. Development characteristics of high-quality hydrocarbon source rocks in the saline-saturated lake basin of Dongpu Depression[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2017, 24(4): 437–441.

- tics and significance of high quality source rocks of salty lake in Dongpu Depression [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2017, 24(4):437–441.
- [31] 谈玉明,程秀申,陈书平,等. 东濮凹陷复杂断块群及勘探潜力分析[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(4):584–592.
- Tan Yuming, Cheng Xiushen, Chen Shuping, et al. Complex fault-block groups in Dongpu Sag and their exploration potential[J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(4):584–592.
- [32] 唐令,庞雄奇,徐田武,等. 东濮凹陷古近系沙河街组烃源岩生烃底限及其差异探讨[J]. *天然气工业*, 2017, 37(2):26–37.
- Tang Ling, Pang Xiongqi, Xu Tianwu, et al. Hydrocarbon generation thresholds of Paleogene Shahejie Fm source rocks and their north-south differences in the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(2):26–37.
- [33] 卢双舫,马延伶,曹瑞成,等. 优质烃源岩评价标准及其应用:以海拉尔盆地乌尔逊凹陷为例[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2012, 37(3):535–544.
- Lu Shuangfang, Ma Yanling, Cao Ruicheng, et al. Evaluation criteria of high-quality source rocks and its applications: Taking the Wuerxun sag in Hailaer Basin as an example[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37(3):535–544.
- [34] 黄第藩,李晋超. 中国陆相油气生成[M]. 北京:石油工业出版社, 1982:68–188.
- Huang Difan, Li Jinchao. Formation of Terrigenous Oil and Gas in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1982:68–188.
- [35] Stein R, Rullkötter J, Welte D H. Accumulation of organic-carbon rich sediments in the late Jurassic and Cretaceous Atlantic Ocean: A synthesis[J]. *Chemistry Geology*, 1986, 56(1–2):1–32.
- [36] 杜宏宇,王鸿雁,徐宗谦. 马朗凹陷芦草沟组烃源岩地化特征[J]. *新疆石油地质*, 2003, 24(4):302–305.
- Du Hongyu, Wang Hongyan, Xu zongqian. Geochemical characteristics of Lucaogou source rock in Malang Sag, Santanghu Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2003, 24(4):302–305.
- [37] 江继纲,彭平安,傅家谟. 盐湖油气的形成、演化和运移聚集[M]. 广州:广东科技出版社, 2004.
- Jiang Jigang, Peng Pingan, Fu Jiamo. Generation, migration and accumulation of oil and gases in hypersaline lacustrine basin[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2004.
- [38] 包建平,马安来,李贤庆. 盐湖盆地未熟—低熟油地球化学研究[M]. 北京:地质出版社, 2006.
- Bao Jianping, Ma Anlai, Li Xianqing. The geochemistry research of immature oils in salt basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.
- [39] 杜海峰,于兴河,陈发亮. 河南省东濮凹陷古近系沙河街组沙三段盐岩沉积特征及其石油地质意义[J]. *古地理学报*, 2008, 10(1):53–62.
- Du Haifeng, Yu Xinghe, Chen Faliang. Sedimentary characteristics of saltrocks and their petroleum geologic significance of the Member 3 of Shahejie Formation of Paleogene in Dongpu Sag, Henan Province [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10(1):53–62.
- [40] 秦建中. 中国烃源岩[M]. 北京:科学出版社, 2005:32–33.
- Qin Jianzhong. Chinese source rocks [M]. Beijing: Science Press, 2005:32–33.
- [41] 刘传联,徐金鲤,汪品先. 藻类勃发——湖相油源岩形成的一种重要机制[J]. *地质论评*, 2001, 47(2):207–210.
- Liu Chuanlian, Xu Jinli, Wang Pingxian. Algal blooms: the primary mechanism in the formation of lacustrine petroleum source rocks[J]. *Geological Review*, 2001, 47(2):207–210.
- [42] Cao J, Hu K, Zhou J, et al. Organic clots and their differential accumulation of Ni and Mo within early Cambrian black-shale-hosted polymetallic Ni-Mo deposits, Zunyi, South China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 62:531–536.
- [43] Hatch J R, Leventhal J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U. S. A [J]. *Chemical Geology*, 1992, 99(1–3):65–82.
- [44] Cao J, Wu M, Chen Y, et al. Trace and rare earth element geochemistry of Jurassic mudstones in the northern Qaidam Basin, northwest China[J]. *Chemie der Erde - Geochemistry*, 2012, 72(3):245–252.
- [45] Yang R F, Cao J, Hu G, et al. Marine to brackish depositional environments of the Jurassic-Cretaceous Suowa Formation, Qiangtang Basin (Tibet), China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 473:41–56.
- [46] 杨华,张文正. 论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用:地质地球化学特征[J]. *地球化学*, 2005, 34(2):147–154.
- Yang Hua, Zhang Wenzheng. Leading effect of the Seventh Member high-quality source rock of Yanchang Formation in Ordos Basin during the enrichment of low-penetrating oil-gas accumulation: Geology and geochemistry[J]. *Geochimica*, 2005, 34(2):147–154.
- [47] Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. The Biomarker Guide: Volume 2, Biomarkers and isotopes in petroleum systems and earth history [M]. New York: Cambridge University Press, 2005.
- [48] Tissot B, Welte D H. Petroleum formation and occurrence, 2nd ed [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1984.
- [49] 刘会平,张在龙,籍志凯,等. 无机盐类对天然矿物低温催化混合酯生烃反应的影响[J]. *沉积学报*, 2008, 26(5):886–890.
- Liu Huiping, Zhang Zailong, Ji Zhikai, et al. Effects of Inorganic salts on the hydrocarbon generation of mixed ester catalyzed by natural minerals at low temperature[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(5):886–890.
- [50] 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.

- [51] Aguilera R F. Production costs of global conventional and unconventional petroleum[J]. *Energy Policy*, 2014, 64(5): 134–140.
- [52] 李吉君, 史颖琳, 章新文, 等. 页岩油富集可采主控因素分析: 以泌阳凹陷为例[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2014, 39(7): 848–857.
- Li Jijun, Shi Yinglin, Zhang Xinwen, et al. Control factors of enrichment and producibility of shale oil: A case study of Biyang depression [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2014, 39(7): 848–857.
- [53] 康玉柱, 周磊. 中国非常规油气的战略思考[J]. *地学前缘*, 2016, 23(2): 1–7.
- Kang Yuzhu, Zhou Lei. The strategic thinking of unconventional petroleum and gas in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(2): 1–7.
- [54] 李忠, 寿建峰, 王生朗. 东濮凹陷砂岩储层成岩作用及其对高压致密气藏的制约[J]. *地质科学*, 2000, 35(1): 96–104.
- Li Zhong, Shou Jianfeng, Wang Shenglang. Diagenesis of sandstone reservoirs: constraints on high-pressure tight gas deposits in Dongpu Depression, north China [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 2000, 35(1): 96–104.
- [55] 王文广, 郑民, 王民, 等. 页岩油可动资源量评价方法探讨及在东濮凹陷北部古近系沙河街组应用[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(4): 771–781.
- Wang Wenguang, Zheng Min, Wang Min, et al. The discussion of the evaluation method of shale oil movable resources amount and Palaeogene Shahejie Formation application effect in the northern of Dongpu Depression[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(4): 771–781.
- [56] 卢双舫, 黄文彪, 陈方文, 等. 页岩油气资源分级评价标准探讨[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(2): 249–256.
- Lu Shuangfang, Huang Wenbiao, Chen Fangwen, et al. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources: Discussion and application [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(2): 249–256.
- [57] Aguilera R F, Radetzki M. Shale gas and oil: Fundamentally changing global energy markets [J]. *Oil and Gas Journal*, 2013, 111(12): 54.
- [58] Kyung J L, George J M, Christine A E E. Compositional simulation of hydrocarbon recovery from oil shale reservoirs with diverse initial saturations of fluid phases by various thermal processes [J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2017, 35(2): 172–193.
- [59] Gorsline D S. A review of fine-grained sediment origins, characteristics, transport and deposition [C] // Stow D A V, Piper D J W. *Fine-grained Sediments* [M]. The Geological Society Special Publication, 1984, 15: 17–34.
- [60] Zhang C C, Dong D Z, Wang, Y M, et al. Brittleness evaluation of the Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi shale in Southern Sichuan Basin, China [J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2017, 35(4): 430–443.
- [61] 康玉柱. 中国非常规页岩油气藏特征及勘探前景展望[J]. *天然气工业*, 2012, 32(4): 1–5.
- Kang Yuzhu. Characteristics and exploration prospect of unconventional shale gas reservoirs in China [J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(4): 1–5.
- [62] 郝芳, 董伟良. 沉积盆地超压系统演化、流体流动与成藏机理[J]. *地球科学进展*, 2001, 16(1): 79–85.
- Hao Fang, Dong Weiliang. Evolution of fluid flow and petroleum accumulation in overpressured systems in sedimentary basins [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(1): 79–85.
- [63] 孙波, 蒋有录, 石小虎, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷压力演化与超压形成机制[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(2): 28–35.
- Sun Bo, Jiang Youlu, Shi Xiaohu, et al. Pressure evolution and formation mechanism of overpressure in Dongpu depression, Bohaiwan Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2013, 37(2): 28–35.
- [64] 杨华, 李士祥, 刘显阳. 鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J]. *石油学报*, 2013, 34(1): 1–11.
- Yang Hua, Li Shixiang, Liu Xianyang. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(1): 1–11.
- [65] 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步[J]. *地质学报*, 2015, 89(6): 979–1007.
- Zou Caineng, Yang Zhi, Zhu Rukai, et al. Progress in China's unconventional oil and gas exploration and development and theoretical technologies [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(6): 979–1007.

(编辑 董立)