

文章编号:1009-9603(2018)01-0021-09

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2018.01.004

莱州湾凹陷东北洼沙河街组致密油 地质特征及形成条件

黄颖,官大勇,赵国祥,朱勇超,任云鹏

(中海石油(中国)有限公司天津分公司 渤海石油研究院,天津 300452)

摘要:渤海海域沙河街组具有发育致密油的潜力。基于钻井、测井、录井和地震资料,综合岩心观察、岩石薄片鉴定、地球化学及储层物性等分析数据对渤海海域莱州湾凹陷东北洼沙河街组致密油的地质特征及形成条件进行研究。结果表明,莱州湾凹陷东北洼具备发育致密油的地质条件,其油气主要富集于与优质烃源岩共生或对接的大面积分布的有效储集体中。区域内广泛分布的沙三段半深湖-深湖相灰黑色泥岩形成Ⅱ₁型干酪根,为研究区致密油形成提供了充足的油源;沙河街组大面积快速堆积的三角洲储集砂体为致密油形成提供了有利的储集空间;优质烃源岩与大面积厚层储集体之间交互沉积形成良好的源储共生关系,为近源成藏提供了有利的配置条件;成藏期异常压力为致密油形成提供了充注动力。

关键词:致密油 控制因素 沙河街组 储层 莱州湾凹陷

中图分类号:TE112.1

文献标识码:A

Geological characteristics of tight oil in the Shahejie Formation in northeast subsag of Laizhou Bay Sag and its formation condition

HUANG Ying, GUAN Dayong, ZHAO Guoxiang, ZHU Yongchao, REN Yunpeng

(Bohai Oilfield Research Institute, Tianjin Branch Company, CNOOC (China) Ltd., Tianjin City, 300452, China)

Abstract: There are potential for tight oil in the Shahejie Formation in Bohai Sea area. Geological characteristics and forming conditions of tight oil were researched in the Shahejie Formation in northeastern subsag of Laizhou Bay Sag, which is based on the well drilling, well logging, geological log and seismic data and combined with the core observation, thin section analysis and a lot of laboratory analysis data about geochemical and reservoir physical property. The research results show that there are geological conditions for tight oil in northeastern subsag of Laizhou Bay Sag, where oil and gas mainly accumulate in the widespread effective reservoirs that are interbedded or contacted with high-quality hydrocarbon source rocks. Dark gray mudstone, deposited in semi-deep and deep lacustrine facies with II₁ type kerogen, distributes widely in the third member of Shahejie Formation, which provides sufficient oil source supply for tight oil formation. Large-scale rapidly deposited delta sand bodies in the Shahejie Formation provide storage space for tight oil accumulation. Alternatively-deposited layers of high-quality hydrocarbon source rocks and large thick good reservoir result in a good relationship between source and reservoir, which provides benefit configuration conditions for near-source hydrocarbon accumulation. Abnormal pressure provides driving force for charging during the hydrocarbon accumulation period for tight oil formation.

Key words: tight oil; controlling factor; Shahejie Formation; reservoir; Laizhou Bay Sag

油气勘探开发领域从常规油气向非常规油气跨越,是石油工业发展的必然趋势^[1-3]。非常规油气如页岩气、油砂、油页岩在油气储量及产量中所占比例日益提高,成为近几年油气勘探的热门领域,

收稿日期:2017-10-14。

作者简介:黄颖(1987—),女,新疆乌鲁木齐人,工程师,硕士,从事油气储层地质与成藏研究。联系电话:18202613744, E-mail: huangying11@cnooc.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项“近海大中型油气田形成条件与分布——渤海海域大中型油气田地质特征”(2011ZX05023-006-002)。

致密油已经成为非常规油气勘探的另一热点,国外的巴肯、鹰滩页岩区带借助水平井及压裂技术已经实现大规模开发^[4-5],而目前中国对于致密油的研究大多针对中西部地区,例如在鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地、四川盆地及柴达木盆地均已发现致密油资源^[6-9]。

关于致密油的定义目前还存在分歧,有学者认为存在广义与狭义之分^[1,10-12]。但所有学者均认为致密油应具有3个方面的特征:①油气未经过长距离运移或原地成藏,与生油岩层系共生并在致密储层聚集是致密油区别于其他低孔、低渗透油藏的关键。②储层应以致密储层为主,但对其渗透率下限仍存在争议,目前多以覆压基质渗透率小于0.2 mD作为标准^[5,9-10,13]。③油品性质较好,具备形成工业油流的条件。

虽然有学者认为渤海湾盆地具备形成致密油的地质条件,但研究多以周边陆上油田为主^[14-15],针对海域的相关研究少有报道。渤海海域沙河街组沉积时期的构造演化表现为典型的断陷期向拗陷期转化,这样的构造背景使该区具有发育广泛烃源岩和储层的地质条件,且与烃源岩相邻的储层具备形成致密油的潜力。前人分析认为莱州湾凹陷东北洼沙河街组发育低孔、低渗透油藏^[16],但笔者研究认为其可能发育致密油。为此,以莱州湾凹陷东北洼沙河街组作为研究对象,综合测井、录井、岩石薄片鉴定、地球化学分析及物性分析等系统的盆地勘探资料,探讨致密油形成的烃源岩条件、储盖组合以及源储共生关系,证实研究区沙河街组具有发育致密油的地质条件,研究成果可以为今后渤海海域致密油的勘探提供借鉴。

1 区域地质概况

莱州湾凹陷位于渤海海域东南部,其南、北分别与淮北凸起和莱北低凸起相邻,为中生界基底上形成的新生界次级凹陷,平面上可进一步划分为北部陡坡带、中央构造带、北洼、南洼、东北洼、东西两侧走滑带等9个次级构造单元(图1)。莱州湾凹陷东北洼目前钻井揭示其新生界发育古近系沙三段、沙二段、沙一段、东三段、东二段下亚段,新近系馆陶组、明化镇组以及第四系平原组。前人将莱州湾凹陷新生代构造演化分为3个阶段:①沙三段沉积时期的断陷作用阶段。沙三段沉积时期,莱州湾凹陷处于快速沉降期转换为快速断陷期,这也使得凹陷内沙三段成为研究区最重要的烃源岩发育层

段。②沙二段—东营组沉积时期的断拗作用阶段。从沙二段沉积时期开始,莱州湾凹陷与周边凸起形成同期广覆沉降,但断陷活动仍然对凹陷的沉积起到一定的控制作用,断拗转化使得区域内沙二段和沙一段烃源岩与储层同时发育。③自馆陶组沉积时期以来的晚期活化阶段。该时期断层活动明显减弱,地层沉积厚度整体表现为向北、向西至渤海海域中心区逐渐变厚的广覆式沉积^[17-19]。

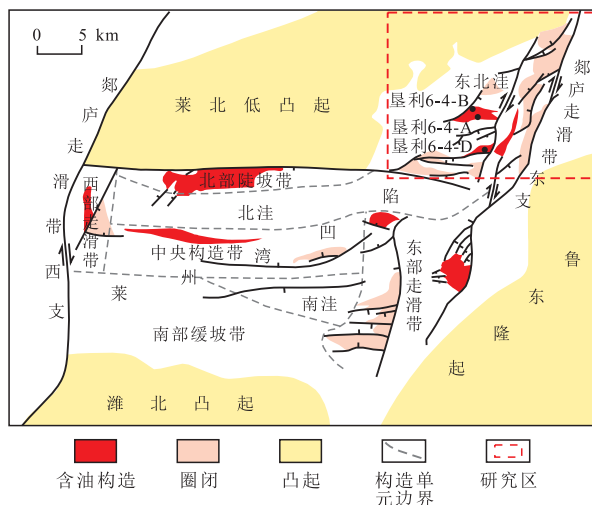


图1 莱州湾凹陷区域构造位置

Fig.1 Structural location of research area in Laizhou Bay Sag

2 致密油地质特征

2.1 储集特征

岩石薄片鉴定结果表明,莱州湾凹陷东北洼沙河街组砂岩整体以富含长石为主,其砂岩类型包括长石砂岩、岩屑长石砂岩、长石岩屑砂岩等,且不同层系砂岩类型存在一定差异。其中沙三段长石砂岩和岩屑长石砂岩所占比例相等,长石含量为15%~40%,钾长石含量较高,多为20%~25%,长石颗粒表面多泥化或绢云母化;而沙二段和沙一段以岩屑长石砂岩为主,长石含量为20%~40%,颗粒表面多泥化或绢云母化,铁白云石和结晶高岭石分布普遍,是沙二段和沙一段主要的填隙物,局部可见方解石、铁方解石、菱铁矿和石英次生加大富集段。扫描电镜观察结果表明,粒间胶结物主要为蠕虫状高岭石、自生石英和碳酸盐矿物,以及少量片状伊利石,自生高岭石、次生加大石英和碳酸盐矿物堵塞粒间孔隙和喉道,并充填粒间孔隙。研究区沙三段主要以中砂岩为主,而沙二段和沙一段则以中砂岩和细砂岩为主;整体颗粒分选差—中等,磨圆度中等,呈次棱角—次圆状,颗粒间接触关系主要为线—凹凸接触。

综合分析岩心薄片、铸体薄片及扫描电镜观察结果认为,研究区沙河街组储集空间类型以次生孔隙为主,发育少量原生孔隙。易溶组分的存在导致溶蚀现象非常普遍,储集空间以溶蚀孔隙为主,包括粒间孔隙、溶蚀粒间孔隙、溶蚀粒内孔隙、溶蚀充填物内孔隙等,以溶蚀粒间孔隙、溶蚀粒内孔隙为主。扫描电镜下可见大量微米—纳米级孔隙,孔喉普遍细小,孔径大多小于1 000 nm,孔隙类型主要以长石、岩屑等形成的溶蚀粒间孔隙和溶蚀粒内孔隙为主,以及少量微裂缝和粘土矿物形成的晶间孔^[20]。

2.2 流体特征

油品性质是评价致密油的重要指标之一。在致密储层中,烃类流体的地下流动情况是获得工业油流的必要条件^[1],因此致密油多以轻质油为主。邹才能等认为致密油的特征是储层内原油密度小于 0.8251 g/cm^3 ,流动性较好^[1,11]。莱州湾凹陷沙河街组储集体紧邻优质烃源岩,油源条件优越,其原油性质整体较好,具有密度低、粘度低、含硫量低及

可流动性强的特征。研究区沙三段地面原油密度为 0.8394 g/cm^3 ,地层原油密度为 0.8173 g/cm^3 ,初馏点为 $86\text{ }^\circ\text{C}$,凝固点为 $29\text{ }^\circ\text{C}$,含硫量为 0.108% ,含蜡量为 24.02% ,酸值为 0.42 mgKOH/g ;沙二段和沙一段地面原油密度为 0.8929 g/cm^3 ,地层原油密度为 0.8722 g/cm^3 ,初馏点为 $139\text{ }^\circ\text{C}$,凝固点为 $40\text{ }^\circ\text{C}$,含硫量为 0.475% ,含蜡量为 29.65% ,酸值为 0.09 mg-KOH/g 。根据中国海洋石油总公司油气层、油气(藏)田及油气性质分类规范^[21],研究区沙三段原油为轻质油,沙二段和沙一段原油属于中质油。原油色谱-质谱和生物标志化合物参数分析结果(图2)显示,研究区沙河街组原油样品与周围地区沙三段烃源岩具有很好的可对比性,表明其原油来自附近沙三段烃源岩,具有近源成藏的特征。此外,研究区沙河街组原油总离子流及原油样品整体酸值均较低,表明其原油成熟度较低,保存条件良好,未遭受明显的生物降解等次生改造作用,且根据低成熟度及高含蜡量推测其原油整体为近源成藏,未经历长距离运移。

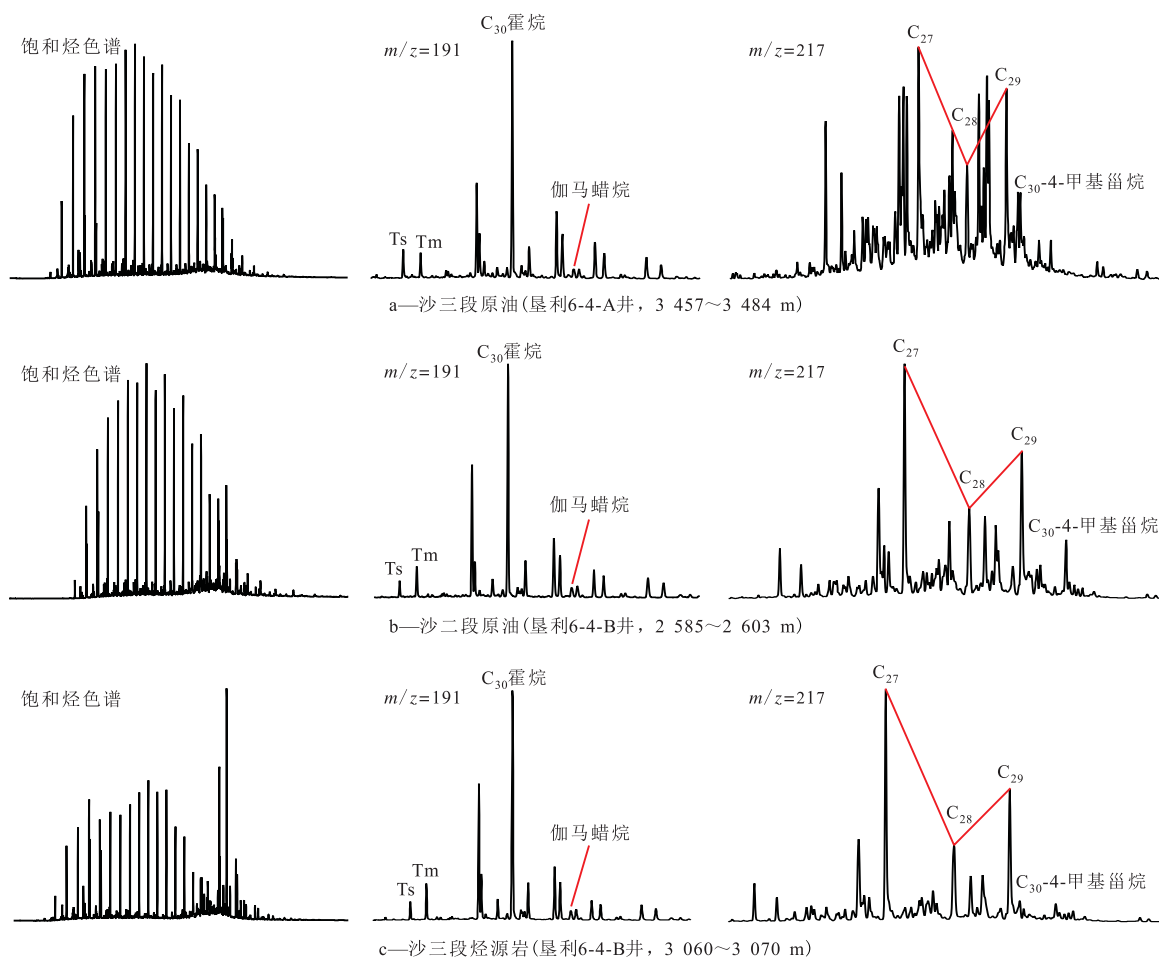


图2 莱州湾凹陷东北洼沙河街组烃源岩及原油色谱-质谱分析结果

Fig.2 Chromatogram and mass chromatogram of source rocks and crude oil of the Shahejie Formation in northeast subsag of Laizhou Bay Sag

2.3 物性特征

大面积分布的致密储层是致密油形成的明显标志之一。贾承造等对致密油储层的定义为覆盖基质渗透率不超过0.1 mD(储层地面空气渗透率小于1 mD)^[11],而其他学者则认为根据中国油气田实际情况,覆盖基质渗透率(储层地面空气渗透率)可能有所提高,应不超过0.2 mD(储层地面空气渗透率小于2 mD)^[7,9,13,22-24],但所有学者均认为致密油储层应为低渗透或极低渗透储层。研究区取心井段54个岩心样品的实测物性统计结果表明,其储层孔隙度主要为3.5%~20.2%,平均为14.8%,渗透率为0.03~16.39 mD,平均为3.8 mD;其中渗透率小于2 mD的岩心样品占总岩心样品的42.59%,属于低孔、特低渗透储层^[25]。储层的孔喉结构和孔喉半径也是评价致密油储层的标准之一,致密油储层的孔喉半径多以纳米级为主。垦利6-4-D井取心井段13个岩心样品的压汞分析结果表明,其分选为中等一差,孔喉以细歪度为主。整体上,致密砂岩储层的孔喉半径普遍较小,孔喉半径最大值和最小值分别为0.3和0.95 μm ,主要为0.5~0.7 μm ,平均为0.66 μm ,且13个岩心样品孔喉半径的平均值均小于1 μm ,因此研究区沙河街组储层整体属于致密油储层范畴。

3 致密油形成条件

3.1 广泛分布的优质烃源岩

广泛分布的腐泥型较高成熟度的优质烃源岩是致密油形成的关键因素之一^[1,7,9,22]。渤海海域沙三段广泛发育半深湖-深湖相暗色泥岩,该时期气候温暖潮湿,湖盆相对封闭,较深的水体及微咸水还原环境下有利于形成丰度高、类型好、厚度大、分布广的区域性烃源岩^[26]。大面积分布的沙三段半深湖-深湖相泥岩为研究区主要的烃源岩,以镜质组反射率(R_o)为0.5%作为划分标准,利用Petromode软件对研究区沙三段烃源岩进行生、排烃模拟,结果表明,研究区烃源岩分布范围可达300 km^2 ,为一套深灰色、黑色泥岩,其水生生物和浮游生物繁盛,有机质丰富,最大厚度达1300 m,平均厚度约为600 m;有机质类型以 II_1 型干酪根为主,少量 II_2 型干酪根,烃源岩母质类型以壳质组为主,总有机碳含量为0.86%~4.26%,平均为1.30%,生烃潜量为0.83~28.75 mg/g ,镜质组反射率为0.33%~1.06%,处于大量生油阶段,生烃规模较大,为较好烃源岩(表1),且该烃源岩亦符合致密油优质成熟烃源岩(I—II型干酪根、总有机碳含量大于1%,镜质组反射率

表1 莱州湾凹陷东北洼沙三段烃源岩部分生烃参数
Table1 Partial parameters of hydrocarbon generation for source rocks in the third member of Shahejie Formation in northeast subsag of Lanzhou Bay Sag

井号	顶深/ m	底深/ m	总有机碳 含量/%	总烃含量/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	生烃潜量/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	有效碳 含量/%	氢指数/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	氧指数/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	镜质组反 射率/%	最高热解 峰温/ $^{\circ}\text{C}$
垦利6-4-A	3 180	3 190	1.92	1 360.02	9.96	0.83	488.54	64.06	0.52	439
垦利6-4-A	3 290	3 300	2.02	1 543.65	11.37	0.94	516.83	155.45	0.65	444
垦利6-4-A	3 390	3 400	1.94	1 300.29	11.23	0.93	546.91	117.53	0.65	446
垦利6-4-A	3 540	3 550	0.86	730.40	3.34	0.28	370.93	329.07	0.71	435
垦利6-4-A	3 600	3 610	1.29	1 269.14	7.30	0.61	524.03	207.75	0.7	443
垦利6-4-A	3 660	3 670	2.10	1 462.00	10.72	0.89	478.57	134.76	0.8	443
垦利6-4-B	2 730	2 740	2.75	972.64	12.80	1.06	449.82	89.09	0.33	438
垦利6-4-B	2 760	2 770	2.71	1 137.35	14.12	1.17	504.43	98.52	0.37	439
垦利6-4-B	2 820	2 830	2.45	1 306.70	10.40	0.86	411.84	77.14	0.36	441
垦利6-4-B	2 880	2 890	3.87	2 454.73	23.23	1.93	583.72	39.53	0.36	435
垦利6-4-B	2 910	2 920	2.70	1 301.38	13.95	1.16	493.70	61.85	0.36	441
垦利6-4-B	3 000	3 010	2.78	1 535.59	15.22	1.26	519.06	97.48	0.35	440
垦利6-4-B	3 030	3 040	3.98	949.15	24.60	2.04	592.71	55.03	0.37	438
垦利6-4-B	3 090	3 100	4.26	1 434.39	28.39	2.36	638.50	58.22	0.38	441
垦利6-4-B	3 120	3 130	3.69	1 795.72	28.75	2.39	750.41	75.07	0.35	444
垦利6-4-B	3 150	3 160	3.30	1 945.38	28.51	2.37	836.06	94.85	0.43	443
垦利6-4-B	3 210	3 220	2.88	2 770.13	26.79	2.22	896.88	111.46	0.39	445

为0.6%~1.3%)的特征。

3.2 有利的碎屑岩储集体

研究区沙河街组沉积时期经历了断陷期和断拗期2个构造演化阶段,其中沙三段沉积时期断陷活动形成的古地貌单元使研究区发育扇三角洲、辫状河三角洲和湖泊沉积体系^[27]。而研究区所处的东北洼由于受东部边界断裂形成的断坡带控制,其周边鲁东隆起风化剥蚀形成的大量碎屑物质受断坡带影响,快速搬运并在坡脚及其附近快速堆积,形成扇三角洲沉积体系,扇体面积达8 km²,可进一步划分为扇三角洲前缘及前扇三角洲亚相(图3a),以扇三角洲前缘亚相为主,发育多期水下分流河道微相与分流河道间微相交互沉积,为砂、泥岩互层沉积,其单砂体厚度为1.0~11.2 m,累积厚度为5~30 m,具有较好的连续性,且不同空间展布的砂体纵横交错,扇三角洲前缘砂体与前三角洲及较深湖泥岩在平面上相邻分布,形成多套储盖组合。沙二段和沙一段沉积时期,位于高部位的物源区被不断剥蚀,向盆地部分充填,扇三角洲沉积转变为辫状河三角洲沉积。研究区沙二段和沙一段物源体系与沙三段沉积体系具有继承性,以辫状河三角洲前缘亚相为主(图3b),亦为多期水下分流河道微相与分流河道间微相交互沉积,沙二段和沙一段砂体较沙三段发育,单砂体厚度为1.8~13.5 m,累积厚度为10~40 m,连续性较好。

3.3 良好的源储共生关系

对于致密油而言,由于未经历长距离运移,因

此以垂向运移为主,这就决定了烃源岩与储集砂体之间的耦合关系即源储共生关系是致密油形成的重要地质条件^[28]。在确定研究区烃源岩大面积分布的前提下,大范围致密储层连续展布是形成致密油的基本条件^[15,22,29-31],同时也决定了致密油的储量规模和开发价值。研究区沙三段湖相优质烃源岩与扇三角洲砂体在平面上相邻分布,即含油致密砂岩储层与烃源岩互层或位于烃源岩附近,二者之间形成良好的源储共生关系。此外,由于研究区断裂的大量发育使得沙二段和沙一段砂体与沙三段优质烃源岩对接,也为致密油形成提供了良好的源储共生关系。

源储共生关系分析结果表明,莱州湾凹陷东北洼古近系致密油主要存在2种成藏组合类型:①源内包裹式成藏组合,主要为沙三段油藏,其储层与烃源岩呈互层式接触或储层呈席状、透镜状分布于烃源岩中,油气在源储压差作用下克服毛管压力,以渗流扩散方式直接注入储集体的纳米级孔隙中,并将地层水驱替或部分驱替出储层进而成藏,或者滞留于烃源岩中形成致密油。②源侧披覆式成藏组合,主要为沙二段和沙一段油藏,其储层分布于烃源岩翼部,与烃源岩呈指状交错分布,随着地层埋深的加大,压实和胶结作用导致储层逐渐致密化,且烃源岩已进入成熟阶段,生成的油气同样由于压差作用克服毛管压力,短距离侧向运移至与烃源岩呈指状交互分布的沙二段和沙一段致密储层中(图4)。

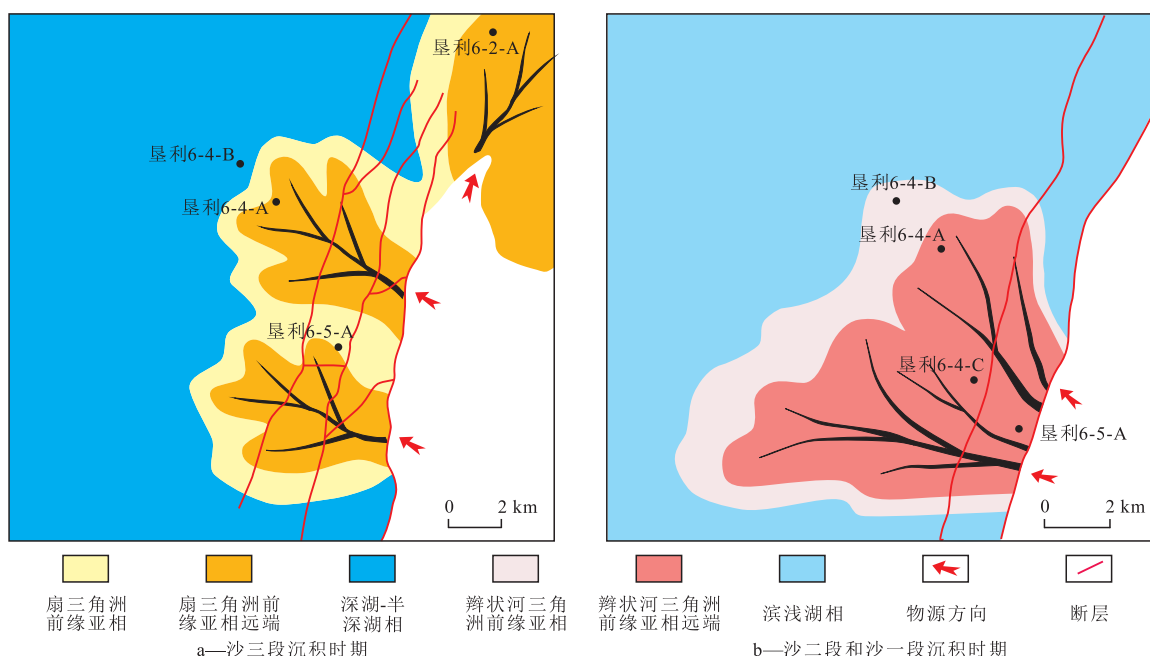


图3 莱州湾凹陷东北洼垦利6构造区沙河街组沉积相平面分布

Fig.3 Plane distribution of sedimentary facies of the Shahejie Formation at Structure Kenli6 in northeast subsag of Laizhou Bay Sag

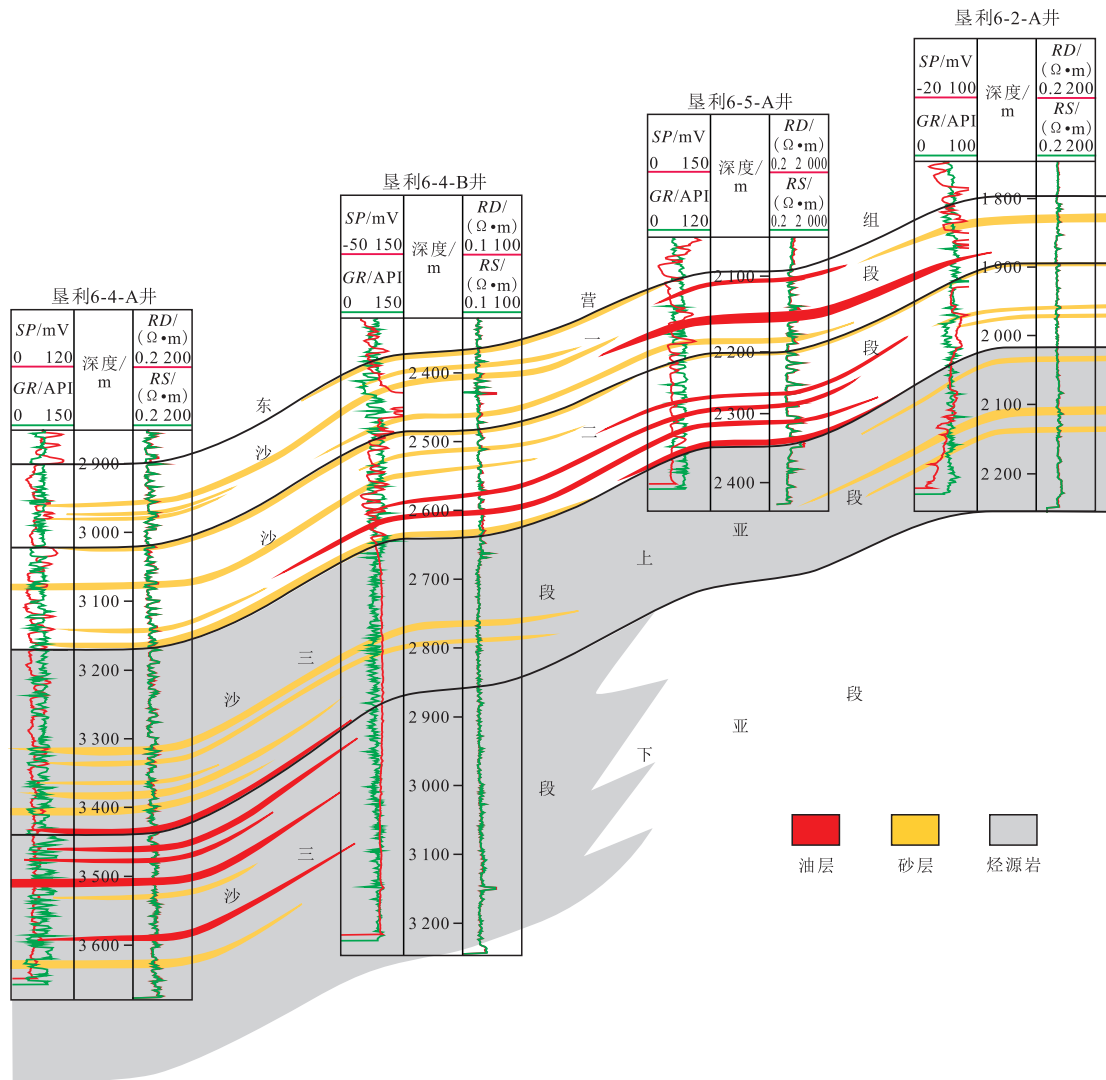


图4 莱州湾凹陷东北洼垦利6构造区沙河街组致密油成藏组合示意

Fig.4 Tight oil reservoir combinations of the Shahejie Formation at Structure Kenli6 in northeast subsag of Laizhou Bay Sag

3.4 异常高压

油气运移的驱动力主要包括构造应力、异常地层压力以及浮力,而异常地层压力对油气运移起着重要的作用^[32-33]。致密储层中原油运聚的主要动力为超压作用形成的动力^[34],且一些学者明确提出烃源岩生烃增压导致的异常高压是致密油聚集的动力^[35-36]。对研究区沙河街组油气充注动力的研究表明,沙河街组存在的异常高压对油气初次运移具有控制作用,也在一定程度上影响着油气的二次运移及富集成藏。对研究区沙河街组油气运移动力的研究表明,沙河街组存在的异常高压(超压)主要是由于烃源岩生烃增压作用所形成,烃源岩中密度较大的干酪根转化为密度较小的油气,致使孔隙流体体积膨胀是产生生烃增压的主要原因。前人研究证实,如果干酪根热降解过程中体积收缩产生的空间完全被油气占据,则其生烃过程中

产生的体积膨胀率最大可达7%^[37];同时有限空间的烃源岩生烃模拟实验表明,总有机碳含量为2.56%的灰黑色泥页岩在生烃过程中产生的压力高达38 MPa^[38],而研究区沙三段烃源岩的总有机碳含量平均为2.67%,其生烃过程中所产生的压力应高于致密储层的运移阻力,成为致密油的主要充注动力。研究区沙三段烃源岩在生烃过程中产生大量的气体和液体使得流体体积增加,导致岩石孔隙中形成高于静水压力的异常压力。利用平衡深度法根据研究区声波时差曲线恢复地层古压力,结果表明,沙三段烃源岩生烃时期形成的异常高压是油气运移充注的主要动力。此外,基于埋藏史和热演化史开展生烃史模拟研究,结果(图5)表明,莱州湾凹陷沙河街组烃源岩自渐新世(对应的镜质组反射率为0.5%)进入生油阶段,在中新世(对应的镜质组反射率为0.7%)进入大量生烃阶段,至今逐渐进入生

烃高峰期。烃源岩在短时间内大量排烃,使得烃源岩层内生烃过程中累积的地层压力得到快速释放,生烃过程中所产生的异常高压为致密油聚集提供持续的充注动力。

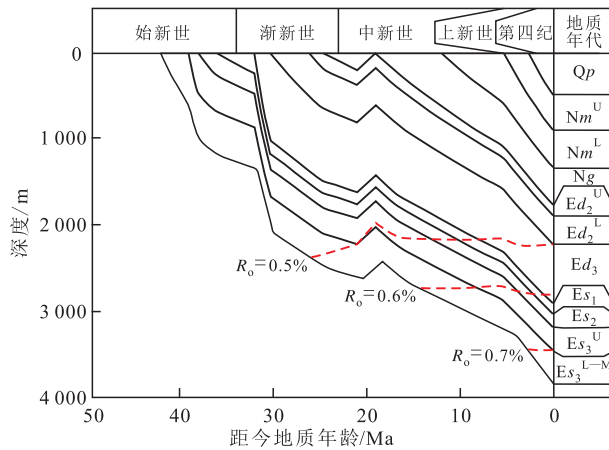


图5 莱州湾凹陷东北洼垦利6构造区生烃史模拟结果

Fig.5 History of hydrocarbon generation simulation at Structure Kenli6 in northeast subsag of Laizhou Bay Sag

4 结论

莱州湾凹陷东北洼沙河街组致密油的油品性质好、流动性强;致密油储层物性差、孔喉结构复杂,发育纳米级喉道且分布不均匀,连通性差。研究区沙河街组半深湖-深湖相优质泥岩形成Ⅱ₁型干酪根,为致密油藏的形成提供了重要的油源;周缘大面积展布的致密砂岩储层为致密油藏的形成提供了可容空间;沙河街组广泛发育湖相与三角洲相交互沉积,使烃源岩与致密砂岩互层或对接,形成有利的源储共生关系;地史期生烃产生的异常高压为致密油提供持续的充注动力。莱州湾凹陷东北洼沙河街组具有发育致密油的有利条件,其致密油分布于与优质烃源岩共生或互层的致密储集砂体中。

参考文献:

[1] 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.

[2] 邹才能,杨智,朱如凯,等.中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J].地质学报,2015,89(6):979-1007.

ZOU Caineng, YANG Zhi, ZHU Rukai, et al. Progress in China's unconventional oil & gas exploration and development and theoretical technologies [J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(6): 979-1007.

- [3] 徐祖新,姜文亚,刘海涛.常规与非常规油气关系研究现状与发展趋势[J].油气地质与采收率,2016,23(3):14-19.
XU Zuxin, JIANG Wenya, LIU Haitao. Research status and development tendency of the relationship between conventional and unconventional oil and gas [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(3): 14-19.
- [4] SCHMOKER J W, HESTER T C. Organic carbon in Bakken Formation, United States portion of Williston Basin [J]. AAPG Bulletin, 1983, 67(12): 2165-2174.
- [5] 林森虎,邹才能,袁选俊,等.美国致密油开发现状及启示[J].岩性油气藏,2011,23(4):25-30,64.
LIN Senhu, ZOU Caineng, YUAN Xuanjun, et al. Status quo of tight oil exploitation in the United States and its implication [J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(4): 25-30, 64.
- [6] 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.
- [7] 付锁堂,张道伟,薛建勤,等.柴达木盆地致密油形成的地质条件及勘探潜力分析[J].沉积学报,2013,31(4):672-682.
FU Suotang, ZHANG Daowei, XUE Jianqin, et al. Exploration potential and geological conditions of tight oil in the Qaidam Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(4): 672-682.
- [8] 陈世加,张焕旭,路俊刚,等.四川盆地中部侏罗系大安寨段致密油富集高产控制因素[J].石油勘探与开发,2015,42(2):186-193.
CHEN Shijia, ZHANG Huanxu, LU Jungang, et al. Controlling factors of Jurassic Da'anzhai Member tight oil accumulation and high production in central Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2): 186-193.
- [9] 万传治,王鹏,薛建勤,等.柴达木盆地柴西地区古近系-新近系致密油勘探潜力分析[J].岩性油气藏,2015,27(3):26-31.
WAN Chuazhi, WANG Peng, XUE Jianqin, et al. Exploration potential of tight oil of the Paleogene and Neogene in western Qaidam Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(3): 26-31.
- [10] 邹才能,陶士振,侯连华,等.非常规油气地质[M].北京:地质出版社,2013.
ZOU Caineng, TAO Shizhen, HOU Lianhua, et al. Unconventional petroleum geology [M]. Beijing: Geology Publishing House, 2013.
- [11] 贾承造,邹才能,李建忠,等.中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J].石油学报,2012,33(3):343-350.
JIA Chengzao, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 343-350.
- [12] 王香增,任来义,贺永红,等.鄂尔多斯盆地致密油的定义[J].油气地质与采收率,2016,23(1):1-7.
WANG Xiangzeng, REN Laiyi, HE Yonghong, et al. Definition of tight oil in Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(1): 1-7.

- ciency, 2016, 23(1): 1-7.
- [13] 邹才能, 朱如凯, 李建忠, 等. 致密油地质评价方法: SY/T 6943—2013[S]. 北京: 石油工业出版社, 2014.
- ZOU Caineng, ZHU Rukai, LI Jianzhong, et al. Geological evaluation methods for tight oil: SY/T 6943—2013[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014.
- [14] 赵贤正, 朱洁琼, 张锐锋, 等. 冀中坳陷东鹿凹陷泥灰岩—砾岩致密油气成藏特征与勘探潜力[J]. 石油学报, 2014, 35(4): 613-622.
- ZHAO Xianzheng, ZHU Jieqiong, ZHANG Ruifeng, et al. Characteristics and exploration potential of tight calcilutite-rudstone reservoirs in Shulu sag, Jizhong depression, North China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 613-622.
- [15] 张凤莲, 孙洪斌, 李兴周. 大民屯凹陷湖相致密油储层形成条件及勘探潜力[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2015, 45(增刊1): 37-38.
- ZHANG Fenglian, SUN Hongbin, LI Xingzhou. Exploration potential and geological conditions of lacustrine tight oil reservoirs in Damintun depression [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2015, 45(Supplement1): 37-38.
- [16] 赵国祥, 杨波, 王清斌, 等. 莱州湾凹陷垦利6构造区沙河街组异常孔隙成因[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(1): 42-45.
- ZHAO Guoxiang, YANG Bo, WANG Qingbin, et al. Genesis of the abnormal pores in Shahejie Formation in Kenli No.6 structural area of Laizhou Bay Sag [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(1): 42-45.
- [17] 牛成民. 渤海南部海域莱州湾凹陷构造演化与油气成藏[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 424-431.
- NIU Chengmin. Tectonic evolution and hydrocarbon accumulation of Laizhouwan depression in southern Bohai Sea [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 424-431.
- [18] 彭文绪, 辛仁臣, 孙和风, 等. 渤海海域莱州湾凹陷的形成和演化[J]. 石油学报, 2009, 30(5): 654-660.
- PENG Wenxu, XIN Renchen, SUN Hefeng, et al. Formation and evolution of Laizhou Bay Sag in Bohai Bay [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(5): 654-660.
- [19] 袁静, 张红, 张明星, 等. 东营凹陷石村断层下降盘沙三段—沙二段沉积、演化特征及主控因素[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(2): 22-29.
- YUAN Jing, ZHANG Hong, ZHANG Mingxing, et al. Sedimentary evolution characteristics and the main controlling factors of 2nd and 3rd members of Shahejie Formation in downthrown side of Shicun Fault in Dongying sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(2): 22-29.
- [20] 张涵冰, 彭军, 杨素举, 等. 致密砂岩储层成岩作用及其控制因素分析: 以塔里木盆地顺托果勒地区志留系柯坪塔格组下段为例[J]. 石油实验地质, 2016, 38(4): 543-550.
- ZHANG Hanbing, PENG Jun, YANG Suju, et al. Diagenesis and controlling factors of tight sandstone reservoirs: A case study of the lower member of Silurian Kepingtage Formation in Shuntuoguole area, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(4): 543-550.
- [21] 中国海洋石油总公司勘探专业标准委员会. 油气层、油气(藏)田及油气性质分类规范: Q/HS 1026—2007[S]. 北京: 中国海洋石油总公司, 2008.
- Exploration Professional Standards Committee of CNOOC. The specification of hydrocarbon zone, oil-gas field & oil-gas property: Q/HS 1026—2007 [S]. Beijing: China National Offshore Oil Corporation, 2008.
- [22] 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.
- [23] 张忠义, 陈世加, 杨华, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长7段致密油成藏机理[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 590-599.
- ZHANG Zhongyi, CHEN Shijia, YANG Hua, et al. Tight oil accumulation mechanisms of Triassic Yanchang Formation Chang7 Member, Ordos Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 590-599.
- [24] 王红军, 马锋, 童晓光, 等. 全球非常规油气资源评价[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(6): 850-862.
- WANG Hongjun, MA Feng, TONG Xiaoguang, et al. Assessment of global unconventional oil and gas resources [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(6): 850-862.
- [25] 中国海洋石油总公司勘探专业标准委员会. 储盖层定量评价规范: Q/HS 1027—2007[S]. 北京: 中国海洋石油总公司, 2008.
- Exploration Professional Standards Committee of CNOOC. The specification of reservoir and cap rock quantitative evaluation: Q/HS 1027—2007 [S]. Beijing: China National Offshore Oil Corporation, 2008.
- [26] 朱伟林, 米立军, 龚再升, 等. 渤海海域油气成藏与勘探[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- ZHU Weilin, MI Lijun, GONG Zaisheng, et al. Oil and gas accumulation and exploration of Bohai Sea area [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [27] 夏庆龙, 周心怀, 李建平, 等. 渤海海域古近系层序沉积演化及储层分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012.
- XIA Qinglong, ZHOU Xinhui, LI Jianping, et al. Sequence sedimentary evolution and reservoir distribution rule of Paleogene in Bohai Sea area [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [28] 张连梁, 段胜强, 李会光, 等. 扎哈泉地区新近系致密油形成条件与分布特征[J]. 特种油气藏, 2016, 23(2): 36-40.
- ZHANG Lianliang, DUAN Shengqiang, LI Hui Guang, et al. Neogene tight oil accumulation conditions and distribution in Zahaquan [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(2): 36-40.
- [29] 姚宜同, 李士祥, 赵彦德, 等. 鄂尔多斯盆地新安边地区长7致密油特征及控制因素[J]. 沉积学报, 2015, 33(3): 625-632.
- YAO Yitong, LI Shixiang, ZHAO Yande, et al. Characteristics & controlling factors of Chang7 tight oil in Xin'anbian area, Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(3): 625-632.
- [30] 姚泾利, 邓秀芹, 赵彦德, 等. 鄂尔多斯盆地延长组致密油特征[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(2): 173-187.
- YAO Jingli, DENG Xiuqin, ZHAO Yande, et al. Characteristics of tight oil in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(2): 173-187.

- [31] 张凤奇,张凤博,钟红利,等.鄂尔多斯盆地甘泉南部地区延长组长7致密油富集主控因素[J].岩性油气藏,2016,28(3):12-19.
ZHANG Fengqi, ZHANG Fengbo, ZHONG Hongli, et al. Main controlling factors of the enrichment of Chang7 tight oil of Yan-chang Formation in southern Ganquan area, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28(3): 12-19.
- [32] 李明诚,李剑.“动力圈闭”——低渗透致密储层中油气充注成藏的主要作用[J].石油学报,2010,31(5):718-722.
LI Mingcheng, LI Jian. “Dynamic trap”: A main action of hydrocarbon charging to form accumulations in low permeability-tight reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(5): 718-722.
- [33] 赵文智,邹才能,谷志东,等.砂岩透镜体油气成藏机理初探[J].石油勘探与开发,2007,34(3):273-284.
ZHAO Wenzhi, ZOU Caineng, GU Zhidong, et al. Preliminary discussion on accumulation mechanism of sand lens reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(3): 273-284.
- [34] 庞正炼,陶士振,张琴,等.致密油二次运移动力和阻力实验研究——以四川盆地中部侏罗系为例[J].中国矿业大学学报,2016,45(4):762-772.
PANG Zhenglian, TAO Shizhen, ZHANG Qin, et al. Simulation experiments of tight oil secondary migration driving force and resistance: a case study of Jurassic oilfield in middle Sichuan basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(4): 762-772.
- [35] NORDENG S H. The Bakken petroleum system: An example of a continuous petroleum accumulation [J]. North Dakota Department of Mineral Resources Newsletter, 2009, 36(1): 21-24.
- [36] 丁晓琪,张峭楠,易超,等.鄂尔多斯盆地镇泾地区中生界油气二次运移动力研究[J].天然气地球科学,2011,22(1):66-72.
DING Xiaoqi, ZHANG Shaonan, YI Chao, et al. Dynamic of Mesozoic hydrocarbon secondary migration in Zhenjing Oilfield, Southwestern Ordos basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(1): 66-72.
- [37] 张文正,杨华,李剑锋,等.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——强生排烃特征及机理分析[J].石油勘探与开发,2006,33(3):289-293.
ZHANG Wenzheng, YANG Hua, LI Jianfeng, et al. Leading effect of high-class source rock of Chang7 in Ordos Basin on enrichment of low permeability oil-gas accumulation—Hydrocarbon generation and expulsion mechanism [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(3): 289-293.
- [38] 白玉彬,罗静兰,王少飞,等.鄂尔多斯盆地吴堡地区延长组长8致密砂岩油藏成藏主控因素[J].中国地质,2013,40(4):1159-1166.
BAI Yubin, LUO Jinglan, WANG Shaofei, et al. The distribution of Chang-8 tight sandstone oil reservoir of Yanchang Formation in Wubao area, central-south of Ordos Basin [J]. Geology in China, 2013, 40(4): 1159-1166.

编辑 邹澍滢

(上接第20页)

- [31] CHENG X, FU S, WANG H, et al. Geometry and kinematics of the Arlar strike-slip fault, SW Qaidam basin, China: New insights from 3-D seismic data [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 98: 198-208.
- [32] SUPPE J, CHOU G T, HOOK S C. Rates of folding and faulting determined from growth strata [M]. Berlin: Springer Netherlands, 1992: 105-121.
- [33] POBLET J, MCCLAY K, STORTI F, et al. Geometries of syntectonic sediments associated with single-layer detachment folds [J]. Journal of Structural Geology, 1997, 19(3/4): 369-381.
- [34] STORTI F, POBLET J. Growth stratal architectures associated to decollement folds and fault-propagation folds: Inferences on fold kinematics [J]. Tectonophysics, 1997, 282(1/4): 353-373.
- [35] 郭召杰,方世虎,张锐,等.生长地层及其在判断天山北缘前陆冲断褶皱带形成时间上的应用[J].石油与天然气地质,2006,27(4):475-481.
GUO Zhaojie, FANG Shihu, ZHANG Rui, et al. Growth strata and their application in timing deformation of foreland thrust-folds in the north margin of Tianshan [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(4): 475-481.
- [36] 吕明,汤良杰,岳勇.塔里木盆地西南部麦盖提斜坡构造演化过程的记录——生长地层及生长不整合[J].地质论评,2014,60(1):91-101.
LÜ Ming, TANG Liangjie, YUE Yong. Records of tectonic evolution in Maigaiti slope southwestern Tarim Basin: Growth strata and growth unconformity [J]. Geological Review, 2014, 60(1): 91-101.
- [37] FORD M, WILLIAMS E A, ARTONI A, et al. Progressive evolution of a fault-related fold pair from growth strata geometries, Sant Llorenç de Morunys, SE Pyrenees [J]. Journal of Structural Geology, 1997, 19(3/4): 413-441.
- [38] 刘军,刘成林,董清源,等.柴达木盆地西部地区古近系—新近系天然气成藏期次研究[J].地学前缘,2016,23(5):127-134.
LIU Jun, LIU Chenglin, DONG Qingyuan, et al. A study of the period of the gas accumulation of Paleogene-Neogene in Western Qaidam Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(5): 127-134.

编辑 经雅丽