

储层非均质性对油气成藏的影响

——以博兴油田沙四上亚段滩坝相砂岩为例

郭松^{1,2}, 谭丽娟³, 林承焰³, 李红南³, 吕修祥^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 3. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580)

摘要:在对录井、测井、分析测试等资料综合分析的基础上,结合模拟实验对博兴油田沙四上亚段滩坝相砂岩储层非均质性特征及其对油气成藏的影响进行了分析。结果表明:研究区滩坝相储层主要为砂泥薄互层状分布,储层非均质性强;油气分布呈严重不均一性,不同井区、不同砂组含油特征迥异;成岩作用导致该区储层质量差异较大,储层质量与含油气性有较好的正相关性,空间储层非均质性控制了油气充満度及宏观分布特征。模拟实验显示,成藏动力和成藏阻力的配置关系会影响油气的富集特征,并在一定程度上弱化储层非均质性对油气成藏带来的影响。

关键词:储层非均质性;油气不均一分布;模拟实验;滩坝相储层;博兴油田;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Influence of reservoir bed heterogeneity on hydrocarbon accumulation:

Taking beach-bar sandstone of upper fourth member of Eocene Shahejie Formation in Boxing oilfield as an example

Guo Song^{1,2}, Tan Lijuan³, Lin Chengyan³, Li Hongnan³, Lü Xiuxiang^{1,2}

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China)

Abstract: Based on the analyses of logging data and experiment, it is discussed in this paper the reservoir bed heterogeneity and its effects on hydrocarbon accumulation in the upper fourth member of Eocene Shahejie Formation of the Boxing oilfield. The result shows that the beach-bar reservoir bed with thin interbedded sandstone has strong heterogeneity. Hydrocarbon distribution and property are extremely uneven. Influenced by diagenesis, beach-bar sandstone shows strong heterogeneity, leading to different reservoir bed qualities in different areas. Reservoir bed quality has a good correspondence with hydrocarbon-bearing property, and reservoir bed heterogeneity controls the accumulation and distribution of hydrocarbon as well as oil saturation. Simulated experiment indicates that the relationship between driving force and resistance has effects on hydrocarbon accumulation feature and weakens the control of hydrocarbon accumulation by reservoir bed heterogeneity to a specific extent.

Key words: reservoir bed heterogeneity; uneven distribution of hydrocarbon; simulated experiment; beach-bar reservoir; Boxing oilfield; Bohai Bay Basin

随着对滩坝砂岩油气勘探关注程度越来越高,在松辽、渤海湾、准噶尔、辽河等盆地均发现了滩坝砂岩油气藏^[1-3]。其中以胜利油田最为典型,东营凹陷南坡滩坝砂体油气是近几年胜利油田油气产量和储量增加的重要领域,对该区油气勘探和研究工作引起了大量学者的重视^[4-7]。滩坝相储层最

典型的特点是薄互层沉积,空间上砂体变化快,具有较强的储层非均质性^[8-13]。目前关于滩坝砂岩储层非均质性的研究更多的是将其与油气开发紧密结合,强调的是储层非均质性与剩余油分布的关系^[14-15]。而关于储层非均质性对油气成藏的控制作用研究较少,导致对滩坝砂岩油气藏分布规律不

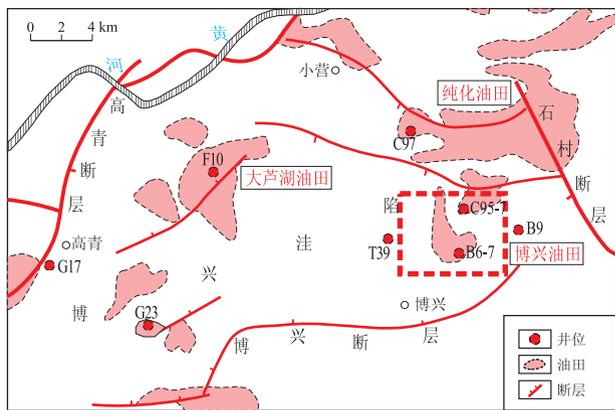


图1 东营凹陷博兴洼陷区域构造位置

Fig. 1 Tectonic location of Boxing sub-Sag, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

明确,制约了滩坝砂岩油气藏的勘探。本文选择博兴油田沙四上亚段滩坝砂岩作为解剖对象,在归纳总结该区滩坝砂岩储层非均质性特点和油气富集特征的基础上,重点分析了储层非均质性对油气不均一分布的控制作用,并通过实验模拟了在具有储层非均质性的薄互层砂体中油气的运聚特征。以期加深对断陷湖盆缓坡带滩坝砂岩油气成藏特征的认识,对油田滚动勘探开发工作具有实际的指导意义和应用价值。

1 地质背景

博兴油田位于东营凹陷博兴洼陷东部,纯化—草桥鼻状构造的南部,南临东营南斜坡,主体夹在2个反向断层(博兴断层和石村断层次生断层)中间,南北方向上呈地堑状,自西向东基本呈渐高趋势(图1)。区内发育了多条近东西向北掉及南掉正断层,把该区分成若干个相对独立的区块。

研究区沙四上亚段为低位—湖侵体系域的滨浅湖—半深湖相沉积,受古地貌和区域构造轮廓的影响,滨浅湖相滩坝砂岩沉积较为发育,纵向上主要呈砂泥岩互层状,滩砂分布面积广泛,物性较好、分布范围较局限的坝砂为油气储集的良好场所,具备形成滩坝砂油气藏的背景条件^[16]。经烃源岩研究及油源对比,区内滩坝砂岩油藏原油与沙四上亚段烃源岩生标特征相符合^[17]。

2 油气富集特征

滩坝砂体通常发育在滨浅湖高能环境中,往往呈现出单层厚度小、横向上变化快、纵向上多层叠置、呈大面积分布的特点,致使研究区滩坝砂岩油气分布呈严重不均一性。纵向上不同砂组含油气

性差异较大,经常有相邻2个砂体一个含油一个不含油的现象出现,平面上不同区块含油部位和含油面积各异。

博兴油田沙四上亚段滩坝砂储层油气富集条件相对复杂。平面上,油气主要集中在断裂带以及坝主体和坝边缘等优势相带,以T83—C95井区、B3井区最富油气;纵向上,不同砂组含油气性差异较大,以储集条件较好的1砂组为主力含油气砂组,其次为3砂组。

受储层条件和断层的影响,研究区主要发育物性封闭岩性油气藏、断层—岩性复合型油气藏、砂岩上倾尖灭岩性油气藏和断层油气藏。自构造低部位的生油洼陷区到洼陷边缘的构造高部位,随着埋藏深度逐渐变浅,圈闭与主要烃源岩层的距离加大,地层受构造作用改造程度加强,油气藏类型由纯岩性油气藏逐渐过渡为构造—岩性油气藏和构造油气藏,油气充满度也逐渐变低,油气藏由无边、底水、非油即干逐渐过渡为油水间互和边、底水明显的油气藏。

研究区储层非均质性与油气的差异富集特征有一定的关系。具体表现在储层质量高的区域含油性好,储层质量差的区域含油性差。油气从烃源岩中排出,进入邻近储集砂体,达到一定数量后沿层间界面或微层理面向低势区运移,在断层作用下,至同层圈闭中聚集成藏。形成的油气藏无明显的边底水,含油边界多受控于储集条件,呈不等高特点。受较强的储层非均质性影响,典型“上油下水”型油气藏较少,取而代之的是下倾方向含油、上倾方向为干层,抑或两头为干层、腰部含油等非正常形态油气藏。主要形成物性封闭岩性油气藏,其次为断层—岩性复合型油气藏(图2)。

3 储层非均质性控油气特点

3.1 成岩作用对储层非均质性的影响

博兴油田沙四上亚段滩坝砂岩平均孔隙度为12.8%,平均渗透率为 $5.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。主要含油气岩性为粉砂岩,其次为泥质粉砂岩和灰质粉砂岩。不同岩性由于物性和泥质、灰质含量不同,储层质量和富油气程度迥异,大部分为干层^[18]。研究区主要为低孔、低渗储层,成岩作用对该类储层的影响重大^[19]。根据薄片观察和成岩作用研究发现,该区储集空间类型以次生孔隙为主,孔隙度变化的主要原因是方解石的沉淀和溶解以及长石矿物的溶蚀作用,成岩阶段处于中成岩A期。在成岩改造过程中,压实作用和方解石胶结作用会使得孔隙

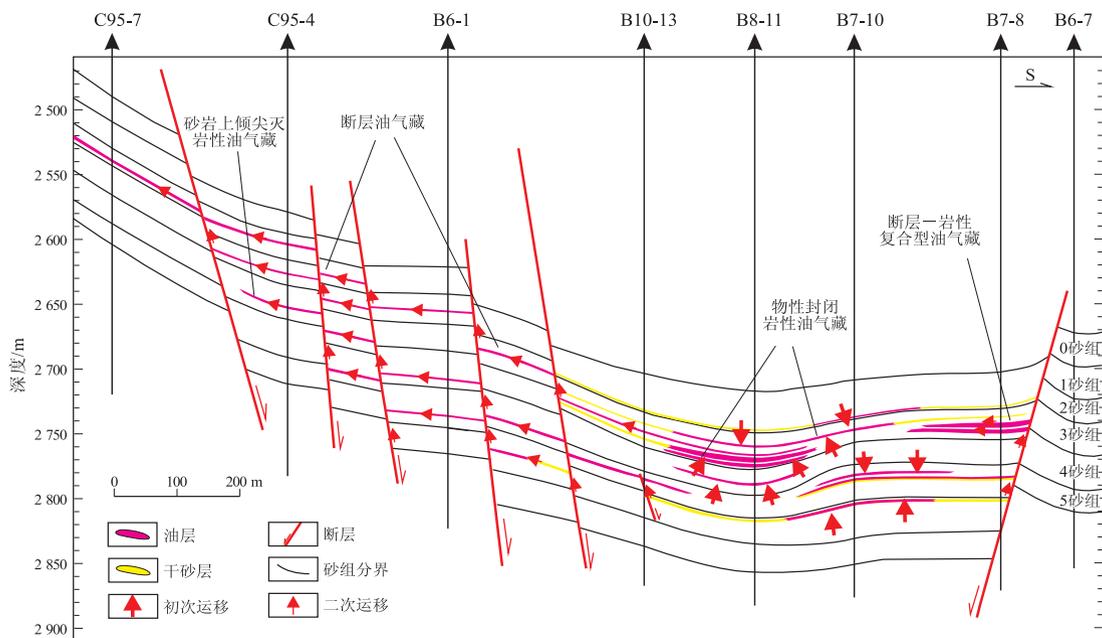


图2 博兴油田沙四上亚段油气成藏示意

Fig. 2 Hydrocarbon accumulation in upper fourth member of Eocene Shahejie Formation, Boxing oilfield

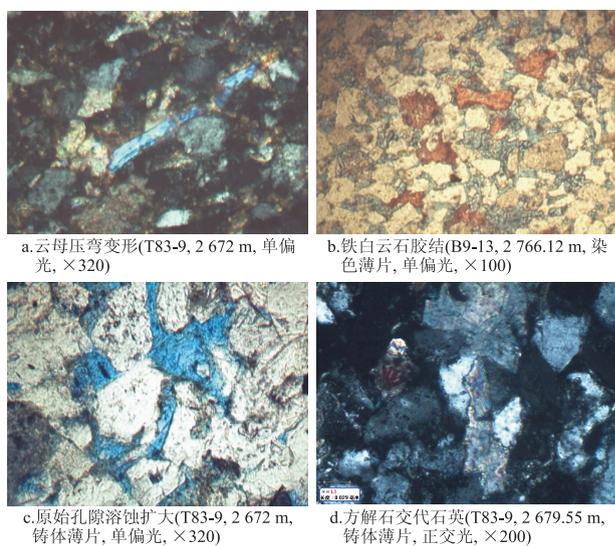


图3 博兴油田沙四上亚段滩坝相砂岩主要成岩作用类型

Fig. 3 Main diagenesis types of beach-bar sandstone in upper fourth member of Eocene Shahejie Formation, Boxing oilfield

度降低,而方解石、长石、岩屑等矿物的溶蚀作用会形成次生孔隙,改善储集条件(图3)。受成岩作用的影响,滩坝砂岩储层表现出较强的非均质性,导致不同区域储层质量差异较大。

3.2 储层非均质性与油气不均一分布的关系

在油气成藏过程中,砂岩体既是流体输导系统的重要组成部分,又为油气的富集提供了必需的储集体。砂岩储层的非均质性直接影响着其输导与聚集功能,制约着油气的富集、分布特点,明显的非

均质性直接影响油气的充满度,可以造成不同井区含油气性差异巨大。以0砂组为例,C95-1与B6-31井区均为构造高部位,具有很好的构造圈闭条件,但含油气性比T85井区差,分析原因主要是储层发育差异性造成的。分别选择3个井区内具有代表性的井对0砂组储层条件进行分析发现,T85井区平均砂厚较大,砂地比数值明显高于另外2个井区,隔夹层数量少于C95-1井区,与B6-31井区相似,层间非均质性弱,因此,T85井区的储层非均质性较弱,更有利于油气聚集(表1)。

储层非均质性反应的是储层质量在空间上的差异变化。储层质量好的地区富含油气的可能性

表1 博兴油田0砂组相似构造条件的若干井区储集条件对比

Table 1 Comparison of reservoir bed properties in different well blocks with similar structural setting, sand group 0, Boxing oilfield

井区	井号	砂厚范围/m	平均砂厚/m	累计砂厚/m	砂地比	隔夹层数
C95-1井区	C95-2	0.8~1.2	0.9	3.8	0.19	4
	C95	0.8~1.6	1.2	4.9	0.24	4
	C95-1	0.8~1.3	1.1	4.3	0.26	4
	C95-X3	0.6~1.9	1.2	4.9	0.27	4
T85井区	T85	0.5~1.0	0.8	1.5	0.33	2
	T85-1	1.1~1.4	1.25	2.5	0.4	2
	T85-5	1.3~1.7	1.5	4.5	0.37	3
	T85-C3	0.9~1.2	1.05	2.1	0.23	2
B6-31井区	B6-31	1.2~1.3	1.25	2.5	0.21	2

大,储层质量差的地区富含油气的可能性相对较小,因此,空间上的储层非均质性与油气不均一分布特征应存在一定的联系,储层质量与储层含油性应具有正相关性。为了更直观地反映二者之间的关系,提出使用储层质量综合指数(I_{RQ})作为评价储层的指标。首先,利用主因子分析法,选取孔隙度、渗透率(对数)、砂体厚度、夹层频率、砂体比、沉积微相和成岩相^[14]等作为评价参数;其次,通过数学方法计算各影响参数的权重^[20];最后,计算各主力小层的储层质量综合指数。储层质量综合指数介于0~1之间,0代表非储层,1代表高质量均质储层,数值越大储层质量越好。分析发现,同一微相的储层质量差异不大,但不同微相之间存在明显区别,坝主体微相储层质量最优,次为坝边缘、滩席微相。不同小层由于沉积微相展布不同,储集物性差异明显,储层非均质性强,储层质量高的地区含油气性较好,这充分表明储层非均质性是导致油气不均一分布的重要原因(图4)。总体而言,研究区 I_{RQ} 一般在0.25~0.65之间,主要含油区域的 I_{RQ} 大都在0.4以上。

3.3 模拟实验

为了反映滨浅湖滩坝砂岩储层非均质性对油气运移聚集的影响,通过实验模拟了在具有储层非均质性的薄互层砂体中石油的运聚特征。实验所构建的地质模型大小为70 cm×30 cm×5 cm,设计成指状交互的样式,反映横向和纵向的储层非均质性。各砂体物性参数对比情况如表2。实验过程中利用平流泵注入油,模拟烃源岩排烃过程。注入

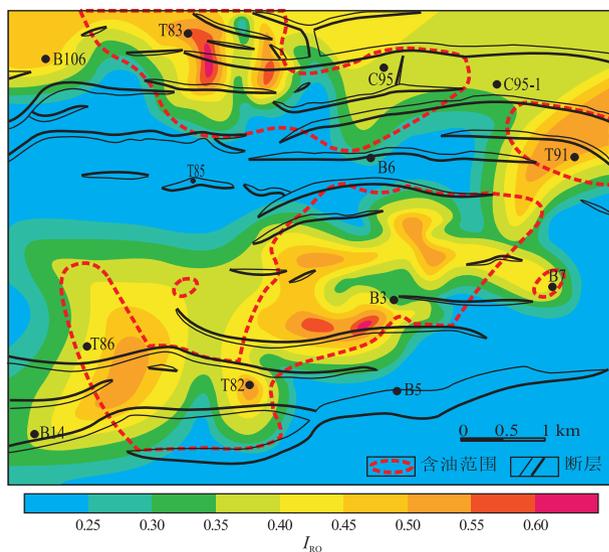


图4 博兴油田1-3-1小层 I_{RQ} 和含油范围叠合

Fig. 4 Plane distribution of I_{RQ} and oil-bearing area of 1-3-1 bed, Boxing oilfield

表2 模拟实验中各砂层的物性参数

Table 2 Physical property parameters of different sand layers in simulated experiment

层位	粒径/ mm	孔隙度/ %	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
砂体1	0.12~0.15	33	1 843
砂体2	0.15~0.20	35	2 150
砂体3	0.20~0.25	36	3 750
砂体4	0.10~0.12	29	1 018

的油为煤油,密度为0.75 g/cm³。为了使油水间有明显的颜色反差以便观察油的运移和聚集过程,实验前用微量油红将煤油染色。配制矿化度为15 g/L的盐水模拟地层水。

实验过程中,使用平流泵以侧向稳态充注的方式向砂体中注油。平流泵的初始注油流速设定为0.5 mL/min,实验进行10 h后,油主要充注在渗透率较高的砂体3中,并沿砂体3向右侧运移。在靠近注油口一侧砂体3与砂体2过渡的区域,有少量油向砂体2中扩散(图5a)。

实验进行30 h后,砂体3中含油饱和度增大,除右侧下方小面积区域外均可见油。砂体2中含油面积增大,部分油在浮力作用下由砂体3进入砂体2中。少部分油扩散进入砂体1(图5b)。

实验进行50 h后,砂体3和砂体2全部含油,砂体1中的油主要分布在中下部,顶部与砂体4过渡的区域没有进油。此状况已维持数小时,且出水口开始见油(图5c)。

加大注油流速至2 mL/min,5 h后,砂体3和砂体2中油的颜色变深,证明含油饱和度增高。砂体1全部含油,原本不含油的砂体4中进入了一定量的油。此时,出水口大量见油,出油量几乎等于注油量,注油过程结束(图5d)。

实验中,通过改变注油速率来模拟成藏动力的变化。沙四上亚段烃源岩生烃形成异常高压无疑是沙四段油气成藏的主要动力,而储层物性则决定了油气成藏阻力的大小,二者之差越小越不利于成藏。由实验结果发现,由于储层非均质性的存在,注入的油首先沿高渗透砂体3运移。由于上部的砂体粒径细,物性差,毛细管力比较大,较低的注油速率产生的动力和砂体3中油柱的浮力不足以克服砂体2中的毛细管力,所以在油量不足的初始阶段,砂体2中不含油。随着注油量的增大,浮力作用增强,当浮力的大小超过毛细管阻力的大小时,油会在浮力作用下运移至砂体2中。同理,随着砂体中的油量越来越多,油柱的浮力越来越大,砂体

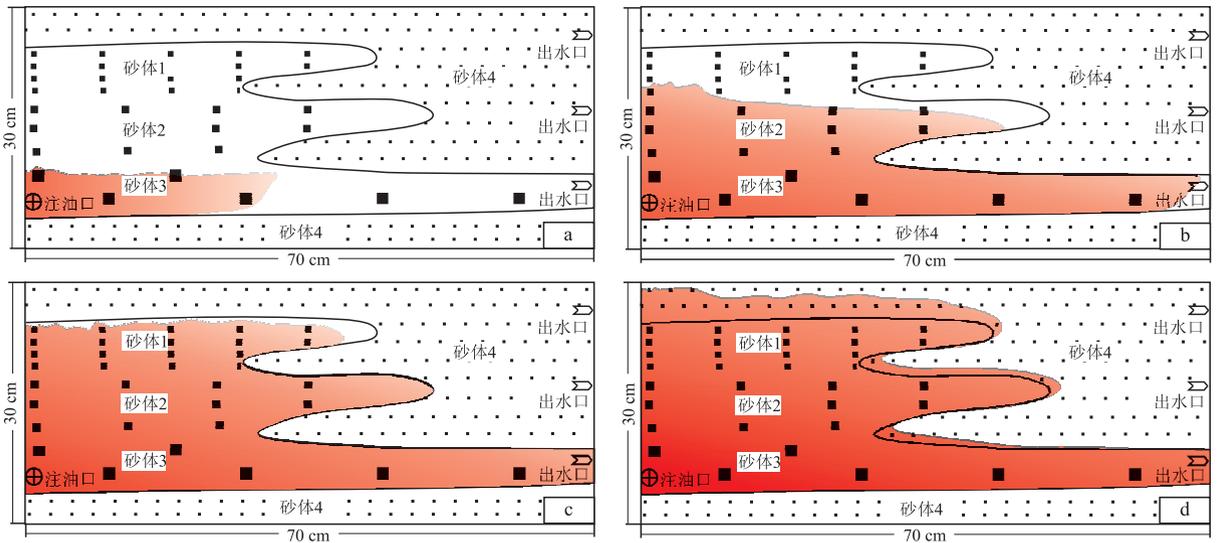


图5 模拟实验中油的运移过程示意

Fig. 5 Sketch map of hydrocarbon migration in simulated experiment

2和砂体1的含油面积逐渐增大。当达到一定程度时,在保证注油速率(成藏动力)不变的情况下,不论如何延长注油时间,砂体4中都不会含油,这是因为砂体4的储集物性相对较差,产生较大的毛细管力,即使连续油柱所产生的最大浮力也不足以克服这种毛细管力。在这种情况下,砂体4对于油的运聚是无效的。只有在提高注油速率,给油提供更大的运移动力时(地层压力累积形成幕式充注),孔隙度和渗透率较小的砂体4才能充注油。由此可见,在储层非均质性的影响下,高渗透率层对低渗透率层产生屏蔽作用,且高渗透层的渗透率越高,相对于低渗透率层的渗透率差异越大,这种屏蔽作用越明显。当渗透率差达到一定程度时,只能通过增加注油速率(成藏动力)才能使低渗透层含油。当然,如果砂体的渗透率低于某一极限值(视不同地区的情况而定)时,无论如何提高注油速率,这些砂体对于油气运聚而言都是无效的,只能起到遮挡层或盖层的作用。

4 结论

1)研究区滩坝砂体主要为滨浅湖—半深湖相沉积,纵向上呈砂泥互层状分布,单层厚度小,横向上变化快,储层非均质性较强。区域内油气分布具有较强的不均一性,经常有相邻2个砂体一个含油一个不含油的现象出现,不同砂组、不同区块的含油部位和含油面积各异。

2)储层质量与含油气性有较好的正相关性,储层非均质性对油气差异性分布构成重要的影响,并最终控制着砂层的油气充满度。实验证明,成藏动

力和成藏阻力的配置关系会影响油气的富集特征,并在一定程度上弱化储层非均质性带来的影响。

3)针对滩坝相储层的油气精细勘探,应根据不同地质背景采用不同的勘探策略。对于物性条件较差、非均质性较强的储集层,应综合评价储层的整体质量,优选“甜点”区域,以寻找岩性油气藏为主要目标。

参考文献:

- [1] 向奎,鲍志东,庄文山. 准噶尔盆地滩坝砂石油地质特征及勘探意义:以排2井沙湾组为例[J]. 石油勘探与开发,2008,35(2):195-200.
- [2] 张鑫,张金亮. 惠民凹陷中央隆起带沙四上亚段滩坝与风暴岩组合沉积[J]. 沉积学报,2009,27(2):246-253.
- [3] 杨玉芳,韩云洁,钟建华,等. 松辽盆地长垣以西高台子土层沉积特征与油气分布规律[J]. 地质学报,2011,85(8):1377-1388.
- [4] 朱菡敏,信荃麟,张晋仁. 断陷湖盆滩坝储集体沉积特征及沉积模式[J]. 沉积学报,1994,12(2):20-27.
- [5] 李秀华,肖焕钦,王宁. 东营凹陷博兴注沙四段上亚段储集层特征及油气富集规律[J]. 油气地质与采收率,2001,8(3):21-25.
- [6] 邹灵. 东营凹陷南部缓坡带沙四段滩坝砂储层分布及成藏主控因素[J]. 油气地质与采收率,2008,15(2):34-36.
- [7] 杨勇强,邱隆伟,姜在兴,等. 陆相断陷湖盆滩坝沉积模式:以东营凹陷古近系沙四上亚段为例[J]. 石油学报,2011,32(3):417-423.
- [8] 邓宏文,高晓鹏,赵宁,等. 济阳拗陷北部断陷湖盆陆源碎屑滩坝成因类型、分布规律与成藏特征[J]. 古地理学报,2010,12(6):737-747.
- [9] Houser C, Greenwood B. Profile response of a lacustrine multiple barred nearshore to a sequence of storm events[J]. Geomorphology,2005,69(2):118-137.

长旋回,即一个海进—海退沉积旋回包含了碳酸盐岩建隆生长的建造期、内置期、拓殖期和生长停止期 4 个阶段。

3) 中中新世晚期,大量碎屑物质的输入抑制了碳酸盐岩建隆的生长,并且形成了盆地南部与中部、北部碳酸盐岩建隆储集物性的差异。

4) 内置期、拓殖期的致密性储层和海侵、海退时的碎屑岩沉积与暴露地表时形成的孔渗性储集层在垂向上和侧向上形成较好的储盖组合。

参考文献:

[1] Stanton R J. Factors controlling shape and internal facies distribution of organic carbonate buildups[J]. AAPG Bulletin, 1967, 51 (12): 2462-2467.

[2] Read J F. Carbonate platform facies models[J]. AAPG Bulletin, 1985, 69(1): 1-21.

[3] Mohammad Y B, Abolins P. The petroleum geology and resources of Malaysia [M]. Kuala Lumpur: Petroliaam Nasional Berhad (Petronas), 1999: 370-392.

[4] Wilson M E J. Cenozoic carbonates in Southeast Asia: implications for equatorial carbonate development[J]. Sedimentary Geology, 2002, 147(3/4): 295-428.

[5] Vahrenkamp V C, David F, Duijndam P, et al. Growth architecture, faulting, and karstification of a middle Miocene carbonate platform, Luconia Province, offshore Sarawak, Malaysia [A]// Seismic imaging of carbonate reservoirs and systems: AAPG Memoir 81. Tulsa: AAPG, 2004: 329-350.

[6] Zampetti V, Schlager W, Everts A J, et al. Architecture and growth history of a Miocene carbonate platform from 3D seismic reflection data: Luconia province, offshore Sarawak, Malaysia[J]. Mar Petrol

Geol, 2004, 21: 517-534.

[7] Brian J. Warm-water neritic carbonate [R]. Facies Models (4), Geological Association of Canada C/O Department of Earth Sciences Memorial University of Newfoundland St. John's, Newfoundland & Labrador, Canada A1B 3X5, 2010: 341-369.

[8] Epting M. Miocene carbonate buildups of central Luconia, offshore Sarawak [J]. Atlas of seismic stratigraphy AAPG Stud Geol Ser, 1989, 3(27): 168-173.

[9] Ismail C M Z. Tectonics evolution and sedimentation history of the Sarawak basin [J]. Geol Soc Malaysia Bulletin, 1997, 41: 41-52.

[10] Vahrenkamp V C. Sr-isotope stratigraphy of Miocene carbonates, Luconia Province, Sarawak, Malaysia; implications on platform growth and demise and regional reservoir behavior [C]. AAPG 1998 annual meeting. Tulsa: AAPG, 1998.

[11] Epting M. Sedimentology of Miocene carbonate buildups, central Luconia, offshore Sarawak [J]. Bulletin Geological Society of Malaysia, 1980, 12: 17-30.

[12] Jon N. The Gomantong Limestone of eastern Borneo: a sedimentological comparison with the near-contemporaneous Luconia Province [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2001, 175: 273-302.

[13] 刘兴礼, 张贵斌, 李多丽, 等. 塔中地区下奥陶统碳酸盐岩岩溶测井特征[J]. 新疆石油地质, 2009, 30(2): 194-196.

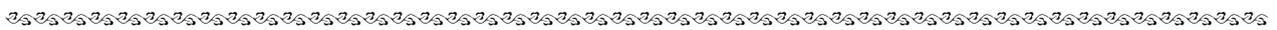
[14] 赵宗举, 周新源, 王招明, 等. 塔里木盆地奥陶系边缘相分布及储层主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(6): 738-744.

[15] 马玉波, 吴时国, 杜晓慧, 等. 西沙碳酸盐岩建隆发育模式及其主控因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(4): 59-67.

[16] 顾家裕, 马锋, 季丽丹. 碳酸盐岩台地类型、特征及主控因素[J]. 古地理学报, 2009, 11(1): 21-27.

[17] 杨剑萍, 杨君, 邓爱居, 等. 河北饶阳凹陷中央隆起带古近系沙三段上部碳酸盐岩沉积模式研究[J]. 沉积学报, 2010, 28(4): 683-687.

(编辑 徐文明)



(上接第 538 页)

[10] 李国斌, 姜在兴, 王升兰, 等. 薄互层滩坝砂体的定量预测: 以东营凹陷古近系沙四上亚段(E_4^+)为例[J]. 中国地质, 2010, 37(6): 1659-1671.

[11] 胡望水, 陈顺顺, 阎振华, 等. 高邮凹陷花庄地区阜三段储层非均质性影响因素[J]. 特种油气藏, 2011, 18(1): 21-24.

[12] 国殿斌. 东濮凹陷三叠系裂缝性砂岩储层微观孔隙结构特征[J]. 断块油气田, 2011, 18(2): 191-194.

[13] 朱筱敏, 李亚辉, 张义娜, 等. 苏北盆地东南部泰州组砂岩储层孔隙类型及有利储层评价[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(3): 246-252.

[14] 窦之林, 董春梅, 林承焰. 孤东油田七区中馆 4-馆 6 砂层组储层非均质性及其对剩余油分布的控制作用[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2002, 26(1): 8-10.

[15] 岳大力, 林承焰, 吴胜和, 等. 储层非均质定量表征方法在礁灰

岩油田开发中的应用[J]. 石油学报, 2004, 25(5): 75-79.

[16] 王化爱. 东营凹陷古近系岩性地层油气藏层序地层学特征[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(2): 158-164.

[17] 谭丽娟, 蒋有录, 苏成义, 等. 东营凹陷博兴地区烃源岩和油源特征[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2002, 26(5): 1-5.

[18] 谭丽娟, 郭松. 东营凹陷博兴油田沙四上亚段滩坝砂岩油气富集特征及成藏主控因素[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2011, 35(2): 25-31.

[19] 司学强, 张金亮, 杨子成. 博兴洼陷沙四上亚段滩坝砂岩成岩作用及其与储层质量的关系[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(2): 6-11.

[20] 杨少春, 杨兆林, 胡红波. 嫡权非均质综合指数算法及其应用[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2004, 28(1): 18-21.

(编辑 徐文明)