

文章编号: 0253-2697(2012)06-0978-09

歧口凹陷缓坡区湖泊碳酸盐岩优质储层特征及成因

杨有星 金振奎 高白水

(中国石油大学地球科学学院油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249)

摘要:针对歧口凹陷缓坡区湖泊碳酸盐岩储层非均质性强、优质储层特征及分布规律认识不清的问题,综合利用薄片观察、岩性测井响应、物性实验数据和压汞曲线等资料对储层进行综合研究。研究表明,研究区沙河街组一段下部颗粒灰岩储层是一类具有高—中孔隙度、中渗透率、低排驱压力和大喉道为主等特征的优质储层。岩石类型以亮晶生物碎屑灰岩和亮晶鲕粒灰岩为主,储集空间主要为次生的粒间溶孔和裂缝。水动力条件控制了储层的分布,强水动力条件下形成的灰岩颗粒之间以亮晶方解石胶结物充填为主,成为后期溶蚀作用的易溶物质,是次生孔隙发育的直接原因之一。鲕粒滩与生屑滩水动力条件最强,储层物性最好;滩坝边缘为间歇动荡的高能环境,储层物性中等;湖湾与潮上带为安静低能环境,储层物性较差。晚成岩期泥页岩释放出大量的有机酸和弱酸性水沿沙河街组三段顶部不整合面运移,导致碳酸盐岩储层产生了大量的次生溶蚀孔隙,是研究区优质储层形成的主要原因。同时,烃类的早期充注抑制了自生矿物的形成和方解石的交代,使溶蚀孔隙很好地保存下来。

关键词:歧口凹陷;湖泊碳酸盐岩;储集空间;优质储层;不整合面;成因机理

中图分类号:TE112.23

文献标识码:A

Characteristics and origin of lacustrine carbonate high-quality reservoirs in the slope area of Qikou sag

YANG Youxing JIN Zhenkui GAO Baishui

(State Key Laboratory of Petroleum Resource & Prospecting, College of Geosciences,

China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Grain-limestone reservoirs in the lower 1st Member of Shahejie Formation in the slope area of Qikou sag are high-quality reservoirs characterized by high-medium porosity, medium permeability, low discharge pressure, large throat and good connectivity. These reservoirs, lithologically, are composed mainly of bioclastic sparite, oolitic sparite and dolomicrite, and their major accumulation capacity consists of secondary intergranular pores and fractures characteristic of the combination of pore type and pore-fracture type. Generally speaking, hydrodynamic conditions control the distributional pattern of these reservoirs, for limestone grains filled intergranularly with sparry calcite cement are formed under strong hydrodynamic conditions, providing late dissolution with abundant soluble substances, which is one of the direct causes that result in well-developed secondary pores. Oolitic beach and bioclastic beach are under a highly-hydrodynamic condition environment and have best physical properties. Margin of beach bars is usually under an intermittent highly-hydrodynamic environment, and has medium physical properties. However, hydrodynamic conditions in lake bays and supratidal zones are low-energy and still, under which rocks are formed with bad physical properties. Well-developed oolitic beach and bioclastic beach as well as large quantities of organic acid and slightly acidic water released from surrounding shale in late diagenesis, which migrated along the top unconformity of the third Member of Shahejie Formation, resulted in the formation of large-scale secondary dissolution pores in these reservoirs. In addition, early charging of hydrocarbons restrained the occurrence of authigenic minerals and replacement of calcite, having kept dissolved pores well preserved.

Key words: Qikou sag; lacustrine carbonate; accumulation capacity; high-quality reservoir; unconformity; genetic mechanism

先前人们认为湖相碳酸盐岩在地质历史时期沉积时间较短,分布不稳定,面积较小,开发难度大。与海相碳酸盐岩相比,受重视程度很低。但随着油气资源研究工作越来越深入和精细,研究人员发现,中国陆相湖泊广泛发育,并且容易形成广泛分布的湖相碳酸盐岩,具有广阔的勘探开发前景。很多学者做了大量卓

有成效的工作^[1-3]。Williamson^[4]建立了美国 Uintah 盆地绿河组湖相碳酸盐岩沉积相模式;Swiryczuk 等^[5]建立了浪成鲕粒阶地相,波浪形成的鲕粒阶地是由一些厚约 12 m 的单个阶地组成的联合体;Bohacs 等^[6]从层序地层学和地球化学两方面对湖相盆地类型、烃源岩潜能和特征进行了综合阐述;管守锐^[7]对

基金项目:国家重大科技专项(2009ZX05009-002)资助。

第一作者及通讯作者:杨有星,男,1985年2月生,2008年获中国石油大学(北京)学士学位,现为中国石油大学(北京)博士研究生,主要从事沉积学与开发地质学等方面的研究工作。Email: yangyouxing22@163.com

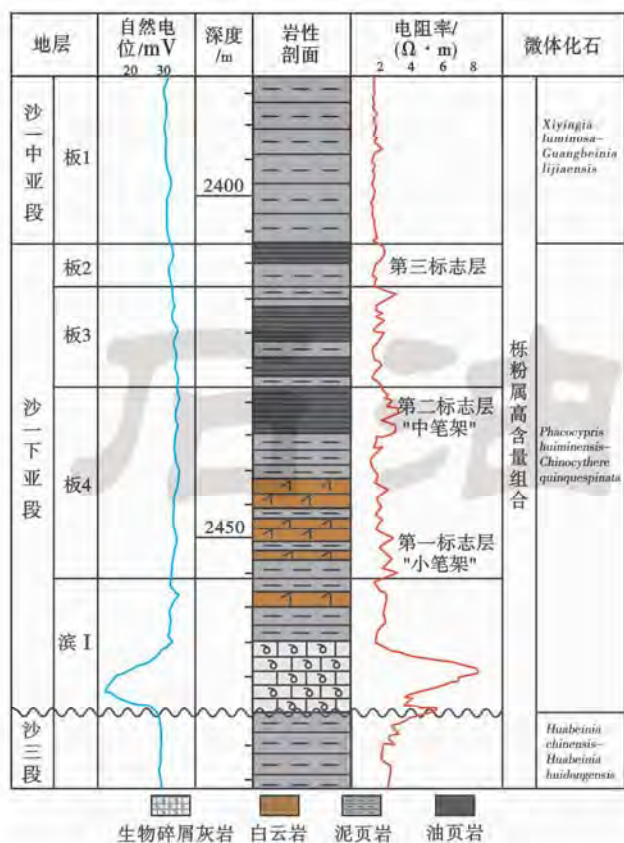


图 2 研究区沙一下亚段地层综合柱状图

Fig. 2 Generalized geological column of the first Member of Shahejie Formation in the study area

富含有机质的泥岩组成微水平层理[图 3(c)],碎屑泥质含量较多时为泥质灰岩[图 3(d)]。泥晶白云岩主要由泥晶白云石组成,灰色或灰褐色,白云石以他形为主,少量半自形[图 3(e)和(f)],单层厚 1~5 cm,常和泥岩组成薄互层,垂向上常与暗色泥岩、油页岩、钙质页岩、泥灰岩和泥晶灰岩一起出现,综合研究认为白云岩主要为埋藏白云石化作用形成^[11]。

不同碳酸盐岩类型具有不同的识别特征(表 1)。颗粒灰岩自然伽马值(GR)通常比砂泥岩低很多,泥晶灰岩、泥晶白云岩自然伽马值为最低,泥页岩的自然伽马值最高,泥灰岩和泥质白云岩的 GR 介于两者之间,且随泥质含量的增加而增大。孔渗性较好的碳酸盐岩储层的声波时差(AC)和补偿密度(DEN)值相对于致密的泥晶碳酸盐岩地层值有升高的趋势。区内渗透性碳酸盐岩地层自然电位曲线有较显著的异常,而对于非渗透性的泥质岩和泥晶碳酸盐岩,自然电位曲线(SP)为基值,没有异常。

2.2 储集空间类型

研究区内碳酸盐岩储层的孔隙类型主要为次生孔隙及裂缝,裂缝包括构造裂缝和成岩裂缝,原生孔隙较少。

2.2.1 原生孔隙

研究区内的原生孔隙包括粒间孔隙、生物体腔孔隙和晶间孔。白云石化作用导致孔隙颗粒的收

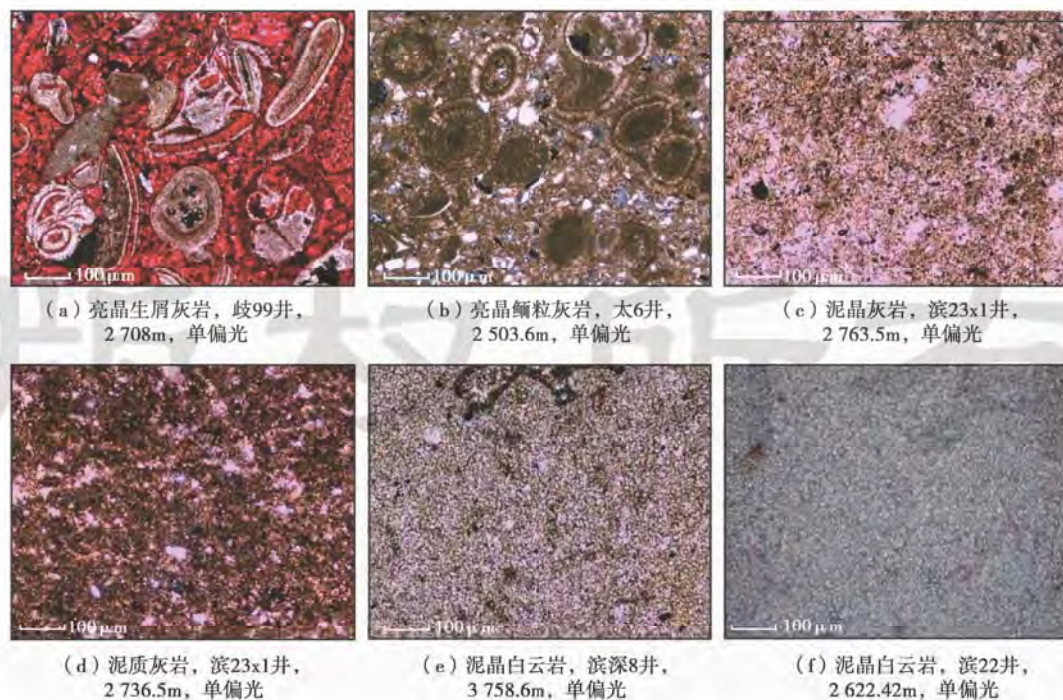


图 3 研究区主要岩石类型

Fig. 3 The main rock types of the study area

表 1 研究区碳酸盐岩类型的测井响应特征

Table 1 Logging response characteristics of different carbonate rock types

岩性	SP	GR/API	AC/($\mu\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$)	RT/($\Omega\cdot\text{m}$)	DEN/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	微电阻	曲线形态
颗粒灰岩	明显异常	40~80	170~280	3.2~10	2.3~2.5	高值,正差异	箱形、钟形、指状
泥晶灰岩	异常-基值	40~60	200~290	3.5~14	2.4~2.7	高值,锯齿状	指状、齿形
泥晶白云岩	异常-基值	40~90	220~300	3.3~15	2.5~2.8	高值,锯齿状	指状、尖峰状
灰质泥岩	基值	80~100	300~400	2.5~7	2.3~2.5	低,微齿状	齿形
泥页岩	基值	90~110	330~430	1.5~3	2.2~2.3	低值,平直状	微齿状

缩,形成一定的晶间孔,通常可使岩石孔隙度增加 12%~13%。

2.2.2 次生孔隙

研究区次生孔隙主要包括粒间溶孔、粒内溶孔、铸模孔和基质溶孔。其中,粒间溶孔是最为发育的次生孔隙类型,其次为粒内溶孔和铸模孔。

粒间溶孔是指颗粒间的基质或胶结物被溶蚀或者原生的粒间孔隙经溶蚀加大而形成的次生孔隙。镜下可见胶结物呈港湾状、弯曲状的现象[图 4(a)和(b)]。粒内溶孔是由颗粒内的部分被溶解形成的孔隙,包括鲕内溶孔、螺壳内溶孔等[图 4(c)],粒内溶孔的发育与颗粒的类别有关,并且可以与粒间溶孔连通,形成连通的储集空间。本区内的铸模孔主要是由生物碎屑和生物壳体被溶蚀,形成与颗粒形态和大小相似的孔隙[图 4(d)]。基质溶孔是指颗粒间的基质部分被溶蚀形成的孔隙,通常发育于泥晶颗粒灰岩之中,此类孔隙一般发育较少,且分布不均匀。

2.2.3 裂 缝

研究区白云岩类的储层中,白云岩单层厚度较薄,

脆性大,层数多,加之上下围岩主要为泥页岩,因此储层中裂缝较为发育,以构造裂缝为主,成岩裂缝较少。白云岩岩层主要分布在泥岩中,呈薄夹层状,主要形成细小的微裂缝,而不是厚层状白云岩中的高角度裂缝。

构造裂缝主要是在构造应力作用下,应力超过岩石的强度导致岩石破裂形成的裂缝。其特点是边缘平直、延伸远、成组出现、具有一定的方向性,通常发育在背斜构造的顶部、轴部以及断层附近及其消失部位,表现为垂向上为近等间隔平行微裂缝,缝宽小于 1 mm[图 4(e)和(f)]。通过统计裂缝发育数表明,构造裂缝在白云岩中最发育、石灰岩中次之、泥灰岩中最少。

成岩裂缝是指沉积物在成岩过程中被压实、发生失水收缩形成的裂缝,在研究区内泥晶白云岩中可见收缩成因的裂缝。这种裂缝一般延伸短、无一定的方向,裂缝面弯曲、形状不规则,多被后期溶蚀加宽。成岩裂缝不仅是油气运移的良好通道,改善了储层的渗透性,而且也可作为储集空间。

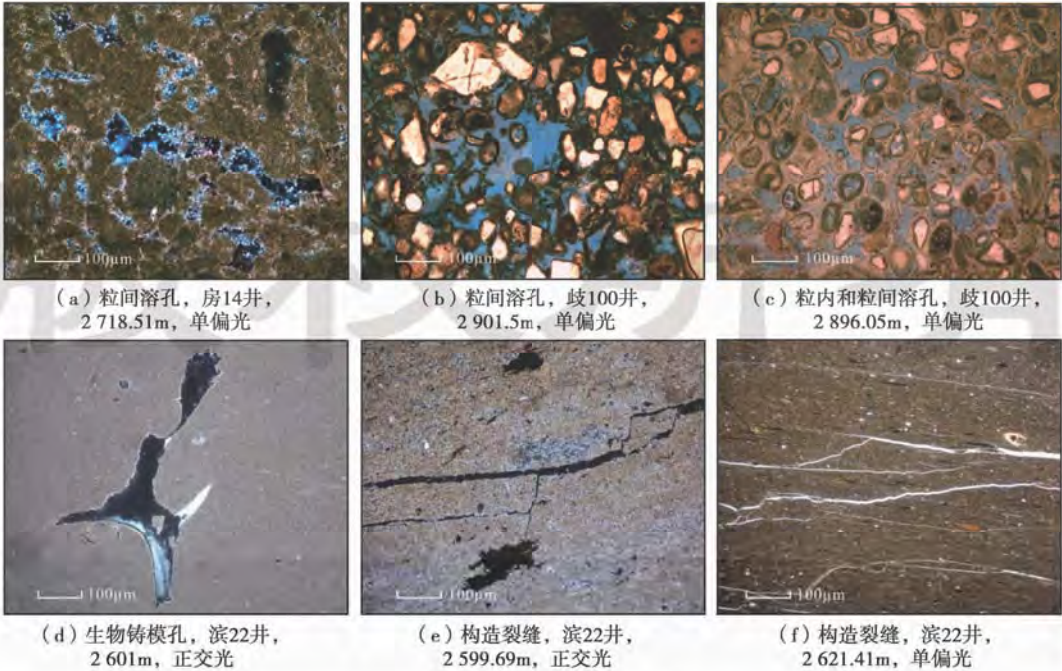


图 4 主要储集空间类型

Fig. 4 Main types of reservoir space

2.2.4 储集空间组合类型

研究区生屑灰岩储层主要以孔隙式和孔隙-裂缝式为主,白云岩类储层多以裂缝式为主。

(1) 孔隙式即储集空间和渗流通道都为孔隙。这种结构类型孔隙较大,孔渗性较好,孔隙度和渗透率呈正相关的线性关系[图 5(a)],反映了储层的孔隙度直接影响渗透率。孔隙式类型的储层主要发育在颗粒灰岩较发育的构造平缓的部位。

(2) 孔隙-裂缝式即孔隙是主要的储集空间,裂缝

是主要的渗流通道。大的裂缝也具有储集能力,当孔隙、裂缝都很发育时,储集性能将比孔隙式好。如含砾屑白云岩,在孔隙度小的范围内,也存在渗透率高的现象,说明裂缝起渗流通道的作用[图 5(b)]。

(3) 裂缝式即储集空间和渗流通道都是裂缝,这种结构类型的储层储集能力不大,但渗流条件好,主要以白云岩类储层为主。在本区岩心及薄片常见泥晶白云岩孔隙不发育,但发育多条裂缝,裂缝中含有油。

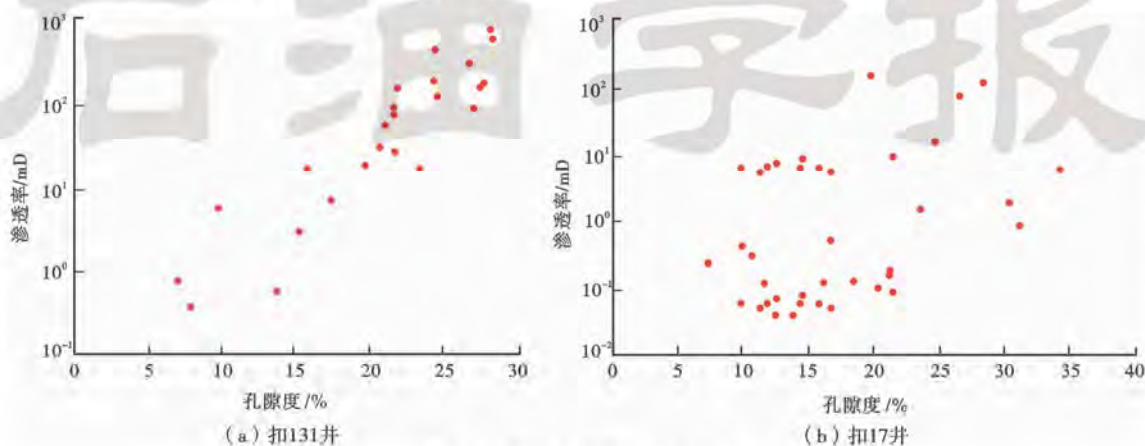


图 5 孔隙度与渗透率的关系

Fig. 5 Relationship between porosity and permeability

2.3 孔隙结构特征

孔隙结构特征是指储层岩石孔隙的喉道大小、分布和连通性等,是衡量储层渗透性好坏的主要标准之一。研究区储层孔隙结构主要分为 2 种类型:第 1 类生物碎屑灰岩储层压汞曲线呈中-粗歪度,分选好,具有中孔高渗的特征[图 6(a)];第 2 类生物碎屑灰岩储层压汞曲线呈中-细歪度,分选好,具低孔低渗特征,但孔喉分选较好[图 6(b)],其中以第 1 类为主。

2.4 物性特征

孔隙度和渗透率是评价储层物性好坏的重要依据,根据物性资料统计分析了研究区碳酸盐岩储层孔隙度与渗透率特征(图 7),孔隙度主要分布在 10%~25%,占总数的 68%,平均孔隙度为 17.3%,属于中孔储层。研究区碳酸盐岩的渗透率分布特征显示,渗透率小于 1 mD 的样品占 60%,1~10 mD 的样品数占 19.2%,10~100 mD 的样品数占 11.4%,100~1000 mD 的样品数占 9.6%,平均渗透率为 55.4 mD。

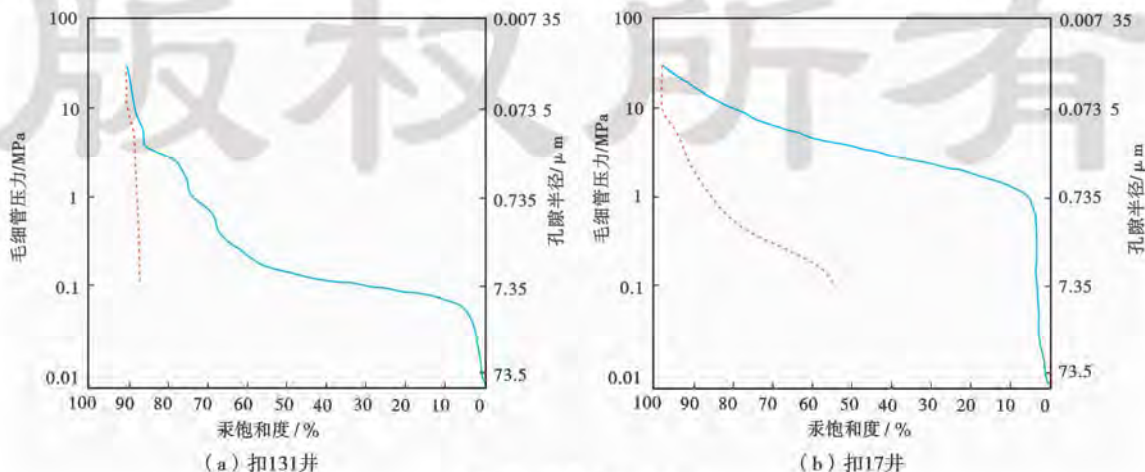


图 6 孔隙结构类型

Fig. 6 The pore structure types from intrusive mercury curve

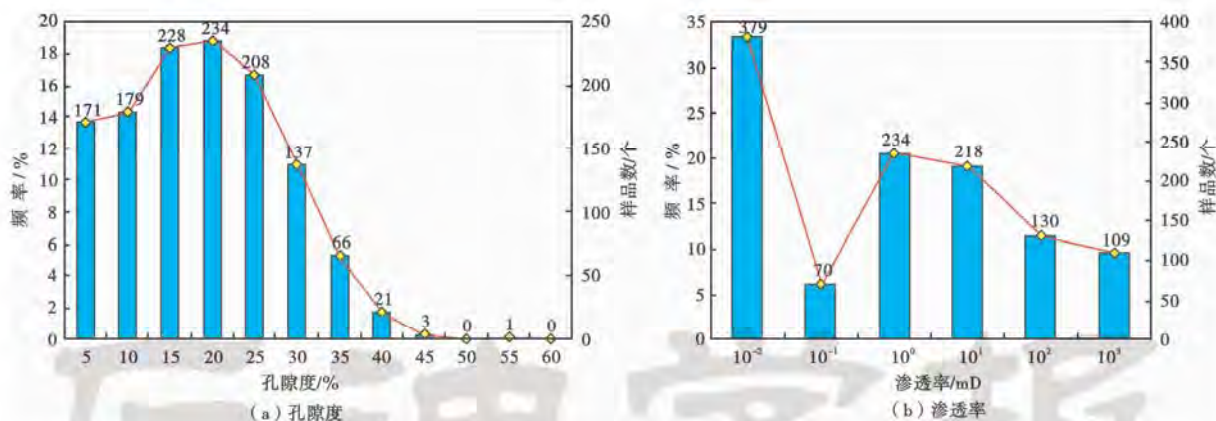


图7 沙一下亚段孔隙度和渗透率值分布频率

Fig. 7 Distribution of porosity and permeability value frequency of the first Member of Shahejie Formation

不同岩性的孔隙度和渗透率也具有较大的差异。通过统计分析研究区泥晶灰岩、泥粉晶白云岩、鲕粒灰岩、生物碎屑灰岩的孔隙度和渗透率值(图8),可以看出从泥晶灰岩到生物碎屑灰岩,孔隙度逐渐变大[图8(a)]。鲕

粒灰岩和生物碎屑灰岩可以形成中—高孔的储层,而泥粉晶白云岩和泥晶灰岩主要为低孔为主的储层。4类岩石中,生物碎屑灰岩渗透率最大,平均为60.67 mD,鲕粒灰岩次之[图8(b)]。

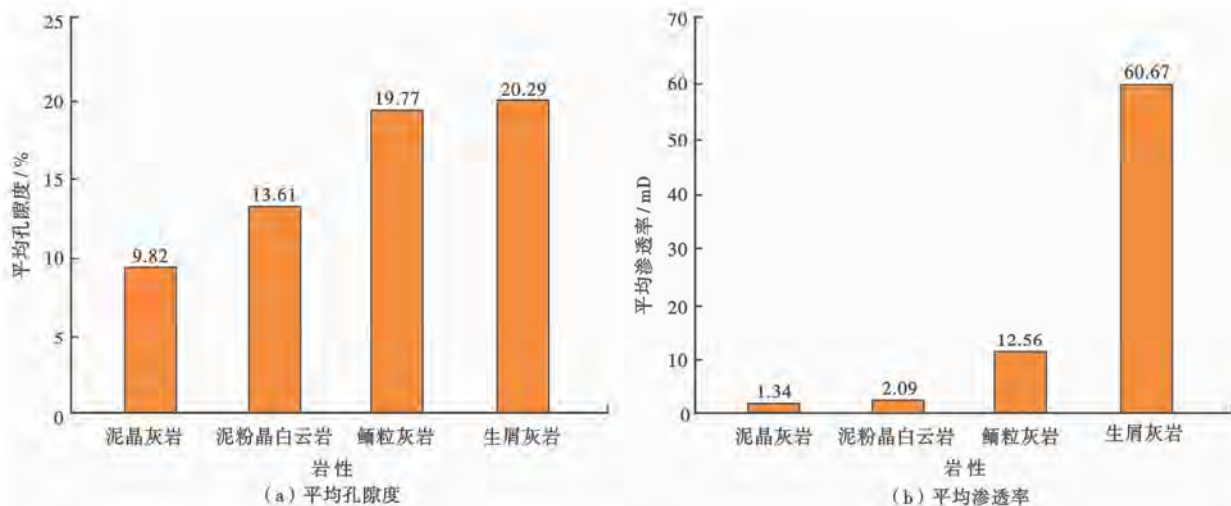


图8 不同岩性的平均孔隙度和平均渗透率

Fig. 8 Average porosity and permeability of different lithology

3 成岩作用类型

研究区内碳酸盐岩主要的成岩作用类型为溶蚀作用,交代作用、重结晶作用和胶结作用次之。

3.1 压实作用

在碳酸盐岩早期成岩作用阶段,压实作用使颗粒紧密排列,颗粒之间填隙物进一步压缩,孔隙减小[图9(a)],同时,还可发生颗粒表皮撕裂,颗粒表面揉皱,颗粒内部构造变形,有机质破碎为不规则细脉等。压实作用对储层原生孔隙有较大的破坏作用,但总体上由于胶结速度较快,压实作用很弱。

3.2 胶结作用

胶结作用主要发生于滨1和板4油组的生物碎屑灰岩、鲕粒灰岩等颗粒灰岩中,可见3个世代的胶结物。第1世代多呈暗色的针状方解石微晶,通常在沉积物沉积不久之后形成,易受后期改造,在形态上不易辨别。第2世代为栉壳状和环边状方解石颗粒,分布在颗粒边缘,方解石大多数为半自形,较为明亮干净,多在潜流带—混和水成岩环境中形成,反映了大气淡水作用的影响。第3世代呈粒状,分布于孔隙之间,晶型较好,自形,颗粒透明干净,主要形成在大气淡水成岩环境[图9(b)]。胶结作用具有双面性,在破坏原生

孔隙的同时,也降低了压实作用的影响。

3.3 交代作用

交代作用主要为白云石交代方解石、硬石膏和其他矿物,即白云化作用[图 9(c)]。白云石交代方解石过程中,溶解作用大于沉淀作用,产生溶蚀孔隙,并且由于晶粒增大,晶间孔径变大,都会使白云化石灰岩的孔隙度和渗透率增加,对岩石的孔隙度和渗透率起改善作用。

3.4 溶蚀作用

当碳酸盐岩地层中孔隙水的性质发生变化时,碳酸盐矿物或其他成分会发生化学溶解作用[图 9(d)],成岩早期的溶蚀作用常具有选择性,选择性溶蚀如鲕粒灰岩中鲕粒和部分鲕核被溶解,而其他部位没有发

生溶解作用,形成鲕粒的溶模孔隙。非选择性溶蚀发生在成岩作用晚期,由于不稳定的高镁方解石已经转变为低镁方解石,溶蚀作用多不具有选择性,常形成溶孔、溶缝、溶沟等。

3.5 重结晶作用

重结晶作用通常分为两种^[14-16]:一种为方解石矿物发生溶蚀作用之后,重新结晶形成晶形较大的矿物[图 9(e)];另一种是部分泥晶白云石发生重结晶作用变成粉晶白云石[图 9(f)]。二者岩石矿物成分不变,而矿物晶体的大小、形状和方位发生了变化。这种作用使致密、细粒结构的岩石变为粗粒结构的、疏松、多晶间孔隙的岩石,有利于地下水的渗滤,为溶蚀孔隙的发育创造条件。

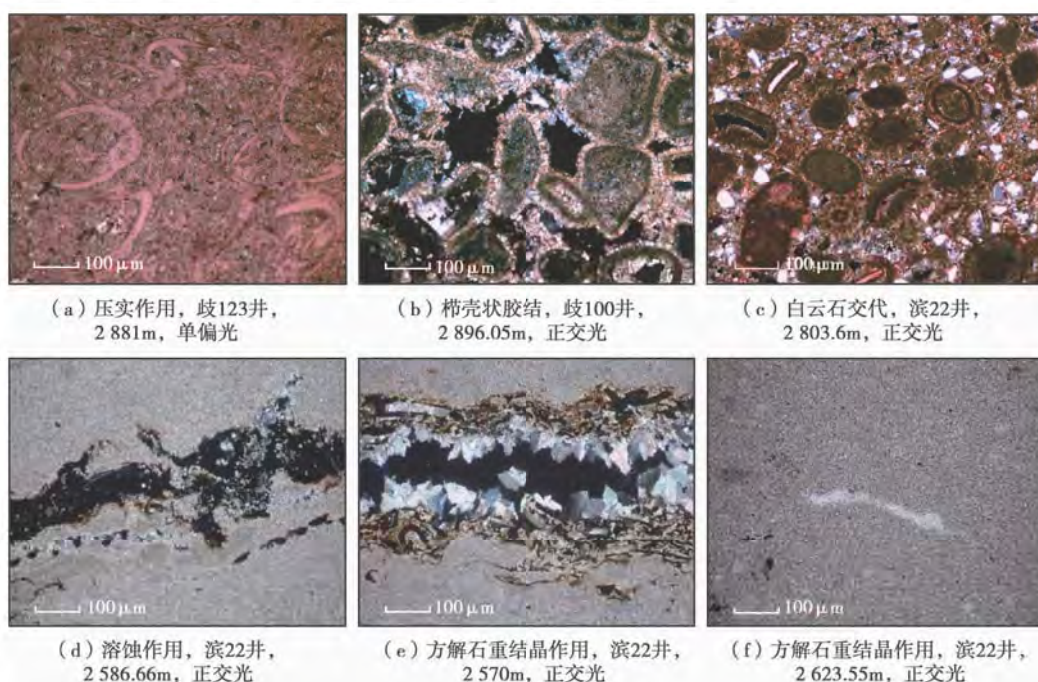


图 9 成岩作用类型

Fig. 9 Types of diagenesis

4 影响储集性能的主要因素

广泛发育的生屑滩、鲕粒滩以及晚成岩期泥页岩释放出大量的有机酸和弱酸性水沿沙河街组三段(简称沙三段)顶部不整合面运移,促进碳酸盐岩储层产生了大量的次生溶蚀孔隙,这是研究区优质储层形成的主要决定因素。同时,烃类的早期充注抑制了自生矿物的形成和方解石的交代,使溶蚀孔隙很好地保存下来。

4.1 沉积微相及岩石类型的影响

分布广泛的生屑滩和鲕粒滩是研究区优质储层形成的主要决定因素之一。沉积微相对储层发育的控制作用主要表现在对岩石类型的控制,强水动力条件下

形成的灰岩颗粒之间以亮晶方解石胶结物充填为主,这种亮晶方解石胶结物为后期溶蚀作用的易溶物质,是次生孔隙发育的直接原因之一。

鲕粒滩与生屑滩沉积微相水动力条件为持续动荡的高能环境,岩性主要为亮晶生屑灰岩、亮晶鲕粒灰岩等,其孔隙度大于 20%,渗透率大于 10 mD,储层物性最好。滩坝边缘沉积相水动力条件为间歇动荡的高能环境,岩性主要为灰泥生屑灰岩、灰泥鲕粒灰岩和鲕粒白云岩等,颗粒之间以灰泥充填为主,孔隙度为 12%~20%,渗透率为 1~10 mD,储层物性中等。湖湾与潮上带等水动力条件为安静的低能环境,岩性为泥晶灰岩、泥晶白云岩、白云质灰岩、白云岩等,孔隙度为 2%~12%,渗透率小于 1.0 mD,储层物性较差(表 2)。

表 2 不同沉积相带储层物性特征

Table 2 Reservoir physical properties of different sedimentary facies belt

沉积微相	岩性	水动力	孔隙度/%	渗透率/ mD	排驱压 力/MPa	平均喉道 半径/ μm	孔喉分 选系数	储层相对 物性
鲕粒滩、 生屑滩主体	亮晶生屑灰岩、 亮晶鲕粒灰岩	持续动荡、 高能	>20	>10	<0.5	>3.0	<0.6	好
滩坝边缘	灰泥生屑灰岩、 灰泥鲕粒灰岩/ 鲕粒白云岩	间歇动荡、 高能	$10\sim20$	$1.0\sim10$	$0.5\sim1.5$	$2.0\sim3.0$	$0.6\sim1.0$	中
湖湾、 潮上带等	泥晶灰岩、 泥晶白云岩、 白云质灰岩等	安静、 低能	$5\sim10$	<1.0	$1.5\sim3$	$0.2\sim1.0$	$1.0\sim1.5$	差

4.2 成岩作用的控制作用

大规模的溶蚀作用促进了优质储层的形成。沙一下亚段的碳酸盐岩滩体直接沉积在沙三段之上。凹陷中心沙河街组二段(简称沙二段)和沙三段中的巨厚泥质烃源岩在沙一段开始沉积时进入中等成熟阶段,在东营组沉积末期进入生油高峰。有机质在热演化过程中释放出大量的有机酸和弱酸性气体,使地层水为酸性,并沿着不整合面发生运移,促进了不整合面之上的碳酸盐岩滩体发生大规模的非选择性溶蚀作用,产生大量的次生孔隙,极大地提高了储集层的物性,也是优质储层形成的主要决定因素之一(图 10)。

4.3 裂缝发育程度的影响

在研究区白云岩类储层中,裂缝是较好储集空间[图 4(e)],又是较好的油气渗流通道,并与孔隙构成孔隙-裂缝系统。白云岩单层厚度较薄,层数多,脆性大,加之上下围岩主要为泥页岩,因此储层中裂缝较为发育。受岩石脆性影响,裂缝在白云岩中最发育、石灰岩中次之、泥灰岩中最差。质纯粒粗的碳酸盐岩脆性也大,如在亮晶生物灰岩和鲕粒灰岩中,裂缝也容易发育。在研究区发育大量低角度的断层,这些断层附近裂缝更为发育^[17-20]。因此,裂缝也是控制研究区优质白云岩类储层的主要因素之一。

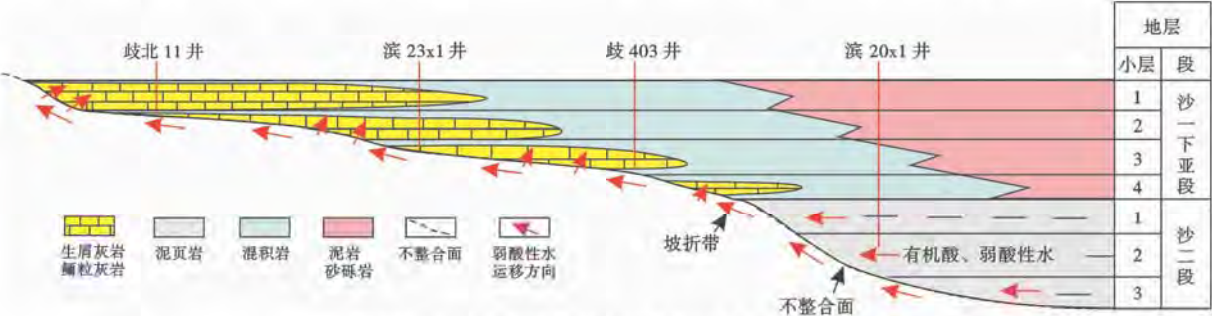


图 10 歧北缓坡区湖泊碳酸盐岩储层形成模式

Fig. 10 Reservoir formation model of lacustrine carbonate rocks in slope area of Qikou sag

4.4 烃类早期充注的影响

沙一段开始沉积时,沙三段和沙二段富含有机质的巨厚泥岩进入中等成熟阶段,烃源岩生成的油气优先进入沙一下亚段碳酸盐岩储层中,油气的注入破坏了原来的水-岩相态平衡,同时也改变了孔隙水化学组成,致使孔隙水中无机离子浓度降低,使矿物和离子之间的能量传递变得困难,进而抑制了自生矿物的形成和方解石的交代作用,使溶蚀孔隙很好地保存下来。

5 结 论

(1) 沙一下亚段优质碳酸盐岩储层岩石类型为生屑灰岩和鲕粒灰岩。储集空间主要为次生的粒间溶孔和裂缝,原生孔隙残存较少。储集空间组合类型以孔隙式和孔隙-裂缝式为主,构造裂缝在白云岩类储层中

较为发育,既是较好储集空间,又是较好的油气渗流通道。

(2) 水动力条件控制了储层的分布,强水动力条件下形成的灰岩颗粒之间以亮晶方解石胶结物充填为主,成为后期溶蚀作用的易溶物质,是次生孔隙发育的直接原因之一。鲕粒滩与生屑滩水动力条件最强,储层物性最好;滩坝边缘为间歇动荡的高能环境,储层物性中等;湖湾与潮上带为安静低能环境,储层物性较差。

(3) 沙三段和沙二段富含有机质的巨厚泥页岩在热演化过程中释放出大量的有机酸和弱酸性水,沿沙三段顶部不整合面运移,促使碳酸盐岩储层产生大量的次生溶蚀孔隙也是优质储层发育的主要因素之一;同时,烃类的早期充注抑制了自生矿物的形成和方解石的交代,使溶蚀孔隙很好地保存下来。

参考文献

- [1] 夏青松,田景春,倪新峰.湖相碳酸盐岩研究现状及意义[J].沉积与特提斯地质,2003,23(1):105-112.
Xia Qingsong, Tian Jingchun, Ni Xinfeng. Lacustrine carbonate rocks in China: an overview[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2003, 23(1): 105-112.
- [2] 廖静,董兆雄,翟桂云,等.渤海湾盆地歧口凹陷沙河街组一段下亚段湖相白云岩及其与海相白云岩的差异[J].海相油气地质,2008,13(1):18-24.
Liao Jing, Dong Zhaoxiong, Zhai Guiyun, et al. Feature of Oligocene Shahejie lower-1st member lacustrine dolostone in Qikou Depression, Bohaiwan basin, and difference of it from marine dolostone[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2008, 13(1): 18-24.
- [3] 王濮,李国发,张立勤,等.歧口凹陷西斜坡沙一段薄储层预测[J].中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(2):28-33.
Wang Pu, Li Guofa, Zhang Liqin, et al. Thin-layer reservoir prediction in the lower Es1 of the western ramp of Qikou depression[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2008, 32(2): 28-33.
- [4] Wilkinson B H, Pope B N, Owen R M. Nearshore ooid formation in a modern temperate region marl lake[J]. Journal of Geology, 1980, 88: 697-704.
- [5] Swirydzuk R. The Pliocene Glens Ferry Oolite II: sedimentology of oolitic lacustrine terrace deposits[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1980, 50: 1237-1247.
- [6] Bohacs K M, Carroll A R, Mankiewicz P J. Lake-basin type, source potential, and hydrocarbon character: an integrated sequence-stratigraphic-geochemical framework[J]. AAPG Studies in Geology, 2000, 46: 3-34.
- [7] 管守锐,白光勇,狄明信.山东平邑盆地地下第三系管庄组中段碳酸盐岩沉积特征及沉积环境[J].华东石油学院学报,1985(3):9-20.
Guan Shourui, Bai Guangyong, Di Mingxin. Sedimentary characteristics and environment of carbonate rocks in the middle member of the Guanzhuang Formation of Lower Tertiary in the Pingyi basin of Shandong province[J]. Journal of China University of Petroleum, 1985(3): 9-20.
- [8] 王英华,周书欣,张秀莲.中国湖相碳酸盐岩[M].徐州:中国矿业大学出版社,1993:1-7.
Wang Yinghua, Zhou Shuxin, Zhang Xiulian. China lacustrine carbonates[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1993: 1-7.
- [9] 吴因业,靳久强,李永铁,等.柴达木盆地西部古近系湖侵体系域及相关储集体[J].古地理学报,2003,15(2):232-242.
Wu Yinye, Jin Jiuqiang, Li Yongtie, et al. Transgressive system tracts and related reservoir bodies of Paleogene in western Qaidam Basin[J]. Journal of Paleogeography, 2003, 15(2): 232-242.
- [10] 金振奎,邹元荣,张响响,等.黄骅坳陷古近系沙河街组湖泊碳酸盐沉积相[J].古地理学报,2002,14(13):11-18.
Jin Zhenkui, Zou Yuanrong, Zhang Xiangxiang, et al. Lacustrine carbonate sedimentary facies of the Shahejie Formation of Paleogene in Huanghua Depression[J]. Journal of Paleogeography, 2002, 14(13): 11-18.
- [11] 蒲秀刚,周立宏,肖敦清,等.黄骅坳陷歧口凹陷西南缘湖相碳酸盐岩地质特征[J].石油勘探与开发,2011,38(2):136-142.
Pu Xiugang, Zhou Lihong, Xiao Dunqing, et al. Lacustrine carbonates in the southwest margin of Qikou sag, Huanghua depression, Bohai bay basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(2): 136-142.
- [12] 大港油田石油地质志编辑委员会.中国石油地质志:4卷[M].北京:石油工业出版社,1991.
Editorial Board of Petroleum Geology of Dagang Oilfield. Petroleum geology of China: Volum 4[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991.
- [13] 王战,孟任庆,解建民,等.黄骅坳陷地区地质构造演化与油气分布[M].北京:科学出版社,1999:10-25.
Wang Zhan, Meng Renqing, Xie Jianmin, et al. Huanghua depression geological tectonic evolution and hydrocarbon distribution [M]. Beijing: Science Press, 1999: 10-25.
- [14] 蒙启安,刘立,曲希玉,等.贝尔凹陷与塔南凹陷下白垩统铜钵庙组-南屯组油气储层特征及孔隙度控制作用[J].吉林大学学报:地球科学版,2010,40(6):1233-1239.
Meng Qi'an, Liu Li, Qu Xiyu, et al. Reservoir characteristics and processes controlling porosity in Tongbomiao Nantun Formation from Beier depression, China and from Tanan depression, Mongolia[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2010, 40(6): 1233-1239.
- [15] 金振奎,苏奎,苏妮娜.准噶尔盆地腹部侏罗系深部优质储层成因[J].石油学报,2011,32(1):25-31.
Jin Zhenkui, Su Kui, Su Nina. Origin of Jurassic deep burial high-quality reservoirs in the central Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 25-31.
- [16] 邓运华,张服民.歧口凹陷沙一段下部碳酸盐岩储层的成岩后生作用研究[J].石油学报,1990,11(4):33-37.
Deng Yunhua, Zhang Fumin. Epidiagenesis of carbonate rocks in the first subgroup of Shahejie Formation in Qikou depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 1990, 11(4): 33-37.
- [17] 戴俊生,陆克政,漆家福,等.渤海湾盆地早第三纪构造样式的演化[J].石油学报,1998,19(4):16-20.
Dai Junsheng, Lu Kezheng, Qi Jiafu, et al. Structure style evolution in Paleogene Bohai Bay basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(4): 16-20.
- [18] 周立宏,卢昇,肖敦清,等.渤海湾盆地歧口凹陷盆地结构构造及演化[J].天然气地球科学,2011,22(3):373-382.
Zhou Lihong, Lu Yi, Xiao Dunqing, et al. Basinal texture structure of Qikou sag in Bohai bay basin and its evolution[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(3): 373-382.
- [19] 樊敬亮,黄志全,樊卫花.歧口凹陷新生代构造演化与油气[J].吉林大学学报:地球科学版,2004,34(4):536-541.
Fan Jingliang, Huang Zhiquan, Fan Weihua. Cenozoic tectonic evolution of Qikou sag and its relations to hydrocarbon traps in Bohai Bay basin of east China[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2004, 34(4): 536-541.
- [20] 张杰,邱楠生,王昕,等.黄骅坳陷歧口凹陷热史和油气成藏史[J].石油与天然气地质,2005,26(4):506-510.
Zhang Jie, Qiu Nansheng, Wang Xin, et al. Thermal evolution and reservoiring history in Qikou sag, Huanghua depression[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(4): 506-510.

(收稿日期 2012-06-17 改回日期 2012-10-03 责任编辑 熊英)