文章编号:1673-5005(2008)02-0006-06

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

司学强, 张金亮, 杨子成

(中国海洋大学 海洋地球科学学院,山东 青岛 266100)

摘要:根据砂岩铸体薄片、扫描电镜、X-衍射、电子探针和包裹体测温分析,对博兴洼陷沙四上亚段滩坝砂岩成岩作用进行了研究。结果表明,该区沙四上亚段滩坝砂岩储层处于中成岩 A 期,压实和胶结作用破坏了砂岩的原生孔隙结构,大大降低了砂岩的储集物性;后期有机酸溶蚀作用促使砂岩次生孔隙发育,改善了部分滩坝砂岩的储集性能。该区沙四上亚段滩坝砂岩可划分为压实、方解石胶结、不稳定碎屑溶蚀和压实-弱溶蚀 4 种成岩相类型,其中不稳定碎屑溶蚀成岩相控制的储层物性最好,方解石胶结和压实-弱溶蚀成岩相控制的储层物性较差。

关键词:博兴洼陷; 沙河街组; 滩坝砂岩; 次生孔隙; 成岩作用

中图分类号:P 588.2; TE 122.24 **文献标识码**:A

Relation between beach bar sandstones diagenesis and reservoir quality in the upper Es_4 of the Palaeogene in Boxing sag

SI Xue-qiang, ZHANG Jin-liang, YANG Zi-cheng

(*College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao* 266100, *Shandong Province, China*)

Abstract: Based on the data analysis of casting lamella, scan electron microscope, X-ray diffractions, electron-microprobe and homogeneous temperature of fluid inclusions, the diagenesis of the upper Es_4 reservoir in Boxing sag was investigated. The results show that the upper Es_4 reservoir in Boxing sag is belong to the "A" middle diagenesis. The compaction and cementation damage the primary porosity which affects the reservoir quality. And the reservoir properties of part beach bar sandstone are improved by secondary porosity developed by organic acid dissolutions. According to diagenesis, the upper Es_4 beach bar sandstone reservoir can be divided into four types including compaction facies, calcite cementation facies, unstable clastic dissolution facies and compaction and weak dissolution facies. The reservoir properties of sandstone controlled by unstable clastic dissolution facies are the best, and the reservoir properties of sandstone controlled by cementation facies and compaction and weak dissolution facies are poor.

Key words: Boxing sag; Shahejie formation; beach bar sandstones; secondary porosity; diagenesis

1 地质背景

博兴洼陷为东营凹陷西南部的一个次级洼陷,位于高青-平南断层以东,石村断层以西,北到纯化、小营油田,南接鲁西隆起,平面上呈三角形地堑型式(图 1)。该区沙四上亚段为滩坝沉积,主要见于湖盆边缘、湖湾处和湖中局部隆起的周围。洼陷东部的小营、纯化、博兴油田主要以砂质滩坝沉积为主,而南部斜坡的金家、正理庄油田以砂质滩坝和生物滩坝混合沉积为主[1]。博兴洼陷发育沙三下和沙四上两套烃源岩,油气资源充足[2],对于沙四上滩坝砂岩来讲,溶蚀程度大、次生孔隙发育的砂体更易富集油气。要预测滩坝砂岩有利储集部位,研究其成岩演化是十分必要的。

2 成岩阶段的确定

根据岩石学、有机质成熟度和古温度特征,石油行业制定了碎屑岩成岩阶段划分标准(SY/T 5477-2003),将成岩阶段划分为同生成岩阶段、早成岩阶段、中成岩阶段、晚成岩阶段和表生成岩阶段。根据

收稿日期:2007-12-18

基金项目:国家"863"高技术研究发展计划项目(2006AA09Z336)

作者简介:司学强(1979-),男(汉族),山东平原人,博士研究生,主要从事沉积学与储层沉积学研究。

万方数据

此标准对博兴洼陷沙四上亚段滩坝砂岩的成岩作用进行分析。

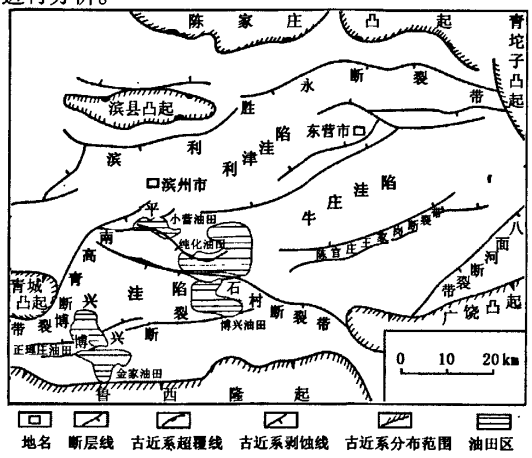


图 1　研究区区域位置图

2.1　岩石学特征

本区沙四上亚段砂质滩坝以细砂岩、粉砂岩为主,分选好,部分夹薄层介壳灰岩或鲕粒灰岩。铸体薄片分析显示,碎屑含量一般为 70% ~94%,填隙物含量为 5% ~27%,孔隙含量为 1% ~25%。陆源碎屑中石英含量为 37% ~60%,平均 42%;长石含量为 20% ~42%,平均 30%;岩屑含量为 3% ~34%,平均 16%。主要为喷出岩、石英岩、糜棱岩、方解石碎屑和沉积岩的岩屑。在福克三角分类图解中,本区沙四上亚段砂岩以岩屑长石砂岩为主,长石砂岩和长石岩屑砂岩次之。砂岩样品的 X 射线衍射分析表明,沙四上亚段矿物含量平均值为:石英 44.5%,斜长石 15.4%,钾长石 6.2%,粘土矿物 14.1%,方解石 16.1%,白云石 11%,黄铁矿 2.2%。

本区沙四上亚段滩坝砂岩中石英的自生现象比较普遍,石英加大级别为 Ⅱ 级,部分孔隙充填自生石英晶体。碳酸盐以亮晶方解石为主,部分出现含铁方解石和铁白云石。X-衍射分析显示砂岩中粘土矿物以伊利石、高岭石、绿泥石及伊-蒙混层为主(表 1)。

表 1　博兴洼陷沙四上亚段砂岩粘土矿物 X-衍射分析

井号	样品深度 H/m	矿物含量 w/%				伊-蒙混层比
		伊利石	高岭石	绿泥石	伊-蒙混层	
博 104	2147.15	25	30	12	33	30
博 16	1672.20	20	33	7	40	20
博 16	1735.40	28	17	4	51	20
博 901	2452.30	30	10	10	50	25
纯 108	3052.18	50	10	25	15	20
纯 17	2295.00	58	5	3	64	40
梁 218	3232.60	38	12	28	22	20
梁 232	1911.30	25	46	7	22	20
梁 225	2241.00	16	48	12	24	20
梁 230	2644.65	50	40	3	7	20

2.2　有机质成熟度

沙四上亚段沉积时期,博兴洼陷为半咸水型沉积环境,沉积中心位于博兴洼陷中北部,沉积厚度一般为 100 ~250 m,主要为灰色和深灰色泥岩,夹有薄层油页岩、白云岩、白云质灰岩[2]。沙四上亚段烃源岩富含藻类,干酪根类型为 Ⅰ 型和 Ⅱ 型;有机碳含量大于 1.5 %,氯仿沥青"A"含量大于 0.15 %,镜质体反射率为 0.5 % ~0.6 %。反映沙四上亚段有机质成熟度的指标中,$w(Pr)/w(nC_{17})$ 平均为 0.99,$w(Ph)/w(nC_{18})$ 达 2.66,$w(Tm)/w(Ts)$ 为 0.7 ~4.43,$w(C_{29}$甾烷 20S$)/w(20S+20R)$ 为 0.2 ~0.48。可见,目前沙四上烃源岩有机质已处于成熟阶段,是大量烃类生成的高峰期。

2.3　古成岩温度

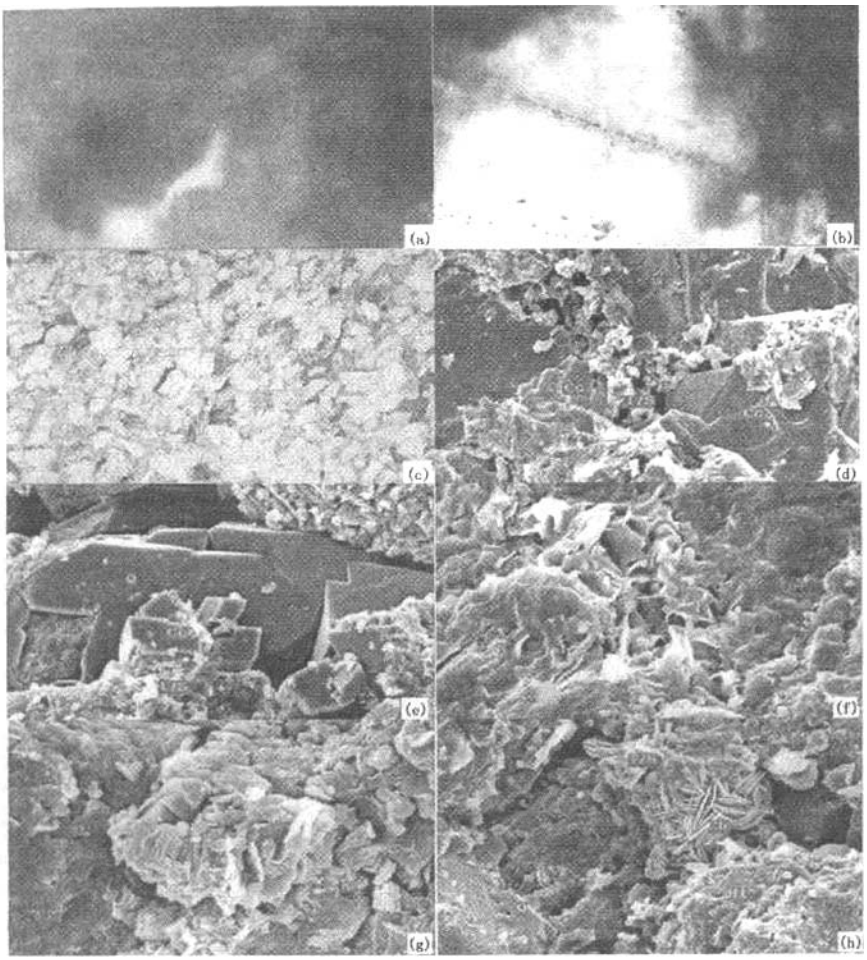
古成岩温度可以通过包裹体测温获得[3-4]。该区滩坝砂岩中既有油气包裹体,又有盐水包裹体。油气包裹体透光下颜色以淡褐色、褐色为主,在荧光照射下发黄绿色,多数分布于石英颗粒次生加大边中,部分分布于愈合的石英裂缝或微晶石英中,大小为 5 ~30 μm,形状多为椭圆形和圆形,少量为不规则状或伸长状(图 2(a))。盐水溶液包裹体个体不大,一般为 2 ~5 μm,个别大于 7 μm,有圆形、椭圆形、长条形等;颜色以浅色为主,少量为无色或淡黄色;在石英裂隙和加大边中都有产出,也有少量串珠状排列或沿面状产出(图 2(b))。该区砂岩中包裹体的均一温度分布范围相对较宽,为 68 ~128 ℃,主体介于 90 ~110 ℃。结合包裹体的产状可以发现处于石英早期加大边中的包裹体均一温度一般低于 90 ℃;而处于晚期石英加大边或微晶石英晶体内的包裹体均一温度为 90 ~120 ℃(表 2)。这说明较低均一温度的包裹体形成于早成岩阶段,而具有较高均一温度的包裹体则是中成岩阶段的产物。

根据对砂岩岩石学、烃源岩有机质成熟度和成岩古温度的分析,可确定该区砂岩储层处于中成岩 A 期。

表 2　博兴洼陷沙四上滩坝砂岩流体包裹体主要特征参数

井号	深度 H/m	岩性	包裹体分布	均一温度 T/℃
纯 107	2871.29	细砂岩	石英加大边	95.2
纯 17	2348.5	粉砂岩	裂隙中	108
纯 79	2365.1	粉砂岩	裂隙中	105
纯 6-23	2317.0	细砂岩	石英加大边	107.7
梁 206	2800.21	粉砂岩	裂隙中	114
梁 218	3165.1	细砂岩	微晶石英	119
梁 230	2641.8	粉砂岩	裂隙中	109
博 11	2621.1	细砂岩	裂隙中	95
金 29	1069.6	细砂岩	石英加大边	110

万方数据



(a)纯 371 井,2 695.3 m,荧光下油气包裹体,25×8 倍;(b)纯 79 井,2 365.1 m,可见光下串珠状盐水包裹体,10×40 倍;(c)纯 107 井,2 869.3 m,铸体薄片,压实作用特征,10×10 倍;(d)梁 230 井,2640.5 m,粒间方解石胶结物;(e)纯 79 井,2 365.1 m,粒间石英加大现象;(f)纯 107 井,2 869.7 m,颗粒表面片状伊利石;(g)纯 79 井,2 384.2 m,粒间充填书页状高岭石;(h)梁 213 井,2853.7 m,针状绿泥石和片状伊-蒙混层

图 2　岩石薄片电镜扫描照片

3　成岩作用特征

砂岩储层的成岩演化是一个复杂的物理化学变化过程[5-8],该区砂岩已达到中成岩 A 期,主要经历了压实作用、胶结作用、粘土矿物的自生演化及溶蚀作用(图 3)。

3.1　压实作用

对本区 19 口井的 55 块砂岩铸体薄片观察可见以下特征:软性碎屑颗粒经压实后变形,泥质岩屑呈假杂基状;刚性颗粒因挤压形成不规则裂纹,碎屑颗粒多以线-线接触,局部碎屑颗粒发生压溶,呈凹凸状接触(图 2(c))。这些特征反映了该区压实作用较为强烈。强烈的压实作用造成原生孔隙大量丧失,物性急剧变差,铸体薄片面孔率为 1% ~19%,平均 10.02%。但也有部分孔隙被早期方解石胶结物所充填,胶结物在孔隙中起到了支撑作用,从而抑制了压实作用的进行,阻止了碎屑颗粒的相互接触。

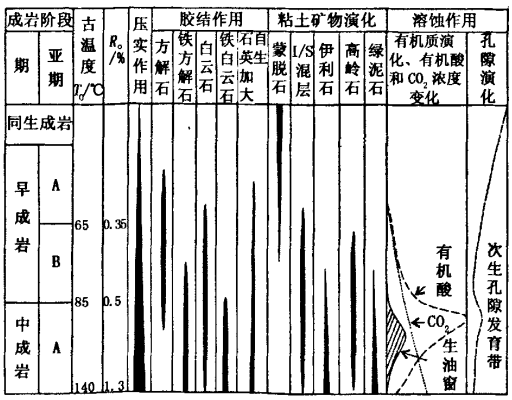


图 3　博兴洼陷沙四上亚段滩坝砂岩成岩演化

万方数据

3.2　胶结作用

3.2.1　碳酸盐胶结

碳酸盐是该区最主要的胶结物。亮晶方解石一般是早成岩 B 期的产物,对 55 块样品统计得出,方解石含量一般为 3% ~10%,个别样品中方解石含量高达 30%。早期方解石的形成导致原生粒间孔的封闭和半封闭(图 2(d)),使储层孔隙度急剧下降。在早期方解石胶结严重的部位,其后期溶蚀作用也很弱。白云石多形成于早成岩 B 期和中成岩 A 期,呈斑点状分布,局部富集,多是孔隙溶液直接沉淀的产物,也有部分是白云石交代方解石的产物。铁方解石和铁白云石常充填粒间孔和骨架颗粒溶孔,镜下观察可见部分铁白云石和铁方解石与碎屑颗粒呈镶嵌状,这是其交代碎屑颗粒的结果。电子探针分析给出了方解石、白云石和铁白云石的成分特征(表 3)。

3.2.2　石英加大与自生

该区石英加大和自生现象主要发生在早成岩 B 期及中成岩 A 期。镜下特征显示,石英加大和自生程度受早期方解石胶结作用的影响。在早期方解石胶结不严重的区域,石英加大和自生现象较为普遍;在碳酸盐胶结物发育的情况下,石英加大级别较低,自生微晶石英颗粒较小。阴极发光显微镜下陆源碎屑石英颗粒显暗紫色或蓝紫色,而石英加大边不发光,可以识别出石英的生长界限。石英的生长形态与颗粒周围孔隙的空间特点有关,当颗粒周围孔隙空间充分时,石英趋于表现自形的外貌,在扫描电镜下可见石英次生加大和微晶石英充填粒间孔隙的特征(图 2(e))。

表 3　博兴洼陷沙四上亚段砂岩碳酸盐胶结物电子探针分析结果

井号	深度 H/m	探测点矿物类型	氧化物含量 w/%									
			Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	FeO	CaO	TiO_2	MnO	总量
纯 106	2884.1	粒间方解石晶体	0.27	0.18	0.21	1.18	0.29	0.78	52.65	0.00	0.00	55.56
纯 11	2244.1	粒间方解石晶体	0.25	0.59	0.77	1.92	0.22	0.79	52.3	0.00	0.00	56.84
纯 79	2377.3	粒间方解石晶体	0.26	0.45	0.14	0.04	0.11	0.26	55.55	0.00	0.09	56.81
纯 374	2439.1	孔隙充填方解石	0.31	0.90	0.76	4.65	0.15	0.64	53.48	0.14	0.12	61.15
梁 209	2916.9	粒间含铁白云石晶体	0.00	14.7	0.34	0.42	0.00	6.56	32.27	0.00	0.34	54.63
樊 134	2938.3	白云石交代钾长石	0.09	12.1	0.17	0.24	0.00	9.55	33.8	0.00	0.75	56.70

3.3　粘土矿物的演化

中成岩 A 期,本区滩坝砂岩中自生粘土矿物主要类型有伊利石、高岭石、绿泥石、伊-蒙混层等,其含量变化较大。统计发现,在砂坝分布区粘土矿物含量低,一般小于 5%,在滩砂分布区粘土矿物含量一般为 5% ~10%。伊利石通常呈颗粒包膜或孔隙衬边的形式产出,有的呈网状分布于孔隙中(图 2(f))。伊利石分布于各种不同成分的砂岩中,其结晶随埋藏深度增大而变好,最后转化成绢云母。高岭石在该区砂岩中最常见的产状是孔隙充填,晶形发育良好的自生高岭石大多分布在一些分选好、孔隙发育的砂岩中(图 2(g))。自生高岭石的沉淀需要孔隙水中有足够的铝离子和二氧化硅,它们除了来源于循环的孔隙水外,还可来自砂岩内部长石的蚀变。埋藏较深的砂岩中,自生绿泥石主要以孔隙充填形式出现,孔隙充填绿泥石表现为较好的花朵状和叶片状晶体,并与石英和伊利石等共生(图 2(h))。伊-蒙混层形态介于伊利石和蒙脱石之间,在电镜下多以孔隙衬垫和充填的形式出现。

3.4　溶蚀作用

3.4.1　次生孔隙的形成

矿物的选择性溶解作用是砂岩次生孔隙产生的主要原因。据铸体薄片和扫描电镜观察发现,本区滩坝砂岩中发生溶蚀的主要是铝硅酸盐矿物,其次是碳酸盐矿物。砂岩次生孔隙成因机制的观点较多,典型的有地层水说、烃类生物降解溶蚀说、氢硫酸溶蚀说、大气水淋滤说等[9-10]。近年来,又有学者重新提出 CO_2 无机成因说,使次生孔隙的形成机制进一步完善。综合各种理论,从机理上看,砂岩的溶蚀及次生孔隙的形成都可归结到与有机酸和无机酸有关[11]。目前,博兴凹陷沙四上亚段的烃源岩已达到成熟阶段,在有机质成熟前的演化阶段,正是有机酸和 CO_2 大量生成的时期,因此可以推测有机酸和 CO_2 对该区砂岩次生孔隙的生成起着主要作用。

中成岩 A 期对应的烃源岩已处于成熟阶段,在有机质演化过程中不仅产生了烃类,而且产生了 CO_2 和有机酸。前人曾经对比了碳酸和有机酸的反应能力,得出有机酸供给氢离子的能力是碳酸供给氢离子能力的 6 ~350 倍[12-13],可见次生孔隙形成过程中,有机酸的作用要大于碳酸的。CO_2 溶于孔隙水形成碳酸,加上大量有机酸的注入,孔隙水的 pH 值明显下降。本区部分砂岩早期碳酸盐矿物胶结严重,甚至堵塞了孔隙水的流通渠道,使周围的碎屑颗粒无法接受酸性孔隙水的溶蚀,导致次生孔隙不发育;在碳酸盐胶结较弱的砂岩中,有机酸对矿物的溶蚀作用较明显。有机酸阴离子可以络合并迁移铝硅

万方数据

酸盐中的 Al 离子,促使长石等铝硅酸盐大量溶解,产生了大量粒间孔、粒内孔及铸模孔。反应方程如下:

$KAlSi_3O_8 + H_2C_2O_4 + 8H_2O + 2H^+ \longrightarrow 3HSiO_4 + AlC_2O_4 \cdot 4H_2O$(络合物) $+ K^+$.

另外,有机酸也与碳酸盐矿物作用形成次生孔隙:

$CaCO_3 + H^+ \rightarrow Ca^{2+} + HCO_3^-$.

次生孔隙大量生成后,对应烃源岩的有机质达到成熟阶段,进入油气生成的高峰期。由于油气的充注,矿物的溶蚀受到抑制,阻碍了次生孔隙的进一步发育(图 3)。

3.4.2 次生孔隙类型

溶蚀作用促进了次生孔隙的发育,在一定程度上改善了滩坝砂体储层的物性。统计结果表明,坝砂的孔隙度一般为 10% ~20%,滩砂的相对较小,一般在 10% 以下。本区次生孔隙的主要类型为粒间孔(5.57%)、粒内溶孔(2.43%)、铸模孔(2.43%),少量样品可见特大孔、裂缝孔隙。镜下观察发现,对于碳酸盐胶结物含量高的样品粒内溶孔和铸模孔相对较发育,粒间孔较少;而对于碳酸盐胶结物含量低的样品,各类孔隙均较发育。

4 成岩作用对储层质量的影响

成岩相是砂岩成岩特征的总和,是成岩环境的产物,是砂岩碎屑组分、胶结特点以及孔隙结构特征的综合概括。成岩相类型与储层的质量有密切关系,许多学者对成岩相进行了划分[14]。划分成岩相的主要依据有胶结物的性质和产状、碎屑颗粒的性质与含量、孔隙结构特征等。博兴洼陷沙四上亚段滩坝砂岩可划分为压实、不稳定碎屑溶蚀、方解石胶结和压实-弱溶蚀 4 种成岩相类型(图 4)。成岩相直接影响了该区滩坝砂岩的储集性。

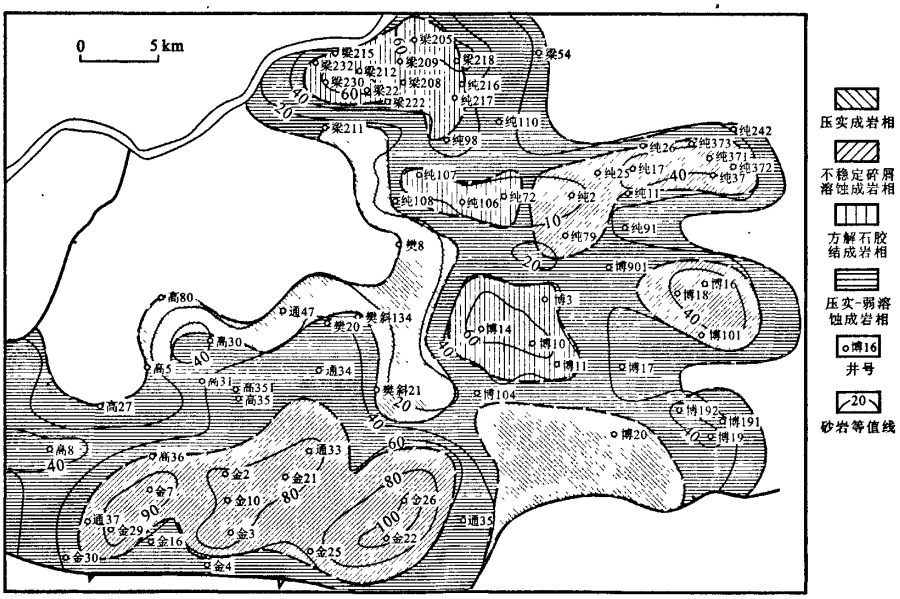


图 4　博兴洼陷沙四上亚段滩坝砂岩成岩相分布

博兴洼陷滩坝砂体分布较广,其不稳定碎屑溶蚀成岩相为较好的油气储层。该储层砂岩分选好,方解石胶结程度较低,在有机酸的作用下,大量长石等碎屑矿物溶解,形成良好的次生孔隙,铸体薄片观察可见部分颗粒呈漂浮状态。该成岩相储层的孔隙度一般为 15% ~30%,渗透率为 $(10 \sim 100) \times 10^{-3}\ \mu m^2$。在部分滩坝砂岩中,早期的碳酸盐胶结物非常发育,特别是大量亮晶方解石嵌于孔隙中,使原生孔隙度急剧下降,这类储层属于碳酸盐胶结成岩相。后期碳酸盐溶蚀程度较低,但部分碎屑颗粒发生了粒内溶蚀现象,这在一定程度上改善了储层物性。该类砂岩储层孔隙度一般为 5% ~15%,渗透率为 $(1 \sim 50) \times 10^{-3}\ \mu m^2$。在砂坝的边缘部位及滩砂中,颗粒较细,粘土矿物含量较高,压实成岩作用较强,在有机酸作用下部分碎屑颗粒及胶结物发生溶蚀,产生少量次生孔隙,称之为压实-弱溶蚀成岩相储层。在较薄的滩砂发育区,压实作用非常强,一般发育压实成岩相,这类砂岩层基本不具储集性能。

5 结　论

(1)博兴洼陷沙四上亚段滩坝砂岩储层处于中

万方数据

成岩A期,并可划分为压实、方解石胶结、不稳定碎屑溶蚀和压实-弱溶蚀4种成岩相类型。

(2)在成岩早期,压实和胶结作用大大损害了该区滩坝砂岩的储集物性,特别是早期方解石胶结对原生孔隙的破坏作用较大。

(3)在方解石胶结不严重的砂岩中,后期有机酸的溶蚀作用促使了砂岩次生孔隙的发育,形成了大量的粒间孔、粒内孔及铸模孔,从而改善了部分滩坝砂岩的储集性能。不稳定碎屑溶蚀成岩相控制的储层物性最好,可成为良好的油气储集层。

参考文献:

[1] 苏永进,蒋有录,廉庆存,等.博兴洼陷下第三系沙四上亚段和沙三段岩性油藏形成机制[J].石油学报,2005,26(5):28-32.
SU Yong-jin, JIANG You-lu, LIAN Qing-cun, et al. Forming mechanism of lithologic reservoir in the upper Es_4 and Es_3 of the Palaeogene in Boxing sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005,26(5):28-32.

[2] 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].石油大学学报:自然科学版,2002,26(5):1-4.
TAN Li-juan, JIANG You-lu, SU Cheng-yi, et al. Characteristics of hydrocarbon source rock and oil source correlation in Boxing area of Dongying depression[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science),2002,26(5):1-4.

[3] 郑浚茂,庞明.碎屑储集岩的成岩作用研究[M].武汉:中国地质大学出版社,1989:86-98.

[4] 刘林玉,曹青,柳益群,等.白马南地区长8_1砂岩成岩作用及其对储层的影响[J].地质学报,2006,80(5):712-717.
LIU Lin-yu, CAO Qing, LIU Yi-qun, et al. Chang 8_1 sandstone diagenesis and the influence on Chang 8_1 reservoir of south area of Baima, Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2006,80(5):712-717.

[5] MARCHANT M E, SMALLEY P C, HASZELDINE R S, et al. Note on the importance of hydrocarbon fill for reservoir quality prediction in sandstones[J]. AAPG Bulletin, 2002,86(9):1561-1571.

[6] WESCOTT W A. Diagenesis of cotton valley sandstone, east Texas: implication for tight gas formation pay recognition[J]. AAPG Bulletin,1983,67(6):1002-1013.

[7] 张琴,钟大康,朱筱敏,等.东营凹陷下第三系碎屑岩储层孔隙演化与次生孔隙成因[J].石油与天然气地质,2003,24(3):281-285.
ZHANG Qin, ZHONG Da-kang, ZHU Xiao-min, et al. Pore evolution and genesis of secondary pores in paleogene clastic reservoirs in Dongying sag[J]. Oil & Gas Geology, 2003,24(3):281-285.

[8] 陈永峤,于兴河,周新桂,等.东营凹陷各构造区带下第三系成岩演化与次生孔隙发育规律研究[J].天然气地球科学,2004,15(1):68-74.
CHEN Yong-qiao, YU Xing-he, ZHOU Xin-gui, et al. Research on diagenetic evolutive succession and occurrence of secondary porosity of lower Tertiary in different structural belt of Dongying depresion[J]. Natural Gas Geoscience, 2004,15(1):68-74.

[9] 李忠,陈景山,关平.含油气盆地成岩作用的科学问题及研究前沿[J].岩石学报,2006,22(8):2113-2122.
LI Zhong, CHEN Jing-shan, GUAN Ping. Scientific problems and frontiers of sedimentary diagenesis research in oil gas-bearing basins [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006,22(8):2113-2122.

[10] 向廷生,蔡春芳,付华娥.不同温度、羧酸溶液中长石溶解模拟实验[J].沉积学报,2004,22(4):597-602.
XIANG Ting-sheng, CAI Chun-fang, FU Hua-e. Dissolution of microcline by carboxylic acids at different temperatures and complexing reaction of Al anion with carboxylic acid in aqueous solution[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004,22(4):597-602.

[11] 林壬子,张金亮.陆相储层沉积学进展[M].北京:石油工业出版社,1996.

[12] 赵国泉,李凯明,赵海玲,等.鄂尔多斯盆地上古生界天然气储集层长石的溶蚀与次生孔隙的形成[J].石油勘探与开发,2005,32(1):53-55.
ZHAO Guo-quan, LI Kai-ming, ZHAO Hai-ling, et al. Feldspar corrosion and secondary pore formation in the upper Paleozoic gas reservoir, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development,2005,32(1):53-55.

[13] 郭春清,沈忠民,张林晔,等.砂岩储层中有机酸对主要矿物的溶蚀作用及机理研究综述[J].地质地球化学,2003,31(3):53-57.
GUO Chun-qing, SHEN Zhong-min, ZHANG Lin-ye, et al. The corrosion and its mechanism of organic acids on main minerals in oil-gas reservoir sand rocks[J]. Geology-geochemistry, 2003,31(3): 53-57.

[14] 张金亮,杜桂林.塔中地区志留系沥青砂岩成岩作用及其对储层性质的影响[J].矿物岩石,2006,26(3):85-93.
ZHANG Jin-liang, DU Gui-lin. Diagenesis of Silurian asphalt sandstone in Tazhong area and its impact on reservoir quality[J]. Mineral Petrol, 2006,26(3):85-93.

(编辑 刘艳荣)

万方数据