

# 辽东湾海域古近系沙河街组钙质砂岩 成因机制和控制因素

韩雪芳,刘宗宾,李云鹏,文佳涛,王 腾

(中海石油(中国)有限公司天津分公司 渤海石油研究院,天津 300459)

**摘要:**辽东湾海域古近系沙河街组具有丰富的油气资源,是中深层油气藏勘探开发的重要方向。J油田为辽东湾海域典型的中深层油藏,已钻探的开发井普遍钻遇钙质砂岩,极大影响储层品质,制约油田开发效果。根据岩心、薄片、扫描电镜及钻井、测井资料,对J油田沙二段钙质砂岩的成因机制及控制因素进行研究。结果表明:钙质砂岩的形成和展布受沉积作用和成岩作用的共同影响。受砂岩顶、底部泥岩成岩作用影响,钙质砂岩具有粒度细、含油性差、物性差、密度高等特点。受沉积作用影响,在垂向上,砂岩的沉积厚度和沉积韵律控制碳酸盐胶结的类型和发育部位;平面上,沉积相带和泥岩厚度影响钙质砂岩的平面展布和胶结强度。基于研究区沙一段泥岩和沙二段砂岩平面分布特征,预测沙二段钙质砂岩平面展布规律,认为砂岩厚度相对较薄、泥岩厚度相对较大的湖盆中央为研究区钙质砂岩发育带,其储层品质受钙质砂岩发育程度影响。

**关键词:**中深层 钙质砂岩 碳酸盐胶结 成因机制 控制因素 展布规律

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

## Genetic mechanism and controlling factors of calcareous sandstone of the Paleogene Shahejie Formation, Liaodong Gulf

HAN Xuefang, LIU Zongbin, LI Yunpeng, WEN Jiatao, WANG Teng

(Bohai Petroleum Research Institute, Tianjin Branch, CNOOC Limited, Tianjin City, 300459, China)

**Abstract:** The Paleogene Shahejie Formation in Liaodong Gulf area is rich in oil and gas resources, which is an important target for exploration and development of middle-to-deep hydrocarbon reservoirs. J Oilfield is a typical middle-to-deep hydrocarbon reservoirs in Liaodong Gulf. The calcareous sandstone was drilled by development wells there, which affected the quality of reservoirs and restricted the effect of oil field development. Based on the core, thin section, SEM, drilling and logging data, the characteristics and genetic mechanism of calcareous sandstone and its controlling factors of the second member of Shahejie Formation in J oilfield were discussed. The results show that the formation and distribution of calcareous sandstone are affected by both sedimentation and diagenesis. The calcareous sandstone is characterized by fine granularity, low oil saturation, poor physical property and high density, which is resulted from the diagenesis of shale at the top and bottom of the sandstone. Affected by the sedimentation, the type and vertical position of carbonate cementation are controlled by the sediment thickness and rhythm of sandstone, while the sedimentary facies and mudstone thickness affect the horizontal distribution and cementation degree of the calcareous sandstone. Based on the horizontal distribution characteristics of the mudstone in the first member and the sandstone in the second member of Shahejie Formation, the horizontal distribution of the calcareous sandstone in the second member of Shahejie Formation was predicted. The center of the basin, characterized by thin sandstone and thick mudstone, is the favorable development area of calcareous sandstone and its development degree controls the quality of reservoirs.

**Key words:** middle-to-deep reservoir; calcareous sandstone; carbonate cementation; genetic mechanism; controlling fac-

收稿日期:2018-03-20。

作者简介:韩雪芳(1984—),女,山东平阴人,工程师,硕士,从事油气田开发地质方面的研究。联系电话:13920208564, E-mail:hanxf@cnooc.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项“渤海油田加密调整及提高采收率油藏工程技术示范”(2016ZX05058-001)。

tors; distribution regularity

近年来,具有丰富油气资源的中深层油气藏在油田的增产稳产中具有举足轻重的作用,已成为中国油气勘探开发的重要方向。中深层油气藏储层变化快、埋深较大、构造和成岩作用演化历史复杂,储层预测难度较大。针对这些问题,众多学者从层序、沉积、成岩等方面,总结出较为成熟的研究思路和方法,形成中深层储层预测技术体系,有效地指导了该类油气藏的勘探和开发<sup>[1-4]</sup>。但随着研究的深入,学者们发现即使同一沉积相带内,储层品质也存在较大差异,因此寻找优质储层成为新的研究任务和挑战。储层品质宏观上受沉积因素的影响,与储集砂体的类型、岩性和厚度等因素有关,而微观上受成岩作用及成岩演化影响,溶蚀作用在一定程度上可以改善储层品质,胶结作用对储层物性具有破坏作用,以碳酸盐胶结作用最为重要,是碎屑岩成岩过程中导致孔隙减少的重要成岩作用<sup>[5-11]</sup>,也是造成储层致密化的主要因素。为了明确辽东湾海域J油田钙质砂岩的成因机制、控制因素及展布规律,笔者根据取心井的岩心、分析化验及钻、测井资料,基于钙质砂岩发育特征研究,探讨研究区沙二段钙质砂岩的成因机制及控制因素,进而对其平面展布进行预测,以期为后续开发井的高效实施及中深层优质储层预测提供依据。

## 1 区域地质概况

J油田位于渤海辽东湾中部海域辽西凹陷北洼东侧,为典型的中深层油藏(图1)。其含油层系为古近系沙河街组,自下而上可以划分为沙三段、沙二段和沙一段。J油田古近系整体发育一套以辫状河三角洲和扇三角洲为主的沉积体系;其中,沙三段

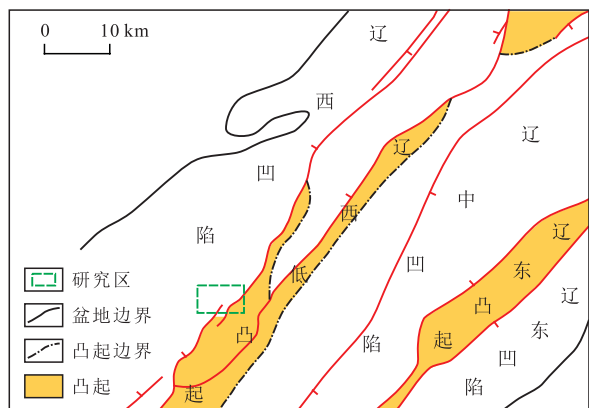


图1 J油田区域构造位置

Fig.1 Regional structural location of J Oilfield

和沙一段以富泥的湖相沉积为主,沙二段以富砂的辫状河三角洲沉积为主,发育油田的主力含油砂体。

目前,J油田沙二段处于开发早期阶段,已完钻开发井10余口。实钻结果揭示,各井普遍钻遇碳酸盐胶结作用形成的钙质砂岩,且井间钙质砂岩的发育程度存在差异,极大地影响了储层的平面及纵向非均质性。其中构造低部位1口注水井的钙质砂岩含量达66%,投注后注入能力较差,影响开发井的生产能力。因此,钙质砂岩的成因机制、控制因素及平面展布预测成为J油田勘探开发亟待解决的问题。

## 2 钙质砂岩发育特征

J油田开发井的测井解释结果显示,单井钙质砂岩的厚度为1.1~37.5 m,平均为10.0 m;单层钙质砂岩的厚度为0.2~7.6 m,平均约为1.0 m;钙质砂岩含量最低仅为3.1%,最高达66.4%,平均为22.6%。其中,约50%的开发井钻遇钙质砂岩含量超过20%,钙质砂岩发育程度较高,严重影响储层品质。

### 2.1 岩性特征

研究区钙质砂岩主要为含钙质细砂岩,个别为中-粗砂岩。岩心观察可见钙质砂岩为灰白色,厚度大,最大达3~4 m;含油性差、基本不含油或非均质含油。薄片样品分析表明,钙质砂岩的岩石类型为长石岩屑砂岩或岩屑长石砂岩。碎屑颗粒中石英含量为28%;长石含量为33%,其中斜长石含量为11%,钾长石含量为22%;岩屑含量为39%,其中火山岩岩屑含量为25%,变质岩岩屑含量为14%。火山岩岩屑主要为酸性喷出岩岩屑,可见少量花岗岩岩屑和安山岩岩屑;变质岩岩屑主要为石英岩岩屑,偶见云母碎片。颗粒以细粒为主,粒径一般为0.1~0.3 mm。碎屑颗粒磨圆为次圆状、次棱角状,分选一般为中等。泥质杂基含量平均为14%。胶结类型以孔隙式胶结为主,颗粒之间呈点-线接触。胶结物含量平均为13%,主要为方解石、铁方解石、白云石、铁白云石,个别样品中见少量菱铁矿和黄铁矿。孔隙不发育,偶见少量粒间、粒内溶孔,连通性较差,岩石较致密。整体来看,J油田钙质砂岩的成分成熟度和结构成熟度均较低。

### 2.2 电性特征

前人研究认为,钙质砂岩具有高电阻、高密度、低声波时差、低自然伽马特征,且随着碳酸盐胶结

物含量的升高,其电性特征越明显<sup>[12-15]</sup>。研究区取心井钙质砂岩与储层砂岩的电测曲线对比结果表明,钙质砂岩的密度测井值普遍大于 $2.28\text{ g/cm}^3$ ,明显高于储层砂岩。目前仅以密度测井曲线作为钙质砂岩电性识别的标志。

### 2.3 物性特征

基于岩心、薄片资料及电测响应特征识别钙质砂岩,针对钙质砂岩垂向发育的不同位置选取孔渗样品点,以明确钙质砂岩的物性特征。分析研究区沙二段83个岩心样品的孔隙度、渗透率数据,认为钙质砂岩的孔隙度和渗透率相对较低,孔隙度大多小于15%,占总样品数的69.8%;渗透率大多小于5 mD,约占总样品数的85.5%,整体属于特低孔或低孔特低渗透储层。个别样品点的孔隙度和渗透率可以达到高孔高渗透,约占总样品数的6.0%。

通过岩心归位,发现钙质砂岩的物性特征在垂向上具有一定的规律。在钙质砂岩顶、底部与储层砂岩的交界处,其物性受有效储层的影响,孔隙度和渗透率相对较高,个别可以达到高孔高渗透特征,而钙质砂岩中间部位的孔隙度和渗透率均较低,大多为特低孔或低孔低渗透特征。

### 2.4 成岩作用特征

岩石薄片镜下观察结果表明,钙质砂岩的胶结

作用较强,溶蚀作用相对较弱。因此,导致钙质砂岩物性较差的成岩作用主要是碳酸盐和粘土矿物的胶结作用,其中碳酸盐胶结作用相对较明显。

碳酸盐胶结物类型以方解石和铁方解石为主,白云石、铁白云石次之,偶见少量菱铁矿和黄铁矿,胶结物平均含量约为13%。方解石和铁方解石呈晶形较好的状态充填于颗粒之间;白云石晶形也较好,分布于颗粒表面、颗粒接触处或颗粒之间;铁白云石自形程度差,主要充填于孔隙中,晶体较方解石小<sup>[10,16]</sup>。由碳酸盐胶结物含量与储层物性的关系(图2)可以看出,当碳酸盐胶结物含量小于15%时,孔隙度可达到或超过25%,渗透率可达到或超过1 000 mD;当碳酸盐胶结物含量超过15%时,储层物性迅速变差,孔隙度大多约为15%,渗透率仅约为1 mD,反映出碳酸盐胶结作用对储层物性影响极大。

粘土矿物胶结包括高岭石、伊利石、绿泥石以及伊/蒙混层的胶结作用。分析X衍射资料发现,钙质砂岩中的伊利石、绿泥石和伊/蒙混层胶结物含量较高,分别为18%,25%和38%。扫描电镜观察结果表明,这些粘土矿物大多以颗粒包膜和孔隙衬边的形式产出,易堵塞砂岩的孔隙喉道,可能会造成储层致密化,对砂岩的渗透性有显著破坏作用,导致储层品质变差。

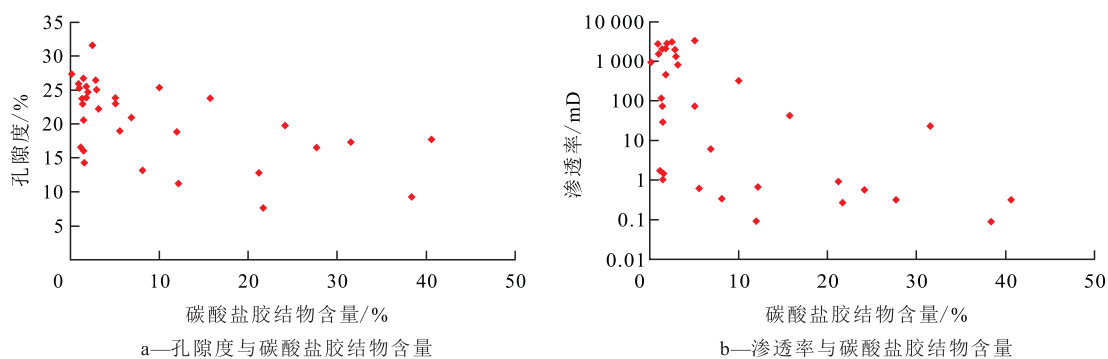


图2 J油田沙二段碳酸盐胶结物含量与储层物性的关系

Fig.2 Relationship between carbonate cement content and reservoir physical property in the second member of Shahejie Formation in J Oilfield

## 3 钙质砂岩成因机制

基于钙质砂岩的宏观、微观特征分析,认为研究区钙质砂岩主要受碳酸盐胶结作用影响。对于碳酸盐胶结作用,众多学者进行了大量研究,探讨碳酸盐胶结物的物质来源和形成机理<sup>[17-18]</sup>。以ALI等为代表的部分学者认为碳酸盐胶结物的物质来源主要有3种<sup>[17]</sup>:①层内溶解作用,泥岩中钙质可发生溶解,随流体一起排入邻近砂岩中。②泥岩中蒙

脱石向伊利石转化可排出 $\text{Ca}^{2+}$ ,这种转化主要发生在埋深1 400 m以下。③沉积水体原生或孔隙水中的 $\text{Ca}^{2+}$ 。漆滨汶等研究认为,碳酸盐胶结物的形成机理归结为砂岩与泥岩界面处碳酸盐的迁移和化学反应的耦合过程<sup>[18]</sup>。当泥岩和孔隙流体相互作用,包括混层粘土矿物转化、泥岩碎屑矿物溶解和有机质热解等,可形成有机酸和各种离子( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ );当泥岩中的碳酸盐含量较高时,在有机-无机相互作用下,可形成富含 $\text{Ca}^{2+}$ 的流体。由于砂岩中 $\text{CO}_2$ 压力比泥岩中低,且砂岩的地层温度

和压力也相对较低,泥岩中富  $\text{Ca}^{2+}$  流体进入邻近砂岩后,易在砂岩顶、底部发生  $\text{CaCO}_3$  沉淀,形成碳酸盐胶结<sup>[18]</sup>。

成岩背景为碳酸盐胶结物的形成提供有利的环境基础。辽东湾海域辽西凹陷古近系储层先后经历早成岩阶段A期、早成岩阶段B期和中成岩阶段A期<sup>[5]</sup>。J油田沙二段埋深为1 800~2 200 m,处于早成岩阶段B期,该时期孔隙水为碱性,碳酸盐矿物大量形成,主要为方解石和含铁方解石,长石和碳酸盐胶结物会出现少量溶蚀现象,为碳酸盐胶结物的形成提供成岩背景。

泥岩为碳酸盐胶结物的形成提供必要的物质基础。研究区沙二段最大埋深为2 200 m,泥岩镜质组反射率约为0.5%,有机质处于半成熟—成熟阶段,少量有机质经过水解作用可形成有机酸,并进一步脱羧基释放  $\text{CO}_2$  进入相邻砂岩,为碳酸盐胶结提供有机碳来源。同时,泥岩在埋藏过程中,随着温度和压力的升高,粘土矿物组分发生转变,蒙脱石逐渐脱水向伊利石转化,形成伊/蒙混层,并释放出大量的  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ 。研究区沙二段泥岩普遍含有灰质,可以为碳酸盐胶结提供物质来源。

因此,研究区在早成岩阶段B期的背景下,受泥岩成岩作用影响,富含  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{CO}_3^{2-}$  等的流体进入邻近砂岩,在砂岩与泥岩接触处,易形成碳酸盐胶结物,导致储层致密化。

## 4 钙质砂岩发育控制因素

受沉积条件影响,钙质砂岩在垂向及平面上的发育特征存在差异。垂向上,砂岩的沉积厚度和沉积韵律控制碳酸盐胶结的类型和发育部位;砂岩厚度越薄,碳酸盐胶结程度越高;受沉积韵律影响,厚层砂岩可表现出顶部、底部及中部碳酸盐胶结的特征。平面上,沉积相带和泥岩厚度影响钙质砂岩的平面展布和胶结强度;沉积边部,砂岩粒度细、厚度薄,与泥岩接触面积大,易形成碳酸盐胶结物。

### 4.1 垂向发育控制因素

根据单井测井解释成果,结合砂体发育特征,将钙质砂岩在垂向上划分为厚层局部胶结型、厚层全部胶结型和薄层全部胶结型3种类型,其中厚层局部胶结型又可以进一步划分为厚层顶部胶结型、厚层中部胶结型、厚层底部胶结型(表1)。

在砂泥岩组合剖面中,砂岩的厚度对碳酸盐胶结作用具有重要控制作用。在相同埋藏条件下,砂层越薄,碳酸盐含量越高,越易形成薄层全部胶结

表1 J油田沙二段钙质砂岩发育类型所占比例统计  
Table1 Calcareous sandstone types and their proportions in the second member of Shahejie Formation in J Oilfield %

韵律性	厚层局部胶结型			厚层全部胶结型	薄层全部胶结型
	顶部	中部	底部		
正韵律			13.5		
反韵律	23.4	3.6	4.5	4.5	27.9
复合韵律	2.7	3.6	2.7		
均质韵律	5.4	2.7	5.4		
合计	31.5	9.9	26.1	4.5	27.9

型;砂层越厚,形成厚层局部胶结型的可能性越大,薄层砂岩的碳酸盐胶结作用明显强于厚层砂岩<sup>[6]</sup>。原始物性相对较好、孔隙相对发育、流体活动相对活跃的厚层砂岩,易形成碳酸盐胶结物。受沉积韵律的影响,砂岩顶部、底部、中部的胶结程度存在差异;其中,具有反韵律的河口坝砂体顶部易发育碳酸盐胶结,形成厚层顶部胶结型,占全部胶结类型的23.4%。具有正韵律的水下分流河道砂体顶部不易形成碳酸盐胶结,常发育厚层底部胶结型,占全部胶结类型的13.5%。复合韵律砂体或均质韵律砂体在研究区发育较少,其碳酸盐胶结发育部位随机性强;上正韵律下反韵律复合砂体的中部易形成碳酸盐胶结,而上反韵律下正韵律复合砂体或均质砂体则以厚层顶部、底部胶结型较为常见。对于薄层砂岩,一般为三角洲前缘远端席状砂或远砂坝沉积,与其上、下泥岩接触,易发生全部碳酸盐胶结作用,薄层全部胶结型是研究区最典型的碳酸盐胶结类型。

### 4.2 平面发育控制因素

#### 4.2.1 沉积相带

研究区沙二段单井钙质砂岩发育特征存在明显差异,反映出碳酸盐胶结物的发育受控于沉积相带的变化。开发井位于构造高部位,距物源相对较近,钙质砂岩含量较低;位于构造低部位,距物源相对较远,钙质砂岩含量较高。沙二段沉积时期,受西北方向燕山褶皱带古东沙河水系沉积供给的影响,在J油田形成规模较大的辫状河三角洲沉积。选取研究区顺物源方向过C4—C9—C18井的连井剖面,其中,C4井位于湖盆边部,距物源相对较近,为沉积主体;C18井位于湖盆中央,距物源相对较远,为沉积边部。随着距离物源的由近至远,砂地比含量由73.0%降至52.8%,钙质砂岩含量由16.3%升至66.4%;C4井单层钙质砂岩厚度仅为0.5~1.4 m,以厚层顶部、厚层底部胶结型为主;C9井单层钙

质砂岩厚度为0.6~3.0 m,以厚层顶部、厚层底部、厚层中部胶结型为主;C18井单层钙质砂岩厚度为0.5~7.6 m,以薄层全部、厚层全部胶结型为主。

研究区取心井粒度分析结果表明,不同粒度砂岩的碳酸盐平均含量存在差异。由不同粒径砂岩所占比例与碳酸盐胶结物含量的关系(图3)可以看出,随着粉-细砂岩含量的增多或中-粗砂岩含量的减少,碳酸盐胶结物含量具有明显升高的趋势,胶结程度逐渐增强;而当砂岩中含砾时,其对胶结作

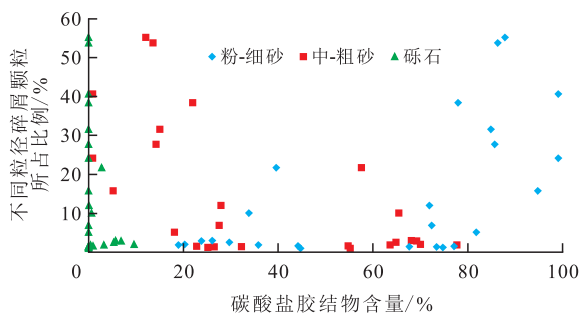


图3 J油田沙二段砂岩不同粒径碎屑颗粒与碳酸盐胶结物含量的关系

Fig.3 Relationship between the proportion of clastic in different grain sizes and carbonate cement content of sandstone in the second member of Shahejie Formation in J Oilfield

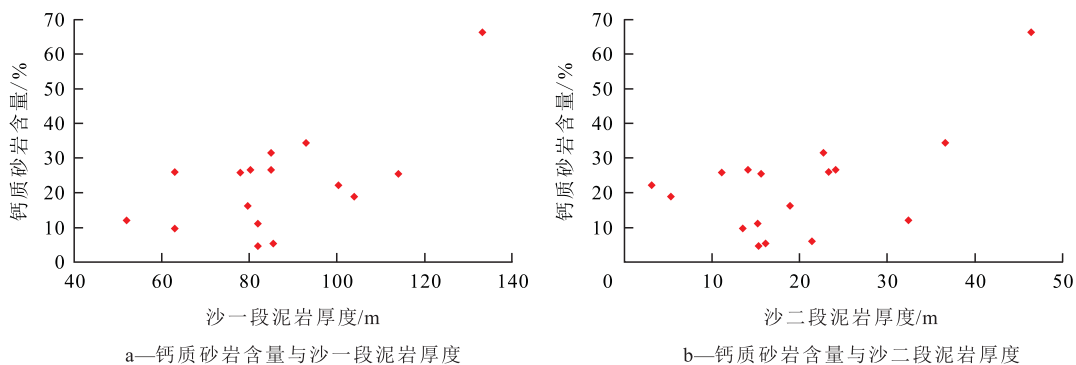


图4 J油田沙二段钙质砂岩含量与泥岩厚度的关系

Fig.4 Relationship between calcareous sandstone content and mudstone thickness in the second member of Shahejie Formation in J Oilfield

## 5 钙质砂岩平面展布预测

由于中深层储层埋藏深、沉积变化快且地震资料分辨率低,因此对其预测的难度较大。基于研究区目前的地震资料,尝试通过地球物理方法,明确钙质砂岩与优质储层的地震响应特征差异,实现钙质砂岩平面分布预测。因此,在钙质砂岩发育成因机制及控制因素研究的基础上,综合考虑沙一段泥岩、沙二段砂岩平面分布及井点钙质砂岩发育程度,对研究区沙二段钙质砂岩平面展布进行预测,

用的影响不明显。整体表现为砂岩粒度越细,胶结程度越高。

受沉积相带控制,从沉积主体向沉积边部,胶结作用具有增强趋势。在沉积边部,砂岩粒度细、厚度薄、与泥岩接触面积大,易形成碳酸盐胶结物。

### 4.2.2 泥岩厚度

前人通过大量的岩心薄片观察发现<sup>[6,19-20]</sup>,砂岩中碳酸盐胶结物含量和胶结作用的强弱受围岩的岩性、厚度及围岩与砂岩的厚度比例影响;当砂岩顶部、底部为碳酸盐岩或巨厚泥岩时,在砂岩内部易发生较强的碳酸盐胶结作用,反之亦然。根据研究区钙质砂岩成因机制分析结果,碳酸盐胶结物的形成与泥岩成岩作用有关。研究区沙一段为富泥沉积,且局部发育白云质条带;沙二段整体为富砂沉积,发育泥质隔夹层。通过统计研究区沙一段泥岩厚度、沙二段泥岩厚度与沙二段钙质砂岩含量的关系,认为泥岩厚度与钙质砂岩含量具有较好的相关性。随着上覆泥岩厚度及层间泥岩厚度的增加,碳酸盐胶结程度均具有增强的趋势。泥岩厚度越大,碳酸盐胶结所需物质来源越丰富,越易于形成钙质砂岩(图4)。

并形成一套基于控制因素的钙质砂岩定量刻画技术。

研究区沙一段为富泥沉积,主要集中发育于湖盆中央,向湖盆边部,泥岩厚度具有减薄的趋势。沙二段为富砂沉积,受西北远物源供给的影响,沉积主体位于研究区西北部的湖盆边部,向湖盆中央逐渐过渡为沉积远端或沉积侧缘,砂体厚度变薄。因此,综合分析认为在沙二段砂岩厚度相对较薄、泥岩厚度相对较大的湖盆中央钙质砂岩发育程度具有增多的趋势,为研究区钙质砂岩发育带,其储层品质受钙质砂岩发育程度影响(图5)。

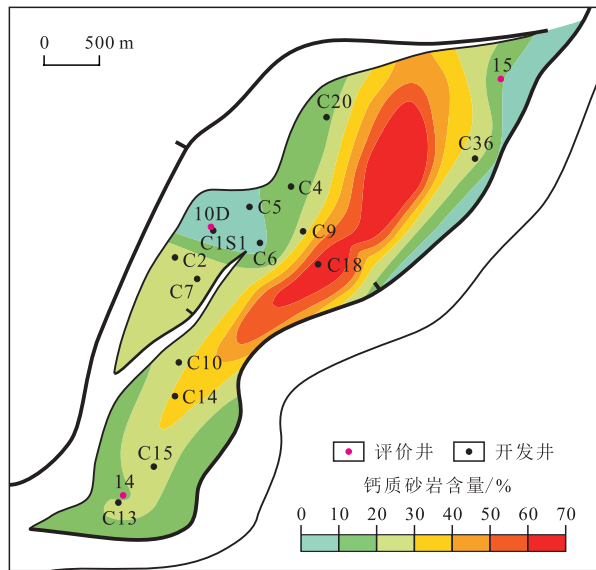


图5 J油田沙二段钙质砂岩平面展布预测结果

Fig.5 Horizontal distribution of calcareous sandstone in the second member of Shahejie Formation in J Oilfield

J油田开发井生产资料证实,其生产能力受钙质砂岩发育程度影响。研究区2口注水井的钙质砂岩含量分别为6.0%和66.4%。注水能力分析结果表明,这2口井的视比吸水指数分别为2.6和0.6 m<sup>3</sup>/(d·MPa·m);且钙质砂岩含量越高,注入能力越差。根据钙质砂岩平面展布规律及时优化研究区构造低部位的1口注水井。优化前该井位于砂体边部,储层品质存在变差的风险,影响注水能力;在满足与构造高部位采油井井距的情况下,将该井向沉积主体部位进行局部优化,规避储层品质变差风险。实践证明,优化后该井沙二段钻遇钙质砂岩含量与钻前预测基本一致,且与采油井注采连通关系较好,满足注水需求。因此,分析钙质砂岩平面展布规律,可以规避储层品质变差、注水能力不足等风险,进而有效指导开发方案的高效实施。

## 6 结论

J油田沙二段钙质砂岩以细砂岩为主,具有含油性差、物性差、密度高、碳酸盐胶结作用强等特点,其形成和展布受沉积作用和成岩作用的共同控制。研究区处于早成岩阶段B期,受泥岩成岩作用影响,在砂岩与泥岩接触处易形成碳酸盐胶结物,导致储层致密化。J油田沙二段钙质砂岩的垂向和平面发育特征具有差异性,且主要受控于沉积条件;砂岩沉积厚度和沉积韵律控制碳酸盐胶结类型和垂向发育部位,沉积相带和泥岩厚度控制钙质砂岩的平面展布和胶结强度。在钙质砂岩发育成因

机制及平面发育控制因素研究的基础上,综合考虑沙一段泥岩、沙二段砂岩平面分布及井点钙质砂岩发育程度,预测研究区沙二段钙质砂岩平面展布规律,并形成一套基于控制因素的钙质砂岩定量描述技术,有利于明确优质储层发育带,规避储层品质变差、注水能力不足等风险。

### 参考文献:

- [1] 徐长贵,赖维成.渤海古近系中深层储层预测技术及其应用[J].中国海上油气,2005,17(4):231-236.  
XU Changgui, LAI Weicheng. Prediction technologies of Paleogene mid-deep reservoir and their application in Bohai Sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2005, 17(4):231-236.
- [2] 官大勇,魏刚,王粤川,等.渤海海域渤中地区中深层储层控制因素分析——以石臼坨凸起东段陡坡带沙河街组为例[J].天然气勘探与开发,2012,35(2):5-12.  
GUAN Dayong, WEI Gang, WANG Yuechuan, et al. Controlling factors of middle-to-deep reservoir in Bozhong Depression, Bohai Sea: An example from Shahejie Formation in the steep slope belt of eastern Shijiutuo Uplift [J]. Natural Gas Exploration & Development, 2012, 35(2):5-12.
- [3] 汪利兵,赵春明,曹树春,等.渤海古近系辫状河三角洲储层描述配套技术——以锦州25-1南油田沙河街组为例[J].重庆科技学院学报:自然科学版,2011,13(3):65-69.  
WANG Libing, ZHAO Chunming, CAO Shuchun, et al. Supporting technology of reservoir description for braided river delta with Bohai Paleogene—Taking Shahejie formation of south oilfield of Jinzhou25-1 as example [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition, 2011, 13(3):65-69.
- [4] 韩雪芳,陈建波,张占女,等.渤海X油田古近系沙三段扇三角洲砂体地质模式再认识[J].重庆科技学院学报:自然科学版,2015,17(3):24-29.  
HAN Xuefang, CHEN Jianbo, ZHANG Zhannü, et al. Recognition of geologic model of fan delta in member3 of Shahejie formation of X oilfield in Bohai bay [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition, 2015, 17(3):24-29.
- [5] 姜向强,钟大康,张琼.辽东湾地区古近系砂岩成岩作用与孔隙演化[J].西安石油大学学报:自然科学版,2007,22(6):14-19.  
JIANG Xiangqiang, ZHONG Dakang, ZHANG Qiong. Diagenesis and porosity evolution of the paleogene sandstone reservoirs in Liaodongwan Area [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2007, 22(6):14-19.
- [6] 张永旺,曾溅辉,高霞,等.东营凹陷古近系储层碳酸盐胶结物分布特征及主控因素[J].吉林大学学报:地球科学版,2009,39(1):16-22.  
ZHANG Yongwang, ZENG Jianhui, GAO Xia, et al. Distribution characteristics and main controlling factors of carbonate cements in the Paleogene reservoirs in Dongying Depression [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2009, 39(1):16-22.

- [7] 王凤娇,刘义坤,于苏浩.苏里格气田东区致密砂岩储层特征[J].油气地质与采收率,2017,24(6):43-47.  
WANG Fengjiao, LIU Yikun, YU Suhao. Reservoir characteristics of tight sandstone in the eastern Sulige Gas Field [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(6): 43-47.
- [8] 朱筱敏,米立军,钟大康,等.济阳坳陷古近系成岩作用及其对储层质量的影响[J].古地理学报,2006,8(3):295-305.  
ZHU Xiaomin, MI Lijun, ZHONG Dakang, et al. Paleogene diagenesis and its control on reservoir quality in Jiyang Depression [J]. Journal of Palaeogeography, 2006, 8(3): 295-305.
- [9] 李玲玲.满加尔凹陷东部志留系致密砂岩储层特征[J].油气地质与采收率,2016,23(2):47-51,75.  
LI Lingling. Reservoir characteristics of Silurian tight sandstone in the eastern Manjiaer sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(2): 47-51, 75.
- [10] 孙海涛,李超,钟大康,等.渤中25-1油田沙三段低渗储层特征及其成因[J].岩性油气藏,2014,26(3):11-16.  
SUN Haitao, LI Chao, ZHONG Dakang, et al. Characteristics and origin of low permeability reservoir of the third member of Shahejie Formation in Bozhong25-1 oilfield [J]. Lithologic Reservoirs, 2014, 26(3): 11-16.
- [11] 陈波,陈汾君,马进业,等.冷湖地区上干柴沟组储层碳酸盐胶结物特征及地质意义[J].大庆石油地质与开发,2016,35(5):28-33.  
CHEN Bo, CHEN Fenjun, MA Jinye, et al. Characteristics and their geological significances of the carbonate cements in Shangganhaigou-Formation reservoirs of Lenghu area [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(5): 28-33.
- [12] 田洋,卢宗盛,权英哲,等.辽河盆地大民屯凹陷沈95区块砂岩储层中钙质夹层研究[J].岩石矿物学杂志,2009,28(2):152-160.  
TIAN Yang, LU Zongsheng, KWON Yongchol, et al. Calcareous interbeds in the sandstone reservoir of Shen-95 Block within Damintun Sag, Liaohe Basin [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2009, 28(2): 152-160.
- [13] 滕建彬.流体-岩石化学作用控制的成岩相划分与评价——以江家店—瓦屋地区沙三段下亚段为例[J].油气地质与采收率,2017,24(3):1-9.  
TENG Jianbin. Division and evaluation of diagenetic facies of reservoirs in the control of fluid-rock chemical interaction: A case study of the lower Es<sub>3</sub> in Jiangjiadian-Wawu area [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(3): 1-9.
- [14] 谢佳彤,李斌,彭军,等.塔中地区柯坪塔格组储层致密化成因[J].特种油气藏,2016,23(2):59-62.  
XIE Jiatong, LI Bin, PENG Jun, et al. Densification genesis of Kepingtage reservoirs in Tazhong [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(2): 59-62.
- [15] 段冬平,侯加根,高建,等.河控三角洲前缘钙质胶结分布规律及其成因——以东营凹陷永安镇油田为例[J].长江大学学报:自科版,2015,12(11):30-35.  
DUAN Dongping, HOU Jiagen, GAO Jian, et al. The distribution regularities and genesis of calcite cementation in the fluvial-dominated delta front—taking Yonganzhen Oilfield in Dongying Sag for example [J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2015, 12(11): 30-35.
- [16] 王清斌,臧春艳,赖维成,等.渤中坳陷古近系中、深部碎屑岩储层碳酸盐胶结物分布特征及成因机制[J].石油与天然气地质,2009,30(4):438-443.  
WANG Qingbin, ZANG Chunyan, LAI Weicheng, et al. Distribution characteristics and origin of carbonate cements in the middle and deep clastic reservoirs of the Paleogene in the Bozhong Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(4): 438-443.
- [17] CHOWDHURY A H, NOBLE JAMES P A. Origin, distribution and significance of carbonate cements in the Albert Formation reservoir sandstones, New Brunswick, Canada [J]. Marine and Petroleum Geology, 1996, 13(7): 837-846.
- [18] 漆滨汶,林春明,邱桂强,等.东营凹陷古近系沙河街组砂岩透镜体钙质结壳形成机理及其对油气成藏的影响[J].古地理学报,2006,8(4):519-530.  
QI Binwen, LIN Chunming, QIU Guiqiang, et al. Formation mechanism of calcareous incrustation in lenticular sandbody of the Shahejie Formation of Paleogene and its influence on hydrocarbon accumulation in Dongying Sag [J]. Journal of Palaeogeography, 2006, 8(4): 519-530.
- [19] 单敬福,赵忠军,李浮萍,等.砂质碎屑储层钙质夹层形成机理及其主控因素分析[J].地质评论,2015,61(3):614-620.  
SHAN Jingfu, ZHAO Zhongjun, LI Fuping, et al. Mechanism and controlling factors of calcium interbeds formed in the reservoir [J]. Geological Review, 2015, 61(3): 614-620.
- [20] 吴倩,方小宇,王玉,等.南海A油田珠江组钙质层成因与控制因素分析[J].岩性油气藏,2016,28(3):68-73.  
WU Qian, FANG Xiaoyu, WANG Yu, et al. Origin and controlling factors of calcareous interlayers of Zhujiang Formation in Nanhai A oilfield [J]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28(3): 68-73.

编辑 邹澍滢