

# 高尚堡油田深层沙三<sub>2</sub>亚段沉积微相及成岩储集相特征

李海燕, 吴胜和, 岳大力

中国石油大学(北京)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** 为了明确高尚堡油田深层沙三<sub>2</sub>Es<sub>3</sub>亚段沉积微相、成岩储集相特征及各类成岩储集相的成因机制,利用区域地质、测井、砂岩薄片、铸体薄片、扫描电镜、X衍射分析等多种方法对沉积相、成岩作用及其影响因素进行综合研究,并在此基础上进行成岩储集相划分,探讨各类成岩储集相的成因机制。结果表明,该区 Es<sub>3</sub>亚段为一套扇三角洲沉积体,主要发育扇三角洲前缘亚相,广泛发育的水下分流河道和河口坝砂体为油气的聚集提供了有利场所。分析低渗透储层成岩作用对储集物性的影响,得出造成本区储层砂岩渗透率较低的主要机制是成岩期强烈的压实作用及各种自生矿物的充填和胶结作用。结合成岩作用和微观孔隙结构研究,将本区成岩储集相划分为稳定组分溶解次生孔隙成岩储集相、中强压实强胶结残余粒间孔成岩储集相、强压实强胶结残余粒间孔成岩储集相、极强压实强胶结致密成岩储集相 4 类,阐述了各类成岩储集相的特征。选用流动层带指标、孔隙度、渗透率、粒度中值、泥质含量、排驱压力、孔隙半径均值和变异系数等参数,采用神经网络模式识别方法,对目的层进行了成岩储集相识别,并结合沉积相,实现了成岩储集相的时空展布。

**关键词** 低渗透;沉积微相;成岩储集相;高尚堡油田;遗传神经网络

**中图分类号** TE 353

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.09.007

## Diagenetic Reservoir Facies in Low Permeability Reservoir in Deep Zone E<sub>3</sub> Segment of Gaoshangpu Oil Field

LI Haiyan, WU Shenghe, YUE Dali

State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, Faculty of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

**Abstract** This paper studies the sedimentary facies, the diagenetic reservoir facies and their origin mechanism in the deep zone of Shahejie formation in Gaoshangpu oil field. Based on the regional geology, the well logging, the sandstone slice, the casting slice, the scanning electronic microscope, and the X-ray diffraction methods, the sedimentary facies, the diagenesis and their influencing factors are studied. The diagenetic reservoir facies are classified and the origin mechanism is discussed. It is shown that the fan delta front deposition is developed, and the extensive distributive channels and mouth bars are the favorable oil accumulation locations. The effect on the reservoir property of diagenesis is analyzed, and it is indicated that the origin mechanism of the low permeability in this area is of the strong compaction, the infill and the cementation of autogenetic mineral during diagenesis. Based on the diagenesis study, the diagenetic reservoir facies are divided into four types and their characteristics are analyzed, including the secondary pores diagenetic reservoir facies with solution of unstable ingredients, the residual intergranular pores diagenetic reservoir facies with middle-strong compaction and cementation, the remaining intergranular pores diagenetic reservoir facies with strong compaction and cementation, and the tight diagenetic reservoir facies with extremely strong compaction and cementation. Using eight chosen parameters, that is, the flow zone index, the porosity, the permeability, the median grain size, the mud content, the expel pressure, the median pore throat radius and the variance coefficient, with the genetic artificial neural network method, the study and prediction models are established, and four

收稿日期: 2011-11-25;修回日期: 2012-03-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2011CB707302)

作者简介: 李海燕, 讲师, 研究方向为储层地质建模及油藏描述, 电子信箱: lihaiyan3790@vip.sina.com

diagenetic reservoir facies types are identified in the target formation. Combined with the analyses of the sedimentary facies, the time-space distributions of diagenetic reservoir facies are explained. The result may serve as a guide in the development of low permeability oil fields.

**Keywords** low permeability; sedimentary facies; diagenetic reservoir facies; Gaoshangpu oil field; genetic artificial neural network

## 0 引言

关于成岩储集相的研究始于 2002 年,主要是依据岩相、沉积相、成岩作用划分成岩储集相,但并未给出其平面展布<sup>[1-3]</sup>。李海燕等<sup>[4-6]</sup>根据沉积微相、成岩作用分析,结合宏观微观参数,用 K 模糊均值聚类法或遗传神经网络法划分成岩储集相,并首次给出了成岩储集相的平面展布图,预测了优质储层的分布。宋子齐等<sup>[7]</sup>将成岩作用量化,给出了成岩综合系数,采用灰色关联评价分析法识别成岩储集相,实现了平面展布。邹才能等<sup>[8]</sup>用微观薄片划分成岩储集相,首次探讨了成岩储集相的成因机制,并进行了有利成岩储集相的预测。徐樟有等<sup>[9]</sup>根据岩石类型、成岩作用、成岩系数、宏观物性等参数划分成岩储集相,并分析了各类成岩储集相的成岩演化序列。Fu 等<sup>[10]</sup>结合成岩作用、储集空间类型划分成岩储集相,并探讨了成岩储集相与优质储层的关系。宋子齐等<sup>[11]</sup>分析了成岩作用与孔隙演化,建立了成岩储集相定量模式与综合评价指标体系,划分了成岩储集相,根据甜点筛选的综合评价法,找出了低渗储层中的相对优质储层。低渗透储集层成因机制十分复杂,决定储集层性质的主控因素为沉积、成岩、构造和流体改造作用的综合效应。为此,本文在沉积微相、成岩作用、微观孔隙结构分析的基础上,尝试研究低渗透储集层发育的主控因素之间的相关关系及各类成岩储集相的综合成因机制,预测有效储集层的分布及储集性质的差异。

高尚堡油田处于河北省唐山市滦南县和唐海县境内的冀东油田。高尚堡油田深层油藏区域构造位于黄骅坳陷北部南堡凹陷东北侧高柳构造带。含油层系为古近系沙三段,含油面积为 26.8km<sup>2</sup>,地质储量为 5363 万 t,是一个复杂断块油藏。高尚堡油田古近系沙三段地层自上而下分为 Es<sub>3</sub><sup>1</sup>、Es<sub>3</sub><sup>2</sup>、Es<sub>3</sub><sup>3</sup>、Es<sub>3</sub><sup>4</sup>、Es<sub>3</sub><sup>5</sup> 5 个亚段。目前高尚堡油田深层钻井揭示的地层主要为第 2 个沉积旋回——Es<sub>3</sub><sup>3-5</sup> 段。本文研究的目的层段为沙三 2Es<sub>3</sub><sup>5</sup> 亚段,它是一套粗碎屑岩砂体,分布在南堡凹陷北部湖盆边缘地区,毗邻燕山褶皱带边缘柏各庄和西南庄大断层的下降盘一侧,离物源区很近的陡岸沉积体。Es<sub>3</sub><sup>5</sup> 亚段储集层埋深为 3000—3800m,储集层平均孔隙度 13.8%,平均渗透率 36.1×10<sup>-3</sup>μm<sup>2</sup>,为中孔、低渗储层。该区成岩作用类型较多,直接影响着储层的发育,成岩作用及成岩储集相分布一直是该区力图解决的难题之一。

## 1 沉积相

在对高尚堡深层 Es<sub>3</sub><sup>5</sup> 亚段 8 口取心井 736m 的岩心观察的基础上,根据取心井的岩性、含油性、电性、沉积构造、岩石

相特征、沉积的旋回性等的综合分析,结合区域地质背景,认为研究区 Es<sub>3</sub><sup>5</sup> 亚段为一套扇三角洲沉积体。

### 1.1 Es<sub>3</sub><sup>5</sup> 亚段沉积微相类型

根据指相矿物、沉积构造、岩性组合、电性特征、砂岩厚度等资料,结合垂向沉积层序和沉积相共生组合分析,Es<sub>3</sub><sup>5</sup> 亚段地层主要发育扇三角洲前缘亚相,可分为水下分流河道、河口坝、远砂坝、水下分流河道间等微相。各微相的岩石类型、结构、构造、砂泥岩分布、测井和含油性特征如表 1 所示。

#### 1.1.1 水下分流河道微相

水下分流河道砂体是扇三角洲前缘的主要砂体类型。水下分流河道是水上分流河道向前延伸分叉后形成的河道,随着分流向湖推进,分叉更频繁,常因发生同期性淤塞而改道,沉积物纵横向非均质性很强,主要呈条带状展布,剖面上砂体呈顶平底凸的透镜状。一般厚度较大,底部多为砾砂岩,向上为交错层理、平行层理中砂岩、细砂岩和粉砂岩。由于扇三角洲前缘亚相在本区大范围分布,因此水下分流河道相互叠置、衔接,是本区储层沉积的主体,可以形成展布范围较广的水下分流河道砂体复合带<sup>[12]</sup>。其自然伽马曲线呈中-高幅的钟形及复合钟形或箱形。在水下分流河道侧翼,自然伽马曲线呈中-低幅的钟形或箱形(图 1(a))。水下分流河道砂体砂质纯净、分选好,具有良好的储油物性,且与有利生油的前三角洲和滨浅湖相呈指状接触,垂向上相互叠置,油气运聚条件较好,因此为有利储集相带。75% 的双高井(单井日产量和累计产量高)以水下分流河道砂体为主要产层,52% 日产和累计产油量中等的井也以水下分流河道砂体为主要产层。

#### 1.1.2 河口坝微相

河口坝是扇三角洲前缘亚相的典型沉积,也是本区主要的储集砂体,其产油能力仅次于水下分流河道砂体。由于河口坝为岸进湖退进积式沉积的结果,较粗的沉积物往往覆盖在较细的沉积物之上,因此形成反韵律剖面特征。岩性主要由分选较好、砂质纯净的中砂岩、细砂岩和粉砂岩组成,发育各种交错层理、平行层理;还有少量泥质粉砂岩,发育波状层理和低角度交错层理。自然伽马曲线多呈倒三角形或漏斗形,越向上幅度异常越明显,与粒度变化趋势一致(图 1(b))。河口坝砂体也是本区主要的储集砂体,其产油能力仅次于水下分流河道砂体。

#### 1.1.3 远砂坝微相

远岸水道在向湖逐渐推进的过程中,当河道发生最后一次分叉,在其河口分叉处形成远端砂坝后,河道能量逐渐减弱,湖水能量逐渐增强,使河口砂坝受到改造并重新分布,形

成远砂坝。远砂坝沉积物较河口坝细,岩性主要由薄层细砂岩、粉砂岩和泥质粉砂岩组成的薄互层。平面分布稳定,纵向相带窄、厚度薄,发育波状层理、水平层理;砂体单层厚度较薄,泥质含量高,形成下细上粗的垂向层序。自然伽马曲线幅度较低,呈低幅漏斗形(图 1(c))。远砂坝砂体的石油地质储量占总数的 8.6%,但产量较低。

1.1.4 水下分流河道间微相

水下分流河道间是水下分流河道之间的滨浅湖区,分布在水下分流河道或河口坝之间。河道间缺少稳定的泥岩沉积,主要是块状或具水平层理的粉砂质泥岩、泥质粉砂岩夹薄层砂岩。发育典型的波状及透镜状层理,局部可见生物遗迹及植物叶片化石。自然伽马曲线接近于泥岩基线,有时夹杂粉砂岩或泥质粉砂岩薄层,因而具有一定的幅度。

1.2 沙三 2 亚段沉积相平面展布

8 小层沉积时期,根据泥岩颜色等资料分析得知,研究区总体为一较浅水沉积环境,泥岩颜色以灰色、灰绿色为主,为扇三角洲前缘亚相环境。沉积物以灰白色、灰色含砾砂岩、中

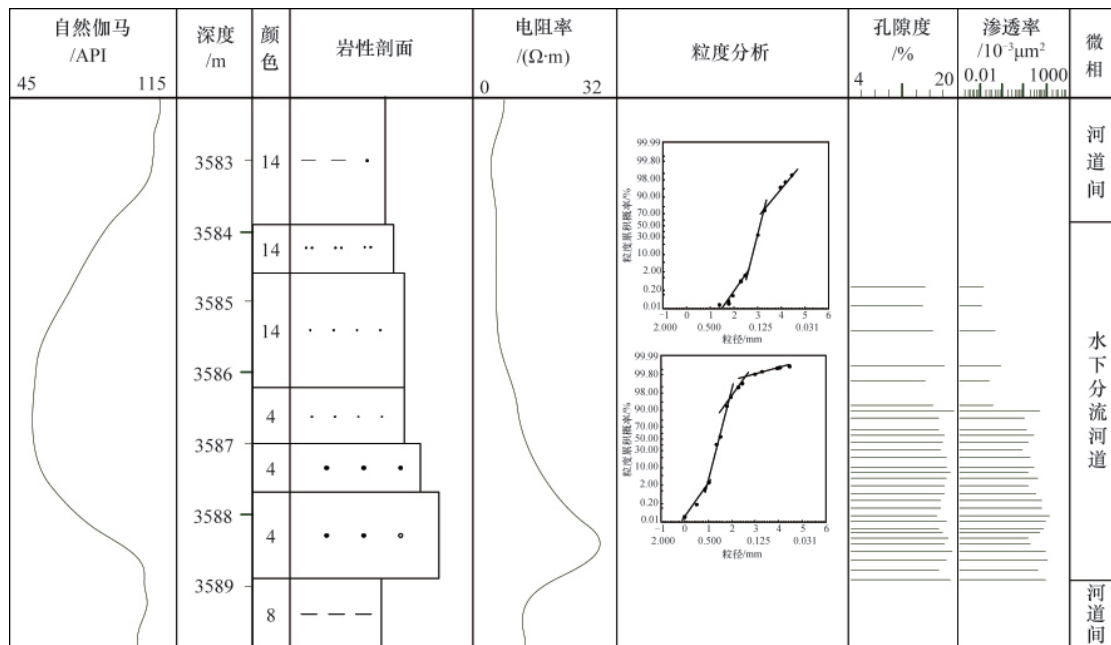
砂岩、细砂岩为主,其次为粉砂岩和灰色、灰绿色泥岩,砂体物性好。8 小层河道砂体发育范围比较广泛,河道更宽且存在多期河道,其中中部相对于其他区域更发育,南北方向连通性比东西向好。砂体的厚度为 16—25m,砂地比值为 55%—85%。物源区在研究区的东北部,向南西方向砂体逐渐减薄(图 2)。

6 小层沉积时期,研究区短期地层基准面上升较快,可容空间加大,沉积了一套以水下分流河道和水下分流河道间为主的沉积物。沉积物粒度较 8 小层细,以灰白色、灰色中砂岩、细砂岩、粉砂岩为主,其次为灰色、灰褐色泥岩。物源区仍为东北部,但位置比 8 小层沉积时期距研究区稍远。发育了 1 条东北向主河道和 3 条支流河道,砂体厚度为 10—20m,砂地比值为 42%—71%(图 3)。

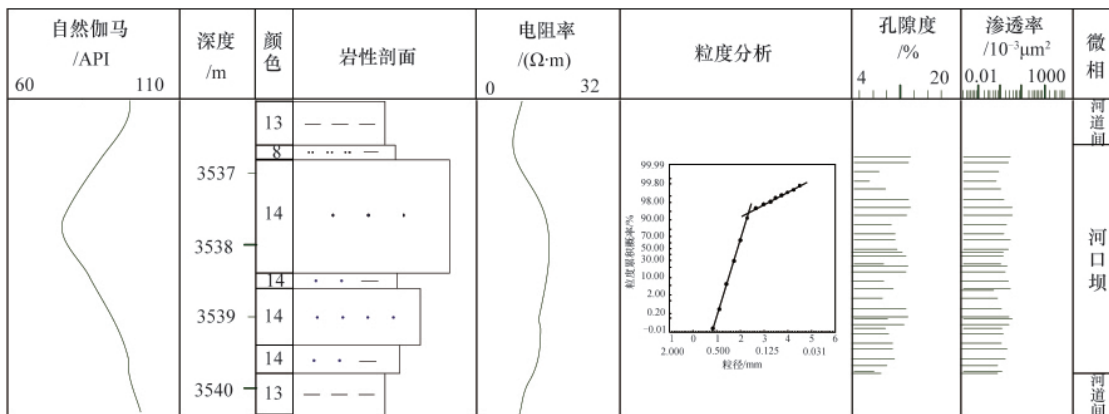
纵向上,8 小层向 6 小层,水下分流河道微相逐渐减少,物性逐渐变差。沉积微相的这种空间展布特征决定了高尚堡深层 E<sub>3</sub> 亚段储层物性分区分带特性明显,这一特征也是本区储层非均质性强的原因所在。

表 1 高尚堡油田深层沉积相类型及划分依据  
Table 1 Sedimentary types and division evidences of the deep Gaoshangpu oil field

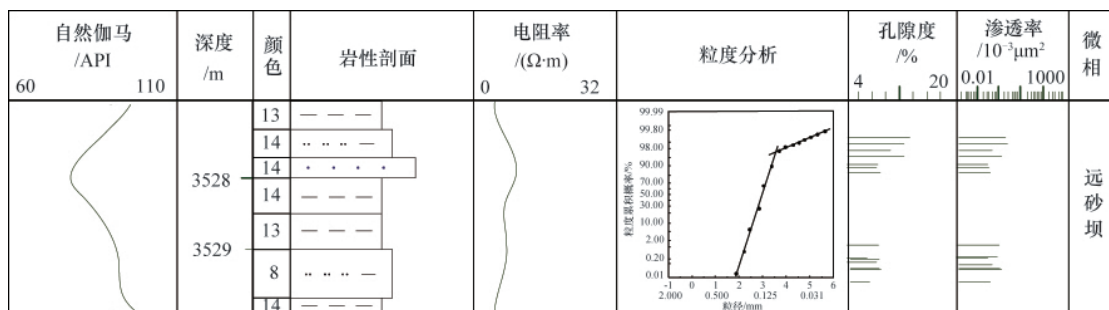
相标志	扇三角洲前缘亚相			前扇三角洲亚相	
	水下分流河道微相	河口坝微相	远砂坝微相	水下分流河道间微相	前扇三角洲泥
岩石类型	砾砂岩、粗砂岩、细砂岩	粗砂岩、细砂岩、粉砂岩	细砂岩、粉砂岩和泥质粉砂岩的薄互层	粉砂质泥岩、泥质粉砂岩夹薄层砂岩	泥岩夹薄层泥质粉砂岩
粒度中值	一般为 0.10—0.22mm	一般为 0.07—0.14mm	一般为 0.03—0.08mm		
分选性	中等-差	中等	中等-差		
结构特征	两段式、三段式、四段式、多段式,跳跃组分一般在 45%—65%,跳跃组分与悬浮组分截点 $\Phi$ 值在 1.5—2.2	两段式为主,跳跃组分一般在 40%—60%,跳跃组分与悬浮组分截点 $\Phi$ 值在 1.7—2.8	两段式,跳跃组分一般在 25%—45%,跳跃组分与悬浮组分截点 $\Phi$ 值在 2.3—2.9		
C-M 图	A 型主要发育 PQ 段和 QR 段;B 型发育 NO-OP-PQ-QR-RS 段				
构造特征	交错层理、平行层理、滑塌变形、递变层理	交错层理、平行层理、块状层理、波状层理	波状层理、水平层理	水平层理、透镜状层理、波状层理	水平层理、脉状层理、透镜状层理
总厚度	一般大于 4m	一般 3—4m	一般小于 3m		
砂层 单层厚度	大于 3m	2.5—3m	1—2.5m		
特征 孔隙度	15%—20%	13%—17%	9%—13.5%		
渗透率	$(50-96) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	$(45-79) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	$(30-55) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$		
泥岩 单层厚度	1.0—2.2m	1.5—3m	2.5—5m	4.5—7m	5—8m
特征 颜色	浅灰色、灰色、灰绿色	浅灰色、灰色、灰褐色	灰色、灰褐色、深灰色	灰色、深灰色	深灰色、灰黑色
自然伽马曲线特征	宽钟形、复合钟形或箱形,幅度中-高	漏斗形、钟形,幅度中-高	低幅漏斗形或指形	低幅平直或齿状,偶有小指形	低幅平直或齿状
含油性特征	含油性好	含油性较好	含油性中等	含油性很差	不含油



(a) 水下分流河道 (高 3106 井:3583—3589m)  
(a) Subaqueous channel (well Gao 3106: 3583—3589m)



(b) 河口坝 (高 93 井:3536—3540m)  
(b) Channel bar (well Gao 93: 3536—3540m)



(c) 远砂坝 (高 93 井:3527—3530m)  
(c) Distal bar (well Gao 93: 3527—3530m)

图 1 高尚堡油田深层 Es<sub>2</sub> 沉积微相砂体特征图

Fig. 1 Sedimentary facies and sand features of Es<sub>2</sub> formation in deep Gaoshangpu oilfield

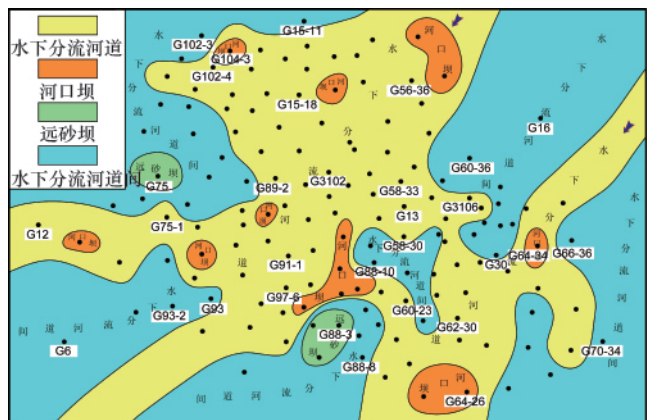


图 2 8 小层沉积微相展布

Fig. 2 Micro facies distribution of 8th mini layer

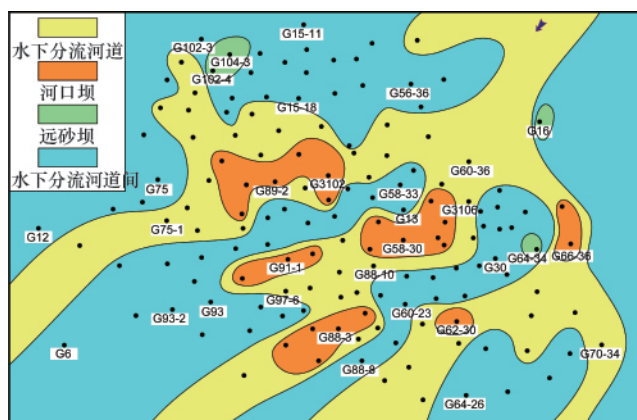


图 3 6 小层沉积微相展布

Fig. 3 Micro facies distribution of 6th mini layer

## 2 成岩作用

### 2.1 储集空间和喉道类型

高尚堡油田  $E_3^2$  亚段储层埋深多在 3000—3800m 之间, 埋藏深度大, 储层受上覆沉积物的压力较大。砂岩沉积于扇三角洲环境, 物源近, 搬运距离近, 岩屑和长石含量较高, 石英含量相对较低, 刚性颗粒含量低, 塑性颗粒含量高。铸体薄片鉴定及扫描电镜观察分析表明, 由于本区储层埋深大, 且经历了强烈的成岩作用改造, 高尚堡深层  $E_3^2$  亚段储层砂岩储集空间类型以粒间溶孔和粒内溶孔为主, 原生孔隙较少, 另有少量裂缝和颗粒内裂隙。由于强烈的压实作用, 碎屑颗粒之间多呈线-点接触, 喉道类型以缩颈型为主, 孔缩型及片状喉道为次, 有少量微喉道。此外, 由于各种自生矿物的充填和胶结作用, 在自生矿物晶体之间也多形成片状喉道。

### 2.2 成岩作用对储集物性的影响

成岩作用在砂岩的埋藏演化过程中对孔隙度、渗透率的产生、破坏和改造起关键作用<sup>[13-17]</sup>。成岩作用的综合影响形成了中孔中渗中喉、中-低孔低渗细喉、低孔低渗特细喉和低孔特低渗微细喉 4 类储层。

机械压实作用使本区储层异常致密, 孔隙度降低。为了定量表征本区储层砂岩的压实作用强度, 应用“视压实率”概念。视压实率=(原始孔隙体积-粒间体积)/原始孔隙体积×100%。本区储层砂岩为扇三角洲前缘沉积, 取原始孔隙体积为 40%。粒间体积=胶结物体积+粒间孔体积。本区储层砂岩中, 溶解作用强烈, 次生溶孔含量较高, 因此对粒间孔进行校正, 即粒间孔体积=面孔率-粒间溶孔-铸模孔。利用岩石铸体薄片鉴定结果, 对本区储层的 27 块砂岩样品进行视压实率计算。结果视压实率主要在 34%—45%, 平均为 39.3%, 因此压实作用使本区储层孔隙损失约 40%×39.3%=15.7%。

本区胶结作用较强, 为了定量表征本区储层砂岩的胶结作用强度, 引入“视胶结率”概念。视胶结率=粒间胶结物体积/(粒间胶结物体积+粒间孔体积)×100%。利用岩石铸体薄片鉴定结果, 计算了 27 块砂岩样品的视胶结率。结果视胶结

率主要在 36%—44%, 平均为 40.5%, 因此胶结作用使本区储层孔隙损失约 40%×40.5%=16.2%。

此外, 由于自生矿物类型多, 分布普遍, 且多分布于粒间及粒表, 极易堵塞孔喉而使储层的渗透率降低。本区储层砂岩较低渗透率的主要成因就是成岩期强烈的压实作用及各种自生矿物的充填和胶结作用, 此外, 溶解作用形成的孤立互不连通的粒间孔也是造成渗透率低的原因。本区储层砂岩虽经机械压实作用和胶结作用损失了大部分的原始储集空间, 但仍有一定的孔隙度(孔隙度多在 6%—19%, 平均 13.8%, 为中孔隙度), 这主要是由于晚成岩期的溶解作用形成次生溶孔的结果(溶解作用使孔隙度提高约 5.7%)。

## 3 储层微观孔隙结构特征

根据 8 口取心井(高 58-33、高 60-23 井、高 13 井、高 93 井、高 102-4 井、高 104-3 井、高 3102 井、高 3106 井)的 92 块样品压汞法测定的微观孔喉参数特征及压汞典型特征(图 4), 将高尚堡油田  $E_3^2$  亚段储层微观孔隙结构分为 4 类。

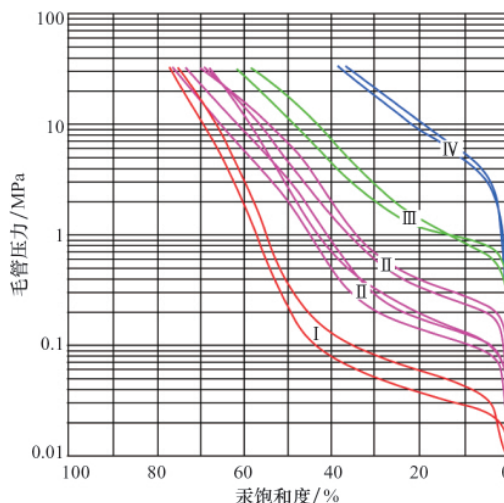


图 4 高尚堡油田  $E_3^2$  储层典型压汞曲线

Fig. 4 Typical mercury injection curves of  $E_3^2$  formation in deep Gaoshangpu oil field

第 I 类:排驱压力和饱和度中值压力较低,最大进汞饱和度较高。排驱压力一般为 0.01—0.03MPa,饱和度中值压力为 0.2—0.5MPa,最大进汞饱和度为 75%—78%。以渗透率高为主要特征,一般大于  $170 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,最高可达  $1203 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

第 II 类:排驱压力和饱和度中值压力高于第 I 类,最大进汞饱和度低于第 I 类。排驱压力一般为 0.04—0.20MPa,饱和度中值压力一般为 2—7MPa,最大进汞饱和度为 68%—77%。渗透率变化范围大,一般为  $7 \times 10^{-3}$ — $144 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。高尚堡油田  $E_{s_2}^3$  亚段多为此类孔隙结构的储层。

第 III 类:排驱压力和饱和度中值压力较高,最大进汞饱和度较低。排驱压力一般为 0.6—1.0MPa,饱和度中值压力一般为 10—20MPa,最大进汞饱和度为 55%—60%。渗透率较低,一般小于  $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

第 IV 类:排驱压力高,达 4MPa,最大进汞饱和度低,为 35%左右。渗透率很低,多小于  $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。此类孔隙结构的储层在高尚堡油田  $E_{s_2}^3$  亚段只占少数。

## 4 以遗传神经网络为核心的成岩储集相识别

### 4.1 遗传神经网络的基本原理

遗传神经网络是把遗传算法引用到神经网络,避免常用的 BP 神经网络局部最小的欠缺。遗传算法是将问题的求解表示成“染色体”,从而构成一群“染色体”。将它们置于问题的“环境”中,根据适者生存的原则,从中选择出适应环境的“染色体”进行复制,即再生,然后通过交换、变异两种基因操作产生出新一代更适应环境的“染色体”群,这样一代代不断进化,最后收敛到一个最适应环境的个体上,求得问题的最

优解<sup>[18]</sup>。遗传神经网络有很强的容错能力,可以最大限度地排除各种误差。

### 4.2 成岩储集相的识别

成岩储集相是某一种或几种成岩作用及其形成的储集特征的综合反映。根据上述沉积相、成岩作用、微观孔隙结构分析,本文选用以下参数划分成岩储集相:反映储层物性特征的参数——孔隙度  $\phi$ 、渗透率  $K$ ,反映储层岩石相特征的参数——粒度中值  $M_d$ 、泥质含量  $V_{sh}$ ,反映孔喉大小的参数——排驱压力  $p_d$ 、孔喉半径均值  $R_m$ ,反映孔喉分选的参数——变异系数  $V_K$ ,以及结合岩石结构和矿物地质特征判定不同孔隙几何相的参数——流动层带指标。其中根据 Kozeny-Carman 关系式确定流动层带指标<sup>[10]</sup>

$$FZI = \frac{1-\phi}{\phi} \sqrt{\frac{K}{\phi}} \quad (1)$$

其中,  $FZI$  为流动层带指标,  $\mu\text{m}$ 。

本文选取高尚堡油田深层的 8 口取心井资料进行研究,对岩心进行归位处理后,统计各层内相对均质段的各项参数值,并对照岩心分析其主要岩石类型,在储层岩石相、沉积相分析的基础上,综合考虑砂岩中碎屑组分特征及含量、杂基含量、胶结物类型及含量、储集空间类型、压实作用、胶结作用、溶解作用的强弱及微观孔隙结构特征,将本区  $E_{s_2}^3$  亚段储层砂岩分为 4 种成岩储集相类型。

### 4.3 各类成岩储集相的成因机制及特征

根据上面的述划分标准,对各井各层的成岩储集相分别进行识别,各类成岩储集相的成因机制及主要特征如下(见表 2)。

表 2 高尚堡深层  $E_{s_2}^3$  亚段成岩储集相划分统计

Table 2 Statistics of diagenetic reservoir facies division of  $E_{s_2}^3$  formation of Gaoshangpu oilfield

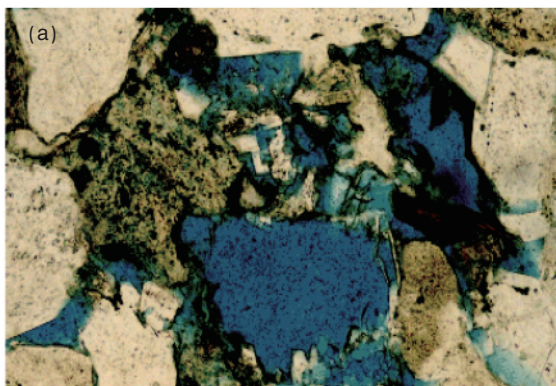
成岩储集相	孔隙度 /%	渗透率 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	粒度中值 /mm	泥质含量 /%	排驱压力 /MPa	孔喉半径均值 / $\mu\text{m}$	变异系数	流动层带指标 / $\mu\text{m}$	与沉积相的关系
A 相	16—20	50—90	0.6—0.85	<12	0.013—0.185	3.82—5.39	0.21—0.63	>1.9	河道、河口坝的粗、中砂岩中
B 相	11—16	10—55	0.4—0.65	8—19	0.171—0.394	2.29—4.16	0.57—0.91	0.95—2.0	河道、河口坝的中、细砂岩中
C 相	5—11	1—10	0.2—0.45	17—31	0.382—0.579	1.07—2.43	0.85—1.36	0.45—1.15	河道的细砂岩、粉砂岩中
D 相	<5	<1	0.05—0.22	>28	0.518—0.724	0.46—1.29	1.22—1.78	<0.45	远砂坝的粉砂岩中

(1) A 相:不稳定组分溶解次生孔隙成岩储集相。

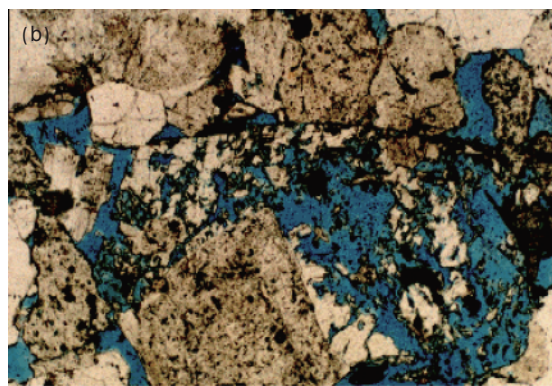
岩性主要为长石岩屑中、粗砂岩,分选中等,杂基含量较低。碎屑组分中不稳定的长石和岩屑含量较高,因此溶解作用较强烈,最常见的是长石的溶解,其次是岩屑的溶解,储集空间以次生溶孔为主。胶结作用弱,粒间填充物含量低,主要为晚成岩期的铁方解石和铁白云石,属中-强压实、弱胶结、较强溶解。由于较强的溶解作用,形成次生溶孔,因而孔隙度较高,可达 16%—20%,孔隙连通性好,孔喉半径大,渗透率为  $50 \times 10^{-3}$ — $90 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。此类成岩储集相主要发育于河道、河口坝的粗、中砂岩中,形成中孔中渗中喉型储层(图 5(a))。

(2) B 相:中强压实强胶结残余粒间孔成岩储集相。

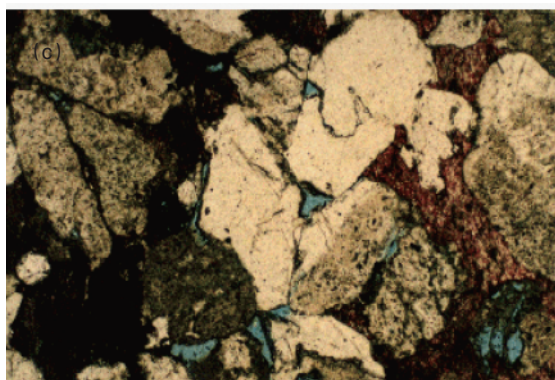
岩性主要为岩屑长石细砂岩,部分为中砂岩。储层砂岩分选中等,胶结作用强烈,主要有方解石、铁方解石、石英次生加大胶结,压实作用中等强烈,储集空间类型主要为粒间胶结物溶孔。胶结作用中等,粒间常有残余的方解石和菱铁矿,以及晚成岩期的铁方解石、铁白云石、沸石和各种自生黏土矿物。属中等压实、中等胶结、中等溶解。孔隙度中等,为 11%—16%,渗透率较低,为  $10 \times 10^{-3}$ — $55 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。此类成岩储集相主要发育于河道、河口坝的中、细砂岩中,形成中-低孔低渗细喉型储层(图 5(b))。



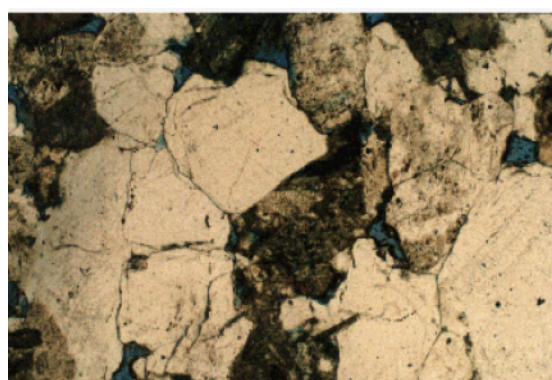
(a) 粒间及粒内溶孔。长石溶解强烈,呈骸状,或完全溶解形成铸模孔,仅残留边缘。高 60-23 井,3534.00m,岩屑长石中细砂岩,单偏光,蓝色铸体,40x



(b) 粒间孔及粒内溶孔。长石溶解呈蜂窝状。高 102-4 井,3533.18m,岩屑中粗砂岩,单偏光,蓝色铸体,40x



(c) 粒间局部被亮晶方解石胶结和泥晶方解石充填,仅见少量粒间孔。高 3102 井,3543.70m,长石岩屑中粗砂岩,单偏光,蓝色铸体,40x



(d) 石英压溶及次生加大呈紧密镶嵌状接触,见少量残余粒间孔。高 102-4 井,3558.32m,长石岩屑粗砂岩,单偏光,蓝色铸体,40x

图 5 高尚堡深层沙三段典型成岩储集相铸体薄片特征

Fig. 5 Typical diagenetic reservoir facies of Es<sub>3</sub> formation in deep Gaoshangpu oilfield

(3) C 相:强压实强胶结剩余粒间孔成岩储集相。

岩性主要为长石岩屑和岩屑长石粉砂岩,部分中、细砂岩。压实作用强烈,形成缩小的粒间孔,强烈胶结作用形成残余粒间孔。溶解作用中等,形成部分粒间溶孔,储集空间组合类型为缩小粒间孔及剩余粒间孔,部分粒间次生溶孔,属强压实强胶结中等溶解。孔隙度低,为 5%—11%。由于粒间有较多自生矿物充填,致使孔隙连通性差,孔喉半径小,渗透率较低,为  $1 \times 10^{-3} - 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。此类成岩储集相主要发育于河道的细砂岩、粉砂岩中,形成低孔低渗特细喉储层(图 5(c))。

(4) D 相:极强压实强胶结致密成岩储集相。

岩性主要为粉砂岩。压实作用极强,形成缩小粒内孔,溶解作用较弱,形成少部分粒间孔。储集空间组合类型为缩小粒内孔、剩余粒间孔。孔隙度极低,小于 5%。由于方解石、白云石、黄铁矿等自生矿物充填,使孔隙连通性变差,渗透率极低,小于  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。此类成岩储集相主要发育于远砂坝的粉砂岩中,形成低孔特低渗微细喉储层(图 5(d))。

在取心井中识别出 4 类成岩储集相后,建立遗传神经网络进行成岩储集相识别的学习及预测模型,对研究区各井各

小层进行成岩储集相的识别。该方法分类速度快,有很强的实用性。

4.4 成岩储集相的平面展布

上述 4 种成岩储集相中,以不稳定组分溶解次生孔隙成岩储集相(A 相)储集性能最好,为最有利的储层;中强压实强胶结残余粒间孔成岩储集相(B 相)的储集性能次之,为有利储层;强压实强胶结剩余粒间孔成岩储集相(C 相)的储集性能较差,为较有利储层;极强压实强胶结致密成岩储集相(D 相)的储集性能最差,为差储层。

在成岩储集相研究过程中发现,研究区的成岩作用强度与构造运动、埋藏深度和埋藏史关系密切。构造作用使砂岩层发生不同程度的破碎和裂缝,成为天水淋滤和地下水的主要通道,改变了砂岩中孔隙水的化学性质,使砂岩中不稳定组分发生化学反应,导致矿物的溶解、沉淀,造成次生孔隙的发育,改善了储层的储集条件<sup>[9]</sup>。研究区储层埋藏历史较长,埋藏深度较大,其储层物性的控制因素包括沉积环境、构造背景、碎屑颗粒的物理化学性质等,在成岩演化过程中,二次层间水脱出形成的 CO<sub>2</sub> 酸性孔隙水和排出的大量有机酸溶



蚀了不稳定组分和胶结物等易溶组分,形成了有利的成岩储集相带。

因此,在研究成岩储集相的平面展布时,除了依据神经网络识别结果,还考虑了上述控制成岩演化的地质因素与岩性和沉积相之间的关系,在此基础上绘制了各小层成岩储集相

的平面展布图(图6和图7)。A类成岩储集相主要分布在靠近东北侧物源的主河道和河口坝中,B类成岩储集相主要分布在河道中,C类成岩储集相主要分布在河道侧缘中,D类成岩储集相则主要分布在远砂坝中。成岩储集相研究表明,有利的沉积相及有利的成岩储集相的有机结合形成高质量储集层。

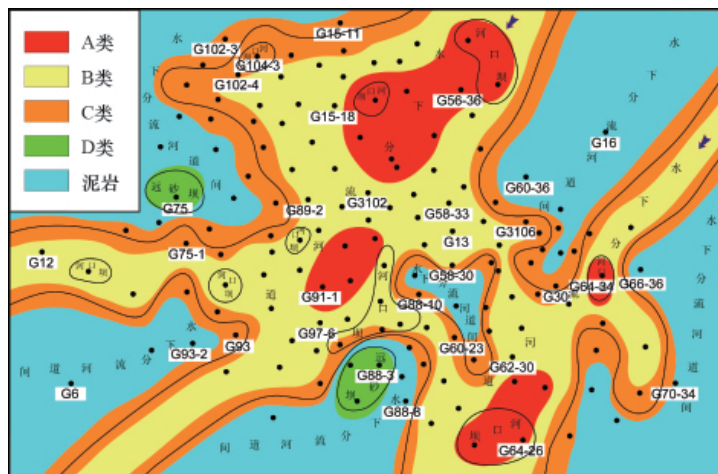


图6 8小层成岩储集相展布

Fig. 6 Diagenetic reservoir facies distribution of 8th mini layer

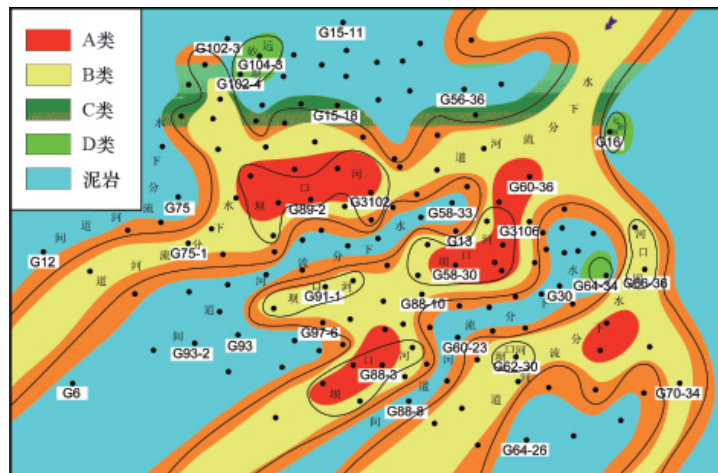


图7 6小层成岩储集相展布

Fig. 7 Diagenetic reservoir facies distribution of 6th mini layer

### 5 结论

(1) 高尚堡深层  $Es_3$  亚段为扇三角洲沉积,主要发育扇三角洲前缘亚相。广泛发育的水下分流河道和河口坝砂体为油气的聚集提供了有利场所。

(2) 高尚堡深层  $Es_3$  亚段储层空间以原生粒间孔为主,孔隙度为 13.8%左右,渗透率为  $36.1 \times 10^{-3} \mu m^2$  左右。 $Es_3$  亚段储层上部比下部好,总体属中孔低渗型储层。

(3) 压实、胶结、溶解作用是高尚堡油田深层  $Es_3$  亚段最主要的 3 种成岩作用类型。本区储层砂岩较低渗透率的主要成因是成岩期强烈的压实作用及各种自生矿物的充填和胶结作用。造成储层砂岩不稳定组分和胶结物溶解的主要是二

次层间水脱出形成的  $CO_2$  酸性孔隙水和有机质演化形成的有机酸。

(4) 通过变换的 Cozeny-Carman 方程,采用流动层带指标、孔隙度、渗透率、粒度中值、泥质含量、排驱压力、孔喉半径均值、变异系数等参数,应用遗传神经网络方法,可以定量识别低渗透储层的成岩储集相,并结合沉积相、储集空间类型、储层微观孔隙结构,使分类结果更符合客观实际。

(5) 提出了在低渗透油田开发调整阶段应用成岩储集相进行储集层质量评价的方法。成岩储集相研究表明,有利的沉积相及有利的成岩储集相的有机结合形成高质量储集层。

## 参考文献 (References)

- [1] 刘伟, 窦齐丰, 黄述旺, 等. 成岩作用的定量表征与成岩储集相研究——以科尔沁油田交 2 断块区九佛堂组 J3j<sub>f</sub> 下段为例[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(5): 399-403.  
Liu Wei, Dou Qifeng, Huang Shuwang, et al. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2002, 31(5): 399-403.
- [2] 黄述旺, 窦齐丰. 吉林四五家子油田下白垩统泉二段储层成岩储集相及储集空间演化 [J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2002, 27 (6): 723-728.  
Huang Shuwang, Dou Qifeng. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2002, 27(6): 723-728.
- [3] 刘伟, 窦齐丰. 成岩作用与成岩储集相研究——科尔沁油田交 2 断块区九佛堂组 J3j<sub>f</sub> 下段[J]. 西安石油学院学报: 自然科学版, 2003, 18(3): 4-8.  
Liu Wei, Dou Qifeng. *Journal of Xi'an Petroleum Institute: Natural Science Edition*, 2003, 18(3): 4-8.
- [4] 李海燕, 彭仕必, 黄述旺, 等. 山东渤南油田古近系沙河街组沙二段及沙三段低渗透储层成岩储集相[J]. 古地理学报, 2004, 6(4): 503-513.  
Li Haiyan, Peng Shimi, Huang Shuwang, et al. *Journal of Palaeogeography*, 2004, 6(4): 503-513.
- [5] 李海燕, 彭仕必. 应用遗传神经网络研究低渗透储层成岩储集相——以胜利渤南油田三区沙河街组为例 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27 (1): 111-117.  
Li Haiyan, Peng Shimi. *Oil and Gas Geology*, 2006, 27(1): 111-117.
- [6] 李海燕, 彭仕必. 苏里格气田低渗透储层成岩储集相特征[J]. 石油学报, 2007, 28(3): 100-104.  
Li Haiyan, Peng Shimi. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(3): 100-104.
- [7] 宋子齐, 王静, 路向伟, 等. 特低渗透油气藏成岩储集相的定量评价方法[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(2): 21-23.  
Song Ziqi, Wang Jing, Lu Xiangwei, et al. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2006, 13(2): 21-23.
- [8] 邹才能, 侯连华, 匡立春, 等. 准噶尔盆地西缘二叠—三叠系扇控成岩储集相成因机理[J]. 地质科学, 2007, 42(3): 587-601.  
Zou Caineng, Hou Lianhua, Kuang Lichun, et al. *Chinese Journal of Geology*, 2007, 42(3): 587-601.
- [9] 徐樟有, 吴胜和, 张小青, 等. 川西坳陷新场气田上三叠统须家河组须四段和须二段储集层成岩—储集相及其成岩演化序列[J]. 古地理学报, 2008, 10(5): 447-458.  
Xu Zhangyou, Wu Shenghe, Zhang Xiaoqing, et al. *Journal of*

- Palaeogeography*, 2008, 10(5): 447-458.
- [10] Fu G M, Qin X L, Miao Q, et al. Division of diagenesis reservoir facies and its control—case study of Chang-3 reservoir in Yanchang formation of Fuxian exploration area in northern Shanxi [J]. *Mining Science and Technology*, 2009, 19(4): 537-543.
- [11] 宋子齐, 王瑞飞, 孙颖, 等. 基于成岩储集相定量分类模式确定特低渗透相对优质储层——以 AS 油田长 61 特低渗透储层成岩储集相定量评价为例[J]. 沉积学报, 2011, 29(1): 88-96.  
Song Ziqi, Wang Ruifei, Sun Ying, et al. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(1): 88-96.
- [12] Pondrelli M, Rossi A P, Platz T, et al. Geological, geomorphological, facies and allostratigraphic maps of the Eberswalde fan delta [J]. *Planetary and Space Science*, 2011, 59: 1166-1178.
- [13] Cowan G. Diagenesis of upper carboniferous sandstones: southern North Sea Basin [C]//Whateley M K G, Pickering K T. Deltas: Sites and Traps for Fossil Fuels. London: Geological Society of London Special Publication, 1989: 57-73.
- [14] Dixon S A, Summers D M, Surdam R C. Diagenesis and preservation of porosity in Norphlet Formation (Upper Jurassic), southern Alabama[J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73(6): 707-728.
- [15] Worden R H, Oxtoby N H, Smalley P C. Can oil emplacement prevent quartz cementation in sandstones [J]. *Petroleum Geoscience*, 1998, 4(2): 129-137.
- [16] Alaa M, salem S, Morad S. Diagenesis and reservoir-quality evolution of fluvial sandstones during progressive burial and uplift: Evidence from the Upper Jurassic Boipeba Member, Revoncavo Basin [J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84(7): 1015-1040.
- [17] 王琪, 糕喜准, 陈国俊, 等. 鄂尔多斯西部长 6 砂岩成岩演化与优质储层[J]. 石油学报, 2005, 26(5): 17-23.  
Wang Qi, Zhuo Xizhun, Chen Guojun, et al. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26(5): 17-23.
- [18] Richard P L. An Introduction to computing with neural nets [J]. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Application Specific Standard Parts Magazine*, 1987, 4(2): 4-22.
- [19] 苏妮娜, 金振奎, 宋璠, 黄骅坳陷北大港油田古近系碎屑岩储层成岩作用及其对储层质量的影响[J]. 科技导报, 2009, 27(9): 57-64.  
Su Nina, Jin Zhenkui, Song Fan. *Science and Technology Review*, 2009, 27(9): 57-64.

(责任编辑 安莹, 刘志远)

## · 科学共同体介绍 ·

## 中国细胞生物学学会

中国细胞生物学学会 (Chinese Society for Cell Biology) 是中国科学院上海细胞生物学研究所前所长**庄孝德**、副所长**姚鑫**和**汪德耀**、**罗士韦**、**郑国锴**等国内著名细胞生物学家于 1978 年筹备, 1979 年 3 月经全国科学技术协会 (中国科协) 主席团批准, 在 1980 年 7 月正式成立的全国性学术团体。中国细胞生物学学会隶属中国科协领导, 挂靠中国科学院上海生命科学研究院。**庄孝德**任第一届理事会理事长。

中国细胞生物学学会是中国共产党领导下的我国细胞生物学工作者的学术性群众团体, 现有会员 5000 余人, 设 13 个专业分会。学会的业务范围是: 学术交流、业务培训、书刊编辑、国际合作、咨询服务。

1982 年中国细胞生物学学会参加国际细胞生物学联盟 (IFCB); 1988 年学会发起并参加筹备成立亚洲太平洋细胞生物学组织 (APOCB), 并于 1990 年在上海召开了 APOCB 第一届学术大会, **姚鑫**院士担任第

一届学术大会主席; 1996 年组织召开第一届海峡两岸细胞生物学研讨会, 并于 2012 年起每年举行一届。学会还主办《Cell Research》、《Journal of Molecular Cell Biology》和《中国细胞生物学学报》等刊物。

中国细胞生物学学会于 2011 年 7 月在北京召开第 12 次会员代表大会, 选举产生第十届理事会, **裴钢**院士任理事长, **丁小燕**研究员任秘书长。

(责任编辑 秦政)