

济阳坳陷深层砂岩成岩作用及孔隙演化*

蔡进功^{1,2}, 谢忠怀², 田芳², 王文林²

(1. 同济大学海洋地质教育部重点实验室, 上海 200092;

2. 胜利油田地质科学研究所, 山东东营 257015)

摘要: 济阳坳陷深层发育的三角洲相、扇三角洲相及冲积扇相砂岩, 是以填隙物微孔隙和粒间孔为主的低孔低渗、中孔低渗型储层。从总体上讲, 压实作用使粒间孔隙随深度的增加而减少, 但三角洲相砂岩抗压实作用强, 利于粒间孔隙的保存; 石英次生加大、绿泥石和高岭石的充填、铁方解石和铁白云石等的胶结使粒间孔隙减少, 溶解作用可以随深度的增加产生大量有机酸, 在喷出岩屑中形成大量的岩屑溶蚀孔, 利于深部储层次生孔隙的形成。次生孔隙和微孔隙成为深部储层的主要储集空间类型。晚成岩 A 亚期有机酸大量排出, 形成长石和岩屑等溶蚀孔, 使溶蚀孔、粒间孔和微孔隙并存; B 亚期有机酸与 CH_4 、 CO_2 并存, 绿泥石占据了孔隙, 阻止了碳酸盐的沉淀, 使微孔隙和溶蚀孔得以保存; C 亚期有机酸减少, CH_4 、 CO_2 增加, 利于构造、成岩裂缝形成, 保存大量微孔隙, 改善了储集性能。

关键词: 济阳坳陷; 深层砂岩; 沉积相; 储集层; 成岩作用; 演化模式

第一作者简介: 蔡进功, 男, 39 岁, 高级工程师(博士生), 海洋沉积

中图分类号: P618.130.2⁺1

文献标识码: A

济阳坳陷位于渤海湾盆地东部, 第三系沉积厚度逾 6 000 m, 主要由湖相成因的砂岩与泥岩组成, 油气资源极其丰富。深层油气勘探正陆续展开^[1], 前人已从温度及异常压力的角度探讨了深层储集层的特点^[2~5], 但尚未曾对成岩作用及孔隙的演化机理进行探讨。本文选取济阳坳陷的临南、渤南和潍北洼陷的三角洲相、扇三角洲相和冲积扇相砂岩, 对埋藏深度在 3 500 m 以下或层位属沙河街组四段和孔店组的 10 余口井的岩芯, 进行了岩石薄片 X 衍射粘土分析、扫描电镜、包裹体分析以及岩芯观察, 研究济阳坳陷深层砂岩的成岩作用及孔隙演化规律, 为油气勘探服务。

1 概况

1.1 砂体相类型

1.1.1 三角洲

三角洲相砂岩主要发育于惠民凹陷临南洼陷的临邑大断层下降盘, 属沙河街组三段。由细-中粒长石砂岩组成, 磨圆度为次棱角状-次圆状, 石英含量 42%~47%, 长石含量 27%~36%,

岩屑含量 2%~3%, 变质岩屑 10%~17%, 沉积岩屑 4%~7%, 见介形虫碎片, 成分成熟度较高, 结构成熟度中等。

1.1.2 扇三角洲

扇三角洲相砂岩主要发育于沾化凹陷的渤南洼陷中, 属沙河街组三段。代表井为 XBS1, ZHS1, BS4 井等。由砾岩、含砾砂岩、粗砂岩和中砂岩、粉砂岩组成, 被深灰色泥岩所包围。颗粒分选中等, 磨圆度为次圆状-次棱角状。岩性为长石岩屑砂岩, 石英含量 31%~43%, 长石 15%~25%, 岩屑含量高达 40%~45%, 成分成熟度较低, 结构成熟度中等。

1.1.3 冲积扇

冲积扇相砂岩在潍北凹陷的潍北断层下降盘较发育, 钻遇井为 Y1, CH11, Y5 和 CH67 井等, 属于孔店组二段。由紫红色砂砾岩、含砾砂岩及灰绿色砂岩和粉砂岩组成, 分选性极差-中等, 磨圆度为次棱角-棱角状, 部分砾岩杂基含量 10%~25%, 结构成熟度较低。冲刷构造、块状层理、递变层理和水平层理发育。砂岩成分中石英含量 27%~29%, 长石 18%~20%, 岩屑 46%~55%, 成分成熟度较低。

1.2 储集性质

1.2.1 物性

据岩芯分析资料统计, 深部砂岩储集层的物性

* 中国石油化工总公司“九五”科技攻关课题“深层石油地质综合研究及目标评价”的部分成果

收稿日期: 2001-08-02

较差, 孔隙度 $0.5\% \sim 19.2\%$, 渗透率 $0.01 \times 10^{-3} \sim 74 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 具有中孔低渗或低孔低渗的特点, 但在不同沉积相中表现出差异性。三角洲相砂岩储集层孔隙度和渗透率较高, 且较集中分布; 冲积扇相和扇三角洲相砂岩储集层孔隙度和渗透率变化较大。

孔隙度与渗透率的关系较复杂(图1), 砂岩孔隙度大于 $5\% \sim 8\%$ 时, 其孔隙度和渗透率呈半对数正相关, 表明在砂岩埋藏过程中, 喉道的缩小和孔隙的逐渐充填是同时进行的; 当孔隙度小于 $5\% \sim 8\%$ 时, 孔隙度和渗透率之间无一定变化规律, 渗透率忽高忽低, 但一般小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

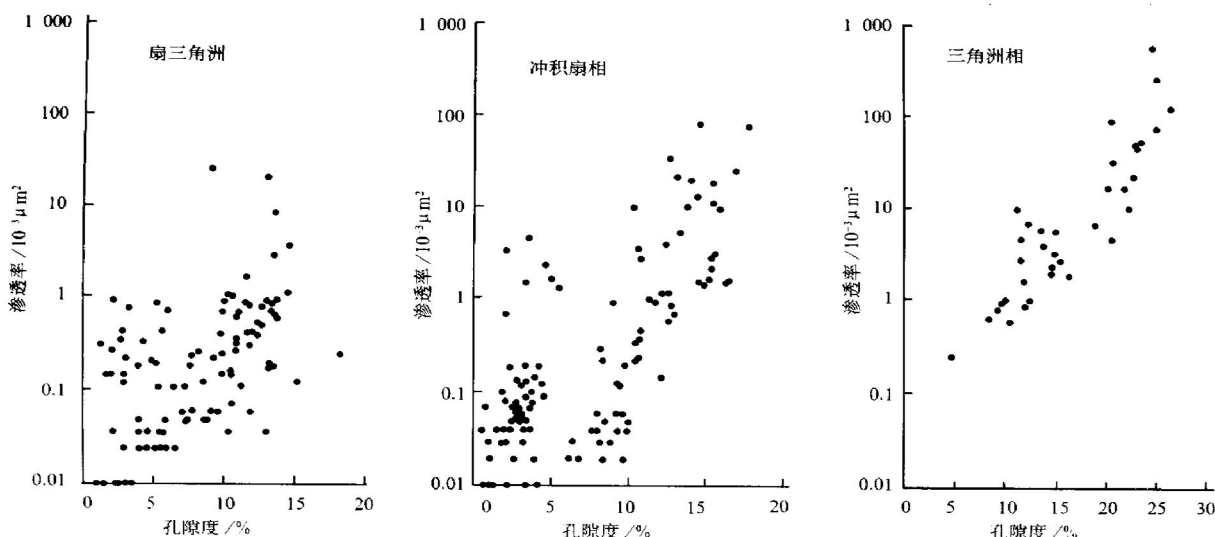


图1 济阳拗陷深层砂岩孔隙度与渗透率关系图

Fig. 1 Relationship between porosity and permeability of deep sandstones in Jiyang Depression

1.2.2 孔隙类型

研究区中的砂岩见粒间孔、粒内孔、填隙物内孔和裂缝4种类型。粒间孔既有次生成因, 又有原生成因, 表现为充填剩余粒间孔和溶蚀扩大的粒间超大孔, 偶见未充填的粒间孔; 粒内孔为长石和岩屑颗粒溶解成蜂巢状和残骸状的孔隙, 属次生溶蚀孔隙; 填隙物内孔为碳酸盐胶结物的溶蚀孔隙或自生粘土矿物对粒间孔(粒内孔)分割成晶片间的微小孔隙; 与构造运动有关的构造裂缝具有边

缘平直、延伸长度大的特点, 裂缝倾角较大, 一般为 $70^\circ \sim 90^\circ$, 可细分为张性缝或张扭性缝, 亦可被矿物充填; 与压溶作用有关的压溶裂缝具有不均匀溶解裂缝边缘, 易与构造裂缝相区分。填隙物内孔和粒内孔是济阳拗陷深部砂岩储集层的主要孔隙类型。

2 成岩作用

2.1 机械压实

研究区是一个持续下沉的拗陷, 随着压实作用

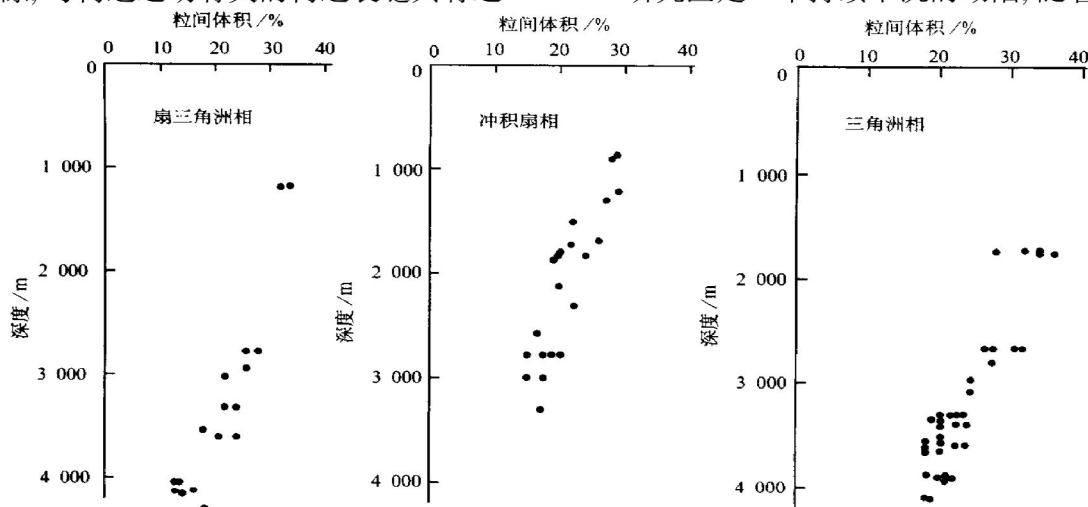


图2 济阳拗陷深层砂岩粒间体积与深度关系图

Fig. 2 Relationship between depth and intergranular volume of deep sandstones in Jiyang Depression

的加强,固体颗粒间的体积逐渐降低。从图2中可以看出,随着埋藏深度增加,砂岩的粒间体积逐渐减小,在埋藏深度4 200 m时,扇三角洲相和冲积扇相砂岩的粒间体积下降到13%~14%;而三角洲相砂岩的粒间体积稳定在18%~20%之间,表明三角洲相砂岩成分成熟度较高、抗压实作用较强,有利于粒间孔的保存。

2.2 自生矿物的沉淀和交代

(1) 石英次生加大和充填。深层砂岩中自生石英多呈加大边或细小晶体充填于粒间孔。三角洲相砂岩中石英含量高,次生加大比较发育,加大边宽度可达20~100 μm ;扇三角洲相和冲积扇相砂岩由于颗粒表面有泥质薄膜,故石英的次生加大少见。

(2) 长石次生加大。深层砂岩中长石加大边的宽度一般为20~75 μm ,常与自生石英共生。阴极发光分析显示,早期的加大边为钾长石,发亮蓝色光,晚期的加大边为钠长石,发绿色光。

(3) 碳酸盐胶结和交代。深层砂岩中碳酸盐胶结物普遍存在,含量0.2%~42.2%不等。它包括方解石、铁方解石、铁白云石3种矿物。

方解石属早期成岩作用产物,呈自形粒状和嵌晶状。

铁方解石常交代方解石、碎屑颗粒或充填孔隙中,在渤南洼陷和临南洼陷2 200 m开始出现,而潍北凹陷在2 700 m却只见到少量铁方解石,反映

了成岩环境的差异。

铁白云石呈自形菱面体,充填于孔隙中或交代方解石和其他颗粒,在渤南洼陷2 700 m开始出现,但在4 300 m以下几乎见不到铁白云石;潍北凹陷3 000 m开始出现,3 600 m以下特别发育,含量最高可达10%左右;临南洼陷2 500 m开始出现,随埋深增加含量逐渐增高至1%~10%不等。

2.3 粘土矿物沉淀和相互转化

(1) 伊/蒙混层粘土矿物。蒙脱石主要发育于浅部地层,随着埋藏深度的增加蒙脱石逐渐地向伊利石转化,形成伊/蒙混层比不同的混层矿物。

(2) 高岭石。高岭石呈假六方片状,集合体为书页状和蠕虫状,附着颗粒表面或充填孔隙中,表现为浅层少、中层多、深层少的正态分布的趋势。

(3) 伊利石。分布最为普遍,呈片状和毛发状集合体,生长于孔隙壁,形成孔隙衬垫或“桥接”。随深度而增加,并与高岭石互相消长。

(4) 绿泥石。绿泥石呈晶片状,沿颗粒表面呈径向分布,或充填于孔隙中,把孔隙分割成微孔隙。深层砂岩中绿泥石较发育(图3),并随埋深增加而增大,在渤南洼陷和潍北凹陷发育较好,临南洼陷发育最差。经分析发现砂岩中喷出岩屑含量高,绿泥石含量也相对较高,表明绿泥石的含量主要受物源的影响。

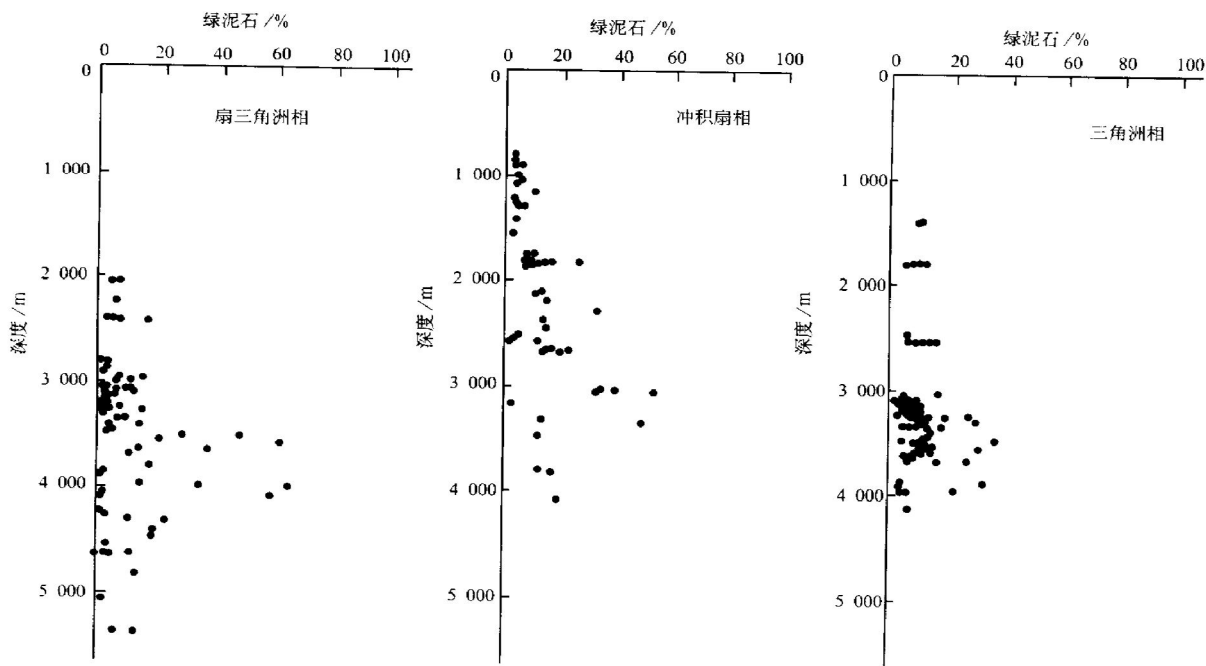


图3 济阳坳陷深层砂岩绿泥石相对含量与深度关系图

Fig. 3 Relationship between depth and relative chlorite contents of deep sandstones in Jiyang Depression

2.4 溶解作用

随着埋藏深度的增加, 泥岩中的有机质产生大量的有机酸, 当温度达到 $80\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时^[6], 有机酸的浓度最大; 当温度升至 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 有机酸脱去羟基产生 CO_2 和 CH_4 , 这为砂岩中碳酸盐和硅酸盐矿物的溶解奠定了基础。当有机酸和 CO_2 进入储集层时, 长石和碳酸盐等矿物发生溶解, 形成溶蚀孔、高岭石和硅酸以及 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 等产物^[7~9]。Y160 L82 井深部储集层中发育长石、方解石和白

云石溶蚀孔隙就是实例; 喷出岩屑亦可溶解, 形成溶蚀孔, 如 BS4 井由于砂岩中喷出岩屑含量较高, 形成了大量的喷出岩屑溶蚀孔, 这表明溶解作用有利于深部储集层中次生孔隙的形成。

3 成岩阶段与孔隙演化

根据济阳坳陷深层储集层特征、粒间体积变化、成岩矿物共生组合等, 建立了该区成岩作用和孔隙演化模式(图4)。

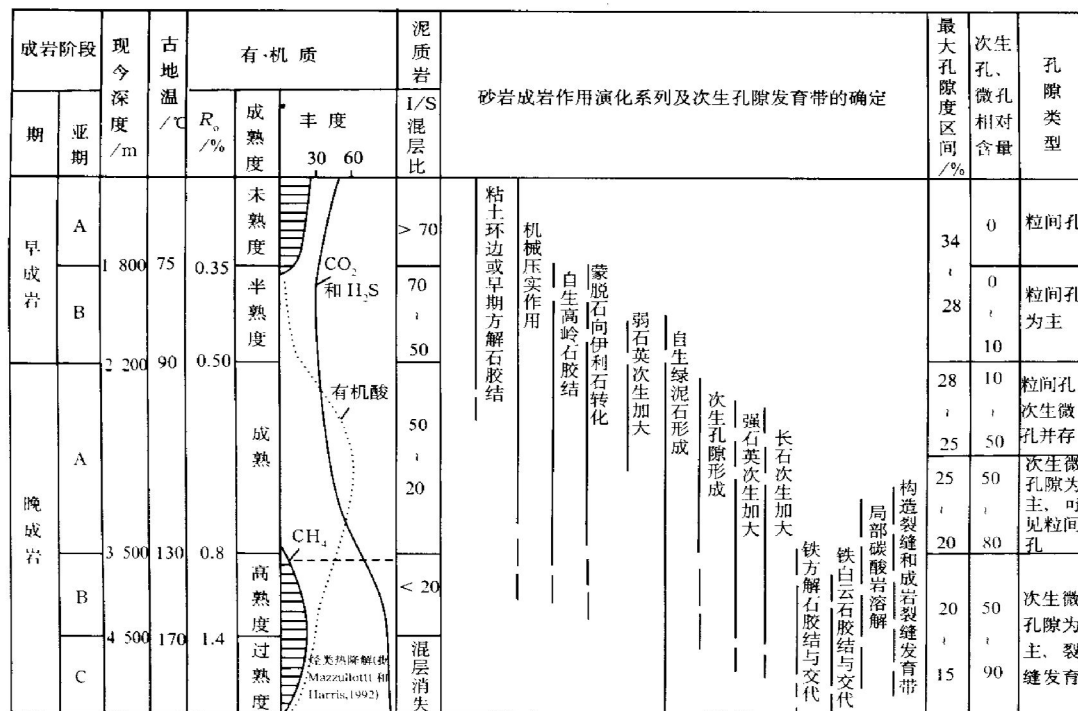


图4 济阳坳陷深层砂岩成岩作用及孔隙演化模式图

Fig. 4 Model Showing diagenesis and pore evolution of deep sandstones in Jiyang Depression

早成岩期的古地温为 $75\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, 镜质体反射率 $0.35\%\sim 0.50\%$, 该期的特征前人已有介绍^[10], 这里不再赘述。

晚成岩期的古地温较高, 镜质体反射率较大, 有机质进入成熟阶段, 依据成岩特征的差异可划分出 A, B, C 3 个亚期。

(1) 晚成岩 A 亚期的古地温 $90\sim 130\text{ }^{\circ}\text{C}$, 镜质体反射率 $0.5\%\sim 0.8\%$, 有机质已成熟, 排出大量的有机酸, 形成长石和喷出岩屑等溶蚀孔, 造成了粒间孔、溶蚀孔和微孔隙并存的局面, 同时产生溶解态的 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} 离子以及高岭石和硅酸等产物, 可以形成自生高岭石和绿泥石、铁方解石和铁白云石、长石和石英的次生加大等成岩矿物, 降低了孔隙度, 如淮北凹陷 Y5 井是其典型实例。

(2) 晚成岩 B 亚期的古地温 $130\sim 170\text{ }^{\circ}\text{C}$, 镜质体反射率 $0.8\%\sim 1.4\%$, 有机质进入高成熟阶段,

砂岩中有机酸产生脱羧反应^[6], 生成大量 CH_4 和 CO_2 , 导致有机酸数量减少, CO_2 分压 (P_{CO_2}) 逐步增加, 水介质的 pH 值降低, 有利于晚期碳酸盐的溶解, 形成溶蚀孔隙, 特别是构造裂缝和成岩裂缝发育的地区, 这种溶蚀孔特别发育, 淮北凹陷深部次生孔隙的产生与此有密切的关系。由于 A 亚期有机酸溶解产生溶解态的 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} 离子数量的增加, 进一步奠定了 B 亚期绿泥石形成的物质基础, 而大量的自生绿泥石产生, 占据了孔隙的空间, 阻止了含铁碳酸盐的沉淀, 使微孔隙和溶蚀孔得以保存, 渤南洼陷的扇三角洲相及淮北凹陷的冲积扇相砂岩的孔隙发育是其实例。

(3) 晚成岩 C 亚期的古地温 $170\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 镜质体反射率大于 1.4% , 有机质进入过成熟阶段, 有机酸的数量急剧减少, CH_4 和 CO_2 急剧增加^[11], 产生压力局部增大, 更有利于自生绿泥石以

及多期成因的高角度($60^{\circ} \sim 70^{\circ}$)构造裂缝和成岩裂缝的形成,可以保存大量的微孔隙。

4 小结

深层砂岩沉积埋藏以来,成岩环境及其水-岩体系发生一系列变化,主要表现在随着埋藏深度的增加,成岩作用加强,石英次生加大、绿泥石和高岭石的充填、铁方解石和铁白云石等碳酸盐的胶结以及溶解作用的产生造成粒间孔逐渐减少,次生孔隙和微孔隙逐渐增加。次生孔隙和微孔隙,成为深层储集层的主要储集空间类型。

另外,由于成岩环境的差异,不同成因类型砂岩的孔隙演化具有特殊性。三角洲相砂岩因砂岩具有较高的成熟度,减缓了压实作用的影响,形成了以粒间孔隙为主的孔隙类型,储层物性较好,具有极大的油气勘探潜力。如渤南洼陷扇三角洲相砂岩因砂岩中粘土矿物沿颗粒环边生长,使粒间孔和早期形成的溶蚀孔隙最大限度地变成微孔隙,储层物性仍较高,表明该类型的储层在3 600 m到4 300 m范围内仍有勘探价值。冲积扇相砂岩以填隙物微孔为主,但盆地晚期的抬升,造成储集层中微裂缝发育,填隙物微孔得以连通,提高了储集层的储集性。

参 考 文 献

- 1 王秉海,钱凯.胜利油区地质研究与勘探实践[M].山东东营:石油大学出版社,1992
- 2 苗建宇,祝总祺.济阳坳陷下第三系温度、压力与深部储层次生孔隙的关系[J].石油学报,2000,21(3):36~40
- 3 杨绪充.东营凹陷地温特征及深部勘探问题[J].石油学报,1984,5(3):19~26
- 4 彭大钧,李仲东,刘兴材,等.济阳盆地沉积型异常高压带及深部油气资源的研究[J].石油学报,1988,9(3):9~17
- 5 Hunt J M. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartment[J].AAPG Bull,1990,74(1):1~12
- 6 Surdam R C, Crossey L J. 渐进埋藏期间的有机-无机反应:孔隙度和渗透率保存的关键[J].张金亮译.国外油气勘探与开发,1987,11(1):7~25
- 7 朱国华,张卫平.煤系地层砂岩成岩作用和孔隙演化研究[J].石油勘探与开发,1993,20(1):39~47
- 8 郑浚茂,应凤祥.煤系地层(酸性水介质)的砂岩储层特征及成岩模式[J].石油学报,1997,18(4):19~24
- 9 Huang W L, Longo J M. 储层地球化学进展——有机酸与次生孔隙综述[J].张敏译.世界石油科学,1992,54(3):29~32
- 10 周自立,吕正谋.山东胜利油田第三系碎屑岩埋藏成岩作用与储层评价的关系[J].地球科学,1987,12(3):311~318
- 11 Mazzulo S J, Harris P M. Mesogenetic dissolution its role in porosity development in carbonate reservoirs[J].AAPG Bull,1992,76(5):607~620

DIAGENESIS AND PORE EVOLUTION OF DEEP SANDSTONES IN JIYANG DEPRESSION

Cai Jingong^{1,2} Xie Zhonghuai² Tian Fang² Wang Wenlin²

(1. The Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai; 2. Geosciences Institute,
Shengli Petroleum Administration, Dongying, Shandong)

Abstract: The deep sandstone of delta, far-delta and fluvial fan facies are low porosity-low permeability or mid porosity-low permeability reservoirs with filling micropores and intragranular pores. In general, the intragranular porosity decreased with the increasing of sandstone burial depth; the secondary enlargement of quartz, the filling of chlorite and kaolinite, the cementation of iron-calcite and iron-dolomite reduced the porosity; solution in deep strata resulted in large amount of eroded pores. Late diagenesis could be divided into A, B and C diagenetic substages. Considerable organic acids in A substage caused solution pores in feldspar and debris; in the B substage, CH₄ and CO₂ existed, chlorite filled the pores, thus preserved micropores and solution pores; in the C substage, organic acids decreased and CH₄, CO₂ increased, thus forming fractures and improving reservoir property.

Key words: Jiyang Depression; deep sandstone; sedimentary facies; reservoir; diagenesis; evolution model