

东营凹陷古近系砂岩成岩作用与孔隙演化

游国庆¹, 潘家华¹, 刘淑琴¹, 陈永娇²

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 长江大学, 湖北 荆州 434023)

摘要: 东营凹陷是重要的油气富集区, 在古近系地层发育湖相水下扇沉积、滨浅湖沉积和三角洲沉积等砂岩。砂岩的成岩作用及孔隙演化对储层的储集性能有重要影响。在对大量薄片和岩心进行分析的基础上, 运用扫描电镜和 X 衍射粘土分析等手段, 对东营凹陷砂岩储层的成岩作用和孔隙演化进行了研究。研究表明, 该区压实作用、胶结作用使砂岩孔隙度降低, 不稳定矿物的溶蚀作用和碳酸盐胶结物的溶解作用导致孔隙度增大。根据有机质的演化及粘土矿物的变化序列, 在不同的构造单元, 砂岩成岩作用和孔隙演化随埋深具有明显的规律性, 可划分出原生孔隙带、原生次生孔隙带和次生孔隙带 3 个孔隙演化带, 存在着较有利的次生孔隙发育带。

关键词: 东营凹陷; 古近系; 砂岩储层; 成岩作用; 次生孔隙

中图分类号: P588.21⁺2.3; P618.130.2⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-6524(2006)03-0237-06

Diagenesis and pore evolution of Paleogene sandstone reservoir in Dongying depression

YOU Guo-qing¹, PAN Jia-hua¹, LIU Shu-qin¹ and CHEN Yong-qiao²

(1. Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2. Yangtze University, Hubei 434023, China)

Abstract: Dongying depression is one of the most prolific hydrocarbon areas in China. The Paleogene stratum consists of underwater fan, littoral-shallow lacustrine and delta facies sandstones. Diagenesis and pore evolution have exerted great effects on the properties of reservoir rocks. The study performed by the authors is of significance in finding favorable reservoir zones in Dongying depression. Many thin sections were analyzed by such means as standard petrographic microscope, X-ray diffraction and scanning electron microscope analysis so as to study the selected samples. Diagenetic complexity shows that compaction and cementation lead to decrease in porosity, whereas solution of unsteady minerals and carbonate cements result in increase in porosity. The evolution of organic materials and the sequence of clay minerals suggest that the diagenesis and the pore evolution of the sandstone in different structural belts varied obviously with the increase of the buried depth, and the reservoirs might be classified into three pore evolution zones, namely, the primary shallow pore zone, the primary-secondary transitional pore zone, and the secondary deep pore zone. The sandstones serve as well-developed secondary pore zones.

Key words: Dongying depression; Paleogene; sandstone reservoir; diagenesis; secondary pore

东营凹陷位于渤海湾盆地东部, 属于济阳拗陷 缓坡带、中央隆起带及洼陷带 4 个单元(图 1), 面积中的一个次级构造单元, 被划分为北部陡坡带、南部 5 700 km²。该凹陷在古近纪地层沉积厚逾 5 000 m,

收稿日期: 2005-07-28; 修订日期: 2006-03-10

基金项目: 科技部国际合作资助项目(2002CB713906)

作者简介: 游国庆(1964-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事石油地质勘探与开发研究。

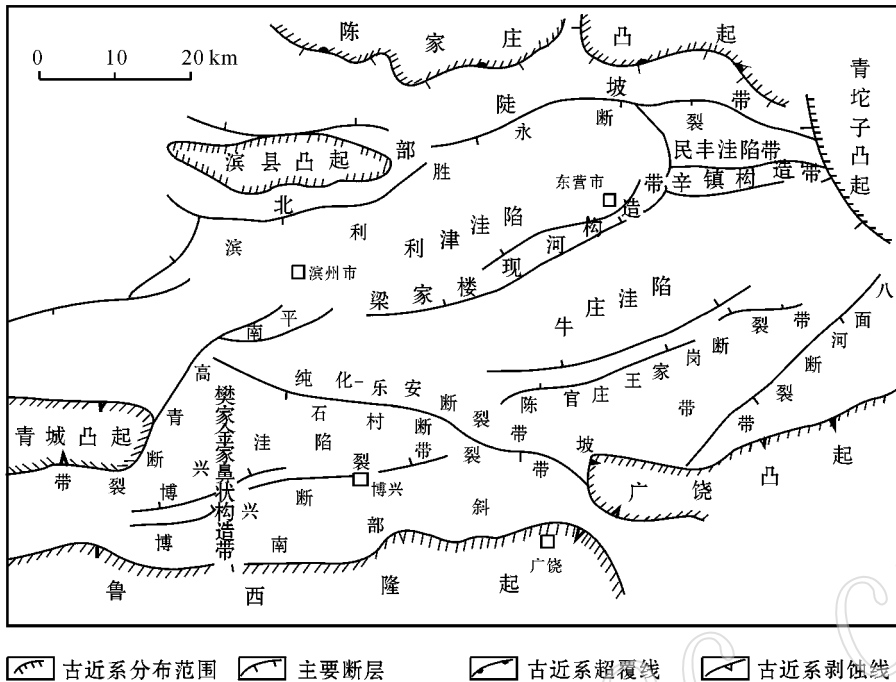


图 1 东营凹陷构造分区地理位置图

Fig. 1 Schematic map showing tectonic unites division in Dongying depression

主要由湖相成因的砂岩和泥岩组成,发育河流相、三角洲相、扇三角洲相、滨浅湖相以及半深-深湖相浊积扇等砂岩,油气资源十分丰富(李丕龙等,2000;冯有良等,2001)。东营凹陷砂岩储层与成岩作用和次生孔隙的发育密切相关,许多学者对其进行了研究。周自立等(1987)、钱铮等(1996)、宋明水(2005)分别对胜利油田、济阳凹陷和东营凹陷的成岩作用、成岩序列进行了一些研究,苗建宇等(2000)、吕正谋(1985)探讨了济阳凹陷、东营凹陷的砂岩储层次生孔隙变化的影响因素,蔡进功等(2002)建立了济阳凹陷成岩与孔隙演化模式。随着勘探的不断深入,对凹陷不同构造单元砂岩储集体的研究将不断深化,也将具有更重要的意义。为此,笔者根据凹陷不同构造分区的岩石薄片和物性资料,运用扫描电镜、X衍射粘土分析及岩心观察探讨研究区不同构造单元砂岩成岩作用与孔隙演化规律,为进一步勘探寻找有利砂岩储集带。

1 砂岩成岩作用

东营凹陷古近系砂岩在沉积物埋藏过程中,经历了压实作用、胶结作用、溶蚀作用、重结晶作用等成岩作用,主要成岩作用为前3种。

1.1 压实作用

砂岩的压实作用主要为机械压实作用,在镜下表现为塑性颗粒如云母、岩屑的塑性变形,颗粒间的接触关系随压实作用的增强表现为点—线—凹凸—缝合线接触的变化以及颗粒压实的定向排列(图2a)。

压实作用主要出现在沉积物埋藏早期。总体上讲,沉积物埋藏深度每增加100 m,孔隙度降低0.75%,到深部,压实作用的减孔率降低,约为0.55%。这表明压实作用对孔隙度有一定的影响,但影响不太大。这一特征可能与该区碎屑成分以刚性矿物(石英、未蚀变长石、晶屑)为主、易保留较高的孔隙空间有关。

1.2 胶结作用

根据胶结物成分的不同,东营凹陷储层砂岩的胶结类型主要可分为3种:碳酸盐胶结、硅质胶结和粘土矿物胶结。

(1)碳酸盐胶结物 本区碳酸盐胶结矿物主要为方解石和白云石两种。方解石胶结在本区较常见,它呈晶形较好的状态充填于颗粒之间,有时充填在长石的裂隙中(图2b)。白云石胶结在本区也较常见,晶形较好分布于颗粒表面或颗粒接触处,晶体较方解石小得多(图2c)。本区铁白云石胶结也常见,

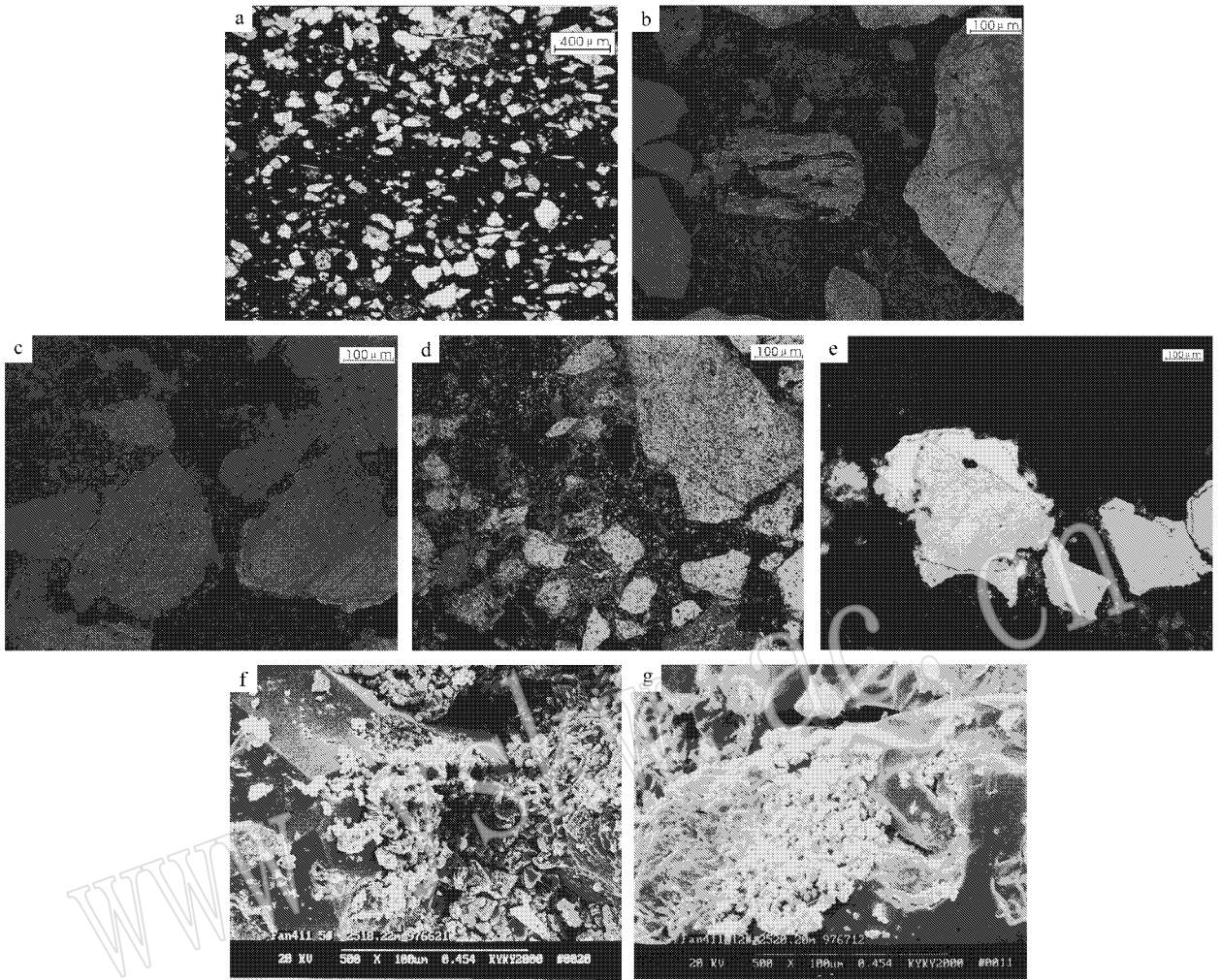


图 2 碎屑岩的显微照片

Fig. 2 Microphotos of elastic rock

a—机械压实造成的长形矿物碎屑定向排列,单偏光(正交光,单 142 井,2 206.7 m); b—方解石充填于颗粒之间(单偏光,梁 25 井,3 125.02 m); c—白云石晶形分布于颗粒表面或颗粒接触处(单偏光,梁 25 井,3 128.29 m); d—铁白云石自形较差,主要充填于孔隙之中(单偏光,单 142 井,1 906.43 m); e—石英次生加大现象(正交光,梁 25 井,3 128.09 m); f—高岭石呈假六边形或蠕虫状分布于颗粒表面或孔隙中(SEM,樊 411 井,2 518.22 m); g—伊利石呈绒球状充填于孔隙之间(SEM,樊 411 井,2 520.20 m)

a—the elongated mineral fragments which undergo compaction and are spread in orientation (cross polarized, Well Dan-142, 2 206.7 m); b—calcite in the interstice of grains (plain polarized, Well Liang-25, 3 125.02 m); c—dolomite on the surface and in the boundary of grains, plane polarized (plain polarized, Well Liang-25, 3 128.29 m); d—poorly-crystallized ankerite in the interstice of grains (plain polarized, Well Dan-142, 1 906.43 m); e—secondary enlargement of quartz (cross polarized, Well Liang-25, 3 128.09 m); f—pseudo-hexagon or vermiform kaolinite on the surface and in the interstice of grains (SEM, Well Fan-411 2 518.22 m); g—downy spherical illite in the interstice of grains (SEM, Well Fan-411 2 520.20 m)

铁白云石自形程度较差,晶体较细,主要为孔隙充填(图 2d)。一般认为铁白云石通常在晚成岩期的开始出现。碳酸盐胶结物的含量超过 10% 时,储层物性明显变差。从薄片观察,本区古近系碎屑岩的碳酸盐胶结物含量不稳定,大多数不超过 15%。

(2) 硅质胶结 本区硅质胶结物常见石英次生加大现象(图 2e),如梁 25 井 3 128.09 m 可见明显的

石英次生加大,加大边及胶结世代清晰可见。在石英次生加大的同时,伴有长石的强烈溶蚀现象。扫描电镜下,一些样品的长石明显被溶解,有的甚至变成残骸状。从岩石类型看,具石英次生加大的岩石多为长石砂岩。

(3) 粘土矿物胶结物 本区常见的粘土矿物有高岭石、伊利石、蒙脱石和绿泥石等,其中高岭石、绿

泥石常呈分散质点状孔隙充填,伊利石、蒙脱石常呈薄膜状孔隙衬垫产出。电镜下,高岭石呈假六边形或蠕虫状分布于颗粒表面或孔隙中(图 2f)。高岭石形成于酸性环境,碱性环境中其稳定性减小:在富 Ca^{2+} 的条件下,可以转化为蒙脱石;在富 K^+ 的环境下,会转变为伊利石。当温度升至一定条件下高岭石会消失,而且随着地质年代的变老,高岭石的数量会越来越来少。高岭石可以形成于成岩期及后生期。伊利石在电镜下呈绒球状充填于孔隙之间(图 2g),成岩期最明显的特征是其结晶度随埋藏深度增加而变好。蒙脱石在电镜下单晶体为不规则的细粒状、卷曲的波状薄片,表面常显得极不平整,边缘参差不齐。自生绿泥石常出现于埋藏较深的岩石中,电镜下单晶呈近似六边形鳞片,表面平滑平整,轮廓清晰,大小均匀,直径一般为 $2\sim 3\ \mu\text{m}$,杂乱堆积,如一片片散落的柳叶,这是绿泥石最普遍的形态特征。集合体形态很有特色,除叶片状杂乱堆积外,常见叶片组成的极为美丽的花朵状及绒球状。

胶结作用对孔隙的影响较大。胶结程度越高对孔隙的破坏就越大。胶结作用对孔隙的影响主要表现在 $1\ 500\ \text{m}$ 以上的深度。

1.3 溶蚀作用

本区溶蚀作用很普遍,主要为长石和碳酸盐胶结物的溶蚀。长石溶解后为方解石充填(图 2b),充填的方解石与周围的方解石同时消光。被溶解的长石往往具港湾状、锯齿状边缘,强烈溶解的长石可呈残骸状,甚至铸模状。

本区溶蚀的对象主要是碳酸盐胶结物、长石以及部分岩屑,而对储集层物性有重要改善的主要是对碳酸盐胶结物的溶蚀。但在不同构造部位,溶蚀产生的次生孔隙程度是不同的:北部陡坡带次生的孔隙度大约在 $0\sim 15\%$,最大可达 20% ;中央隆起带与北部相近,但分布范围大,南部缓坡带次生的孔隙度仅 5% 左右。在垂向上,溶蚀作用在北部陡坡带主要发育于 $1\ 500\sim 1\ 800\ \text{m}$ 、 $2\ 000\sim 2\ 800\ \text{m}$ 和 $3\ 000\sim 3\ 500\ \text{m}$ 3 个深度段;中央隆起带在 $1\ 800\ \text{m}$ 以下的井段溶蚀作用均较发育;南部缓坡带的溶蚀作用不如北部陡坡带和中央隆起带发育。

工区内溶蚀作用的产生是酸性溶液对可溶组分(沉积组分及胶结物)的溶解,地层中的酸性流体可能主要来源于有机质埋藏成熟过程中形成的有机酸(如羧酸和酚)和无机酸(如碳酸)以及粘土矿物的转化(如高岭石向伊利石转化)产生的 H^+ 。

2 砂岩成岩阶段与孔隙演化

常用的成岩阶段划分主要依据粘土矿物混层比的变化、自生矿物演化、岩石的结构构造及物性特征以及有机质成熟度等(郑茂浚等,1989;赵澄林等,2001)。东营凹陷砂岩主要分布在北部陡坡带、南部缓坡带和中央隆起带 3 个次级构造单元,它们分别处于不同的地质构造背景,因此,其成岩作用和孔隙演化也有差异。

2.1 北部陡坡带

北部陡坡区的成岩阶段可分成早成岩 A 期和 B 期、晚成岩 A 期和 B 期(图 3)。

早成岩 A 期,埋深小于 $1\ 300\ \text{m}$,古地温低于 65°C ,碎屑岩中有机质镜质体反射率(R_o)小于 0.35% ,有机质未成熟。岩石处于弱固结状态,机械压实对孔隙度影响较大,以原生孔为主,粘土矿物以蒙脱石为主,混层矿物的混层比大于 70% ,成岩作用主要为压实作用和少量的方解石胶结。早成岩 B 期,埋深 $1\ 300\sim 1\ 850\ \text{m}$,古地温为 $65\sim 85^\circ\text{C}$, $0.35\% < R_o < 0.5\%$,有机质半成熟。成岩仍以机械压实为主,蒙脱石及混层比开始大量减少,出现石英次生加大。该期以原生孔隙为主,次生孔隙少。

晚成岩 A 期,埋深 $1\ 850\sim 3\ 300\ \text{m}$,古地温为 $85\sim 140^\circ\text{C}$, $0.5\% < R_o < 1.3\%$,有机质成熟。以溶解与胶结等作用为主,伊利石大量生成,碳酸盐大量出现亮晶和世代胶结,并开始出现铁方解石和铁白云石,孔隙以形成次生孔隙为主。晚成岩 B 期,埋深 $3\ 300\sim 4\ 100\ \text{m}$,古地温 $140\sim 170^\circ\text{C}$, $1.3\% < R_o < 2.0\%$,有机质高成熟或过成熟,为伊利石带,碳酸盐岩由方解石和白云石转化为铁方解石和铁白云石;石英次生加大普遍,颗粒多为缝合或镶嵌接触。

2.2 南部缓坡带

南部缓坡区的成岩阶段可分成早成岩 A 期和 B 期、晚成岩 A 期和 B 期(图 4)。

早成岩 A 期,埋深小于 $1\ 400\ \text{m}$,温度低于 65°C , R_o 小于 0.35% ,有机质未成熟。以机械压实为主,但由于沉积物成熟度好于北部,压实对孔隙度的影响较北部小,孔隙以原生孔为主。早成岩 B 期,埋深 $1\ 400\sim 1\ 950\ \text{m}$,古地温 $65\sim 85^\circ\text{C}$, $0.35\% < R_o < 0.5\%$,有机质半成熟。仍以机械压实为主,孔隙以原生孔为主,有少量次生孔隙。

晚成岩 A 期,埋深 $1\ 950\sim 3\ 500\ \text{m}$,古地温 $85\sim$

140℃ $0.5\% < R_o < 1.3\%$,有机质成熟 ,成岩作用主要为溶解和胶结作用 ,次生孔隙比例大。晚成岩 B 期 埋深 3 500~4 300 m ,古地温 140~170℃ , $1.3\% < R_o < 2.0\%$,混层矿物消失 ,方解石、高岭石含量降低 ,石英次生加大更加普遍 ,岩石致密 ,方解石和白

云石逐渐转化为铁方解石和铁白云石。

2.3 中央隆起带

中央隆起区的成岩阶段分成早成岩 A 期和 B 期、晚成岩 A 期和 B 期(图 5)。

早成岩 A 期 ,埋深小于 1450m ,古地温低于

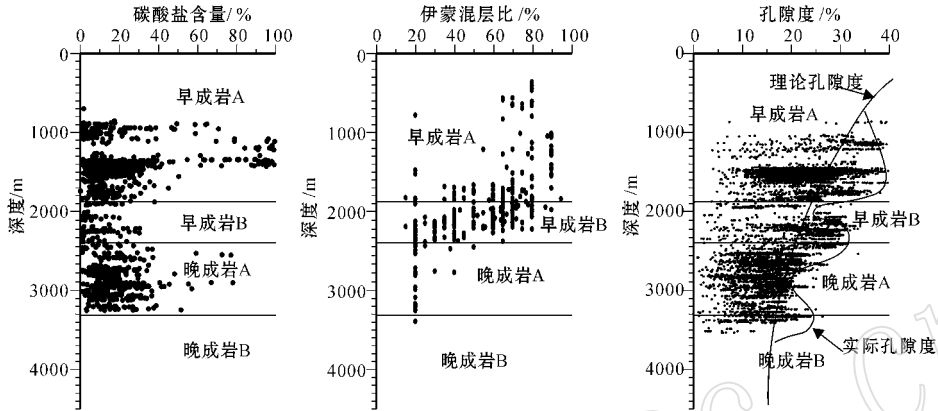


图 3 北部陡坡带碳酸盐、粘土矿物、孔隙度随深度变化图

Fig. 3 The variations of carbonate content , clay content and porosity with the depth in the northern steep slope belt

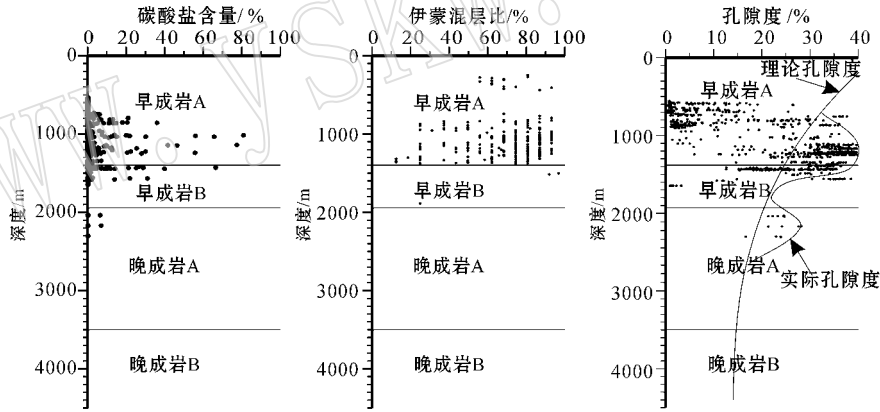


图 4 南部缓坡带碳酸盐、粘土矿物、孔隙度随深度变化图

Fig. 4 The variations of carbonate content , clay content and porosity with the depth in the southern gentle slope belt

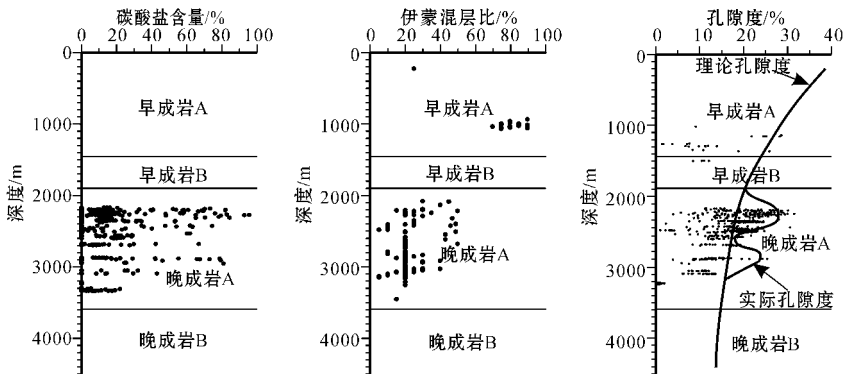


图 5 中央隆起带碳酸盐、粘土矿物、孔隙度随深度变化图

Fig. 5 The variations of carbonate content , clay content and porosity with the depth in the central uplift area

65℃, R_o 小于 0.35%, 有机质未成熟。机械压实为主, 以原生孔为主, 基本无次生孔隙。早成岩 B 期, 埋深 1450~2000 m, 古地温为 65~85℃, $0.35\% < R_o < 0.5\%$, 有机质不成熟, 仍以机械压实为主, 与斜坡相比较, 次生孔隙所占比例有所增大, 但仍以原生孔隙为主。

晚成岩 A 期, 埋深 2000~3600 m, 古地温为 85~140℃, $0.5\% < R_o < 1.3\%$, 有机质成熟, 溶解和胶结作用对次生孔隙的形成至关重要, 形成大量次生孔隙, 并出现多个次生孔隙带。晚成岩 B 期, 埋深 3600~4500 m, 古地温 140~170℃, $1.3\% < R_o < 2.0\%$, 有机质进入高成熟期。该带断裂发育, 深部溶液可以进入浅部, 溶解浅部碳酸盐矿物。

3 结论和认识

通过对岩石薄片和砂岩物性等资料的研究认为, 东营凹陷古近系砂岩储层经历了多种类型的成岩作用, 对储层性质有重大影响的是压实作用、胶结作用和溶蚀作用。随深度的增加, 压实作用和胶结作用使孔隙减少, 溶蚀作用在一定深度范围内产生大量的次生孔隙, 使储层孔隙度增大。依据成岩作用研究, 东营凹陷北部陡坡带、南部缓坡带和中央隆起带 3 个次级构造单元砂岩储层的成岩作用和次生孔隙的生成存在一定的差异。东营凹陷古近系砂岩储层所经历的成岩变化属于正常埋藏成岩序列, 深度决定了一系列成岩作用规律性变化, 从而导致孔隙演化的阶段性, 其中 1400 m 及 2000 m 左右这两个深度具有重要意义。前者是早成岩阶段 A、B 期的分界, 后者是早成岩与晚成岩阶段的分界, 各种成岩现象及孔隙演化在此分界面上下都有明显的变化。

东营凹陷古近系砂岩储层孔隙经历了由原生到次生的演化过程。孔隙演化有明显的分带性, 按深度可分为浅部带(小于 1400 m)以原生孔隙为主, 过渡带(1400~2000 m)次生孔隙占总孔隙的比例逐步增大, 深部带(大于 2000 m)以次生孔隙为主。

致谢 本文的完成得到了胜利油田宗国洪、张守鹏高级工程师和中国地质大学(北京)李胜利博士等同仁的大力支持和帮助, 在此一并致以衷心的感谢!

Reference

Cai Jingong, Xie Zhonghui, Tian Fang, *et al.* 2002. Diagenesis and

- pore evolution of deep sandstones in Jiyang depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 23(1): 84~88 (in Chinese with English abstract).
- Feng Youliang and Li Sitian. 2001. Depositional characteristics of lowstand sand bodies of the third member of the Shahejie Formation in the Dongying depression and the significance in petroleum geology[J]. *Geological Review*, 47(3): 278~286 (in Chinese with English abstract).
- Li Pilong, Jiang Zaixing and Ma Zaiping. 2000. Reservoir and Oil & Gas Distribution in Dongying[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 11~38 (in Chinese with English abstract).
- Lü Zhengmou. 1985. Study on the secondary pores of sandstone of the lower Tertiary in Dongying Depression, Shandong[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 3(2): 47~56 (in Chinese with English abstract).
- Miao Jianyu and Zhu Zongqi. 2000. Relationship between temperature-pressure and secondary pores of deep reservoirs in Eocene at Jiyang depression[J]. *Acta Petroleum Sinica*, 23(3): 36~40 (in Chinese with English abstract).
- Qian Zheng, Li Chun, Li Yue, *et al.* 1996. Diagenesis of deep sandstone reservoir and the stage dividing in Jiyang Depression[J]. *Journal of University of Petroleum* 20(2): 6~11 (in Chinese with English abstract).
- Song Mingshui. 2005. Diagenesis of the Member 4 of the Shahejie Formation in the south slope of the Dongying depression[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 32(3): 239~245 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Chenglin and Zhu Xiaomin. 2001. Sediment Petrology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 125~139 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Junmao and Pang Ming. 1989. Study on Clastic Diagenesis[M]. Wuhan: Publishing House of China University of Geosciences, 110~120 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zili and Lü Zhengmou. 1987. The relationship between diagenesis and reservoir evaluation of Tertiary clastic Shengli oilfield, Shandong[J]. *Earth Science*, 12(3): 311~318 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡进功, 谢忠怀, 田芳, 等. 2002. 济阳拗陷深层砂岩成岩作用及孔隙演化[J]. *石油与天然气地质*, 23(1): 84~88.
- 冯有良, 李思田. 2001. 东营凹陷沙三段层序低位域砂体沉积特征[J]. *地质评论*, 47(3): 278~286.
- 李丕龙, 姜在兴, 马在平. 2000. 东营凹陷储集体与油气分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 11~38.
- 吕正谋. 1985. 山东东营凹陷下第三系砂岩次生孔隙研究[J]. *沉积学报*, 3(2): 47~56.
- 苗建宇, 祝总棋. 2000. 济阳拗陷下第三系温度、压力与深部储层次生孔隙的关系[J]. *石油学报*, 21(3): 36~40.
- 钱峰, 李淳, 李跃, 等. 1996. 济阳拗陷深层砂岩储层成岩作用及其阶段划分[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 20(2): 6~11.
- 宋明水. 2005. 东营凹陷南斜坡东部地区沙四段储层成岩作用研究[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 32(3): 239~245.
- 赵澄林, 朱筱敏. 2001. 沉积岩石学[M]. 北京: 石油工业出版社, 137~138.
- 郑浚茂, 庞明. 1989. 碎屑储集岩的成岩作用研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 110~120.
- 周自立, 吕正谋. 1987. 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*, 12(3): 311~318.