

辽东湾地区孔隙演化的机理

蒋 恕^{1,2}, 蔡东升³, 朱筱敏², 朱光辉¹, 胡孝林¹

1. 中海石油研究中心, 北京 100027

2. 中国石油大学资源与信息学院, 北京 102249

3. 中海石油有限公司湛江分公司, 广州湛江 524057

摘要: 孔隙演化机理对研究中深层储层控制因素、预测中深层有利储层及中深层隐蔽油气藏勘探具有重大意义。通过辽东湾地区的辽中凹陷、辽西凸起及辽西凹陷孔隙演化分析表明, 辽东湾地区凹陷和凸起的孔隙演化阶段是一致的, 即在总体降低的背景中存在4个次生孔隙发育带, 所不同的是凹陷的次生孔隙发育带相对凸起深, 次生孔隙发育带与成岩演化、有机质的演化、粘土矿物的转化、超压、油气的早期充注密切相关。探讨了孔隙演化过程中孔隙度降低和次生孔隙发育的机理, 认为辽东湾地区4个次生孔隙发育带的形成主要源于有机酸对碳酸盐胶结物、长石、岩屑的溶蚀以及超压和早期油气充注对孔隙的保护。

关键词: 辽东湾地区; 孔隙演化; 次生孔隙; 演化机理; 成岩; 有机质演化; 早期油气充注; 超压。

中图分类号: P618.130.2

文章编号: 1000-2383(2007)03-0366-07

收稿日期: 2006-09-26

Mechanism of the Pore Evolution in Liaodong Bay Area

JIANG Shu^{1,2}, CAI Dong-sheng³, ZHU Xiao-min², ZHU Guang-hui¹, HU Xiao-lin¹

1. CNOOC Research, Beijing 100027, China

2. Faculty of Natural Resources and Information Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

3. CNOOC China Ltd. Zhanjiang Branch, Zhanjiang 524057, China

Abstract: The mechanism of pore evolution is significant to the research of deeper reservoir controlling factors, predicting the favorable reservoir and subtle reservoirs exploration in middle-deep strata. The pore evolution analysis of Liaozhong sag, Liaoxi uplift and Liaoxi sag in Liaodong Bay area were analyzed, which indicates that there are four similar secondary pore zones during the whole porosity reduction current background in different sags and uplifts. The only difference is that the depth of secondary pore development in sag is deeper than that in the uplift, and the secondary pore zone is related to the diagenesis, organic evolution, clay mineral evolution, overpressure and early oil and gas injection. This paper discusses the mechanism of the porosity loss and the secondary pores development, and the emphasis is placed on the analysis of the relation among the pore evolution, diagenesis, organic evolution, clay mineral evolution, early oil and gas injection and overpressure. On the basis of the discussion, it is pointed out that the formation of the four secondary pore development zones is due to the dissolution of the carbonate cement, feldspar and the elastic debris by the organic acid, and the protection from the overpressure and the early oil and gas injection.

Key words: Liaodong Bay area; pore evolution; secondary pore; evolution mechanism; diagenesis; organic evolution; early oil and gas injection; overpressure.

近年来, 随着层序地层学中坡折带控砂理论、成藏动力学广泛应用于油气勘探, 油气藏的勘探已经取得了巨大进展(Sangree *et al.*, 1991; Weimer *et*

a1., 1994, 2004; 林畅松等, 2000; 王英民等, 2002; 张善文等, 2003). 但储层问题是制约深层油气勘探的主控因素(郝芳等, 2002; 李会军等, 2004a, 2004b). 辽东湾地区和我国东部其他盆地一样, 碎屑岩储层多以长石砂岩类(包括岩屑长石砂岩)为主, 其储层及储集性能既受沉积相的控制, 又受到成岩作用强烈的影响(赵澄林, 1997), 同时其储层物性还受到构造演化、高温、超压等因素的影响(Holm, 1998; 郝芳等, 2004; 姜涛和解习农, 2005; 孙锡文, 2005). 近年研究表明, 孔隙演化受沉积环境、地温、构造演化、烃类充注、溶解及胶结、超压等作用的综合影响(Bloch *et al.*, 2002; 李会军等, 2004a, 2004b), 而且不同地区孔隙演化的机理不同. 为此, 本文探讨了辽东湾地区孔隙演化机理对研究中深层储层控制因素、预测中深层有利储层及中深层隐蔽油气藏勘探具有重大意义.

1 研究区地质概况

辽东湾地区指渤海东北部海域, 其东侧为辽东半岛低山区, 西侧为燕山山脉, 辽东湾地区包括辽西低凸起及围区、辽西凹陷及围区、辽中凹陷、辽东凸起北段及围区、渤东低凸起北段、辽东凹陷中南段及渤东凹陷东北段(图 1). 其中辽中凹陷古近系沉积厚度达 6000m, 生油条件好, 是主要供油区, 目前已

发现了 SZ36-1, JZ25-1S, JZ20-2 等油田, 但油气发现主要是辽西低凸起上的构造油气藏, 斜坡和凹陷中勘探程度低, 尤其辽中凹陷、辽西凹陷古近系中深层沙河街组及东营组发育近岸水下扇、扇三角洲、三角洲、湖底扇及重力流水道等沉积体系, 储层类型丰富, 加上丰富的油源及断裂、砂体、不整合等输导系统, 成藏条件优越, 中深层油气勘探潜力巨大, 尽管目前在该区域已发现了 JZ21-1、JX1-1S、LD12-1、JZ31-1、JZ9-3 等油气藏及含油气构造, 但 2 个凹陷总体相对于凸起勘探程度较低. 因此, 凹陷中深层的隐蔽油气藏是辽东湾最现实、最有勘探潜力的新领域, 但目前制约中深层勘探的瓶颈主要是储层问题. 因此, 有必要探索辽东湾地区孔隙演化的机理, 以期解决中深层勘探的储层问题.

2 孔隙演化特点

通过辽东湾地区大量薄片观察、孔隙度统计表明, 辽中凹陷、辽西凸起、辽西凹陷储层孔隙总体上随着埋深的增加, 孔隙度降低, 但均存在几个次生孔隙带.

2.1 辽中凹陷孔隙演化特点

辽中凹陷总体上孔隙度随着埋深的增加而降低, 但存在 4 个次生孔隙发育带, 次生孔隙发育带深度段大致分别对应于 1 600 ~ 1 800 m、2 200 ~ 2 300 m、2 700 ~ 2 800 m、3 100 ~ 3 200 m(图 2a), 与次生孔隙发育带对应段的渗透率也相对较高(图 2b). 结合成岩研究表明, 第一个次生孔隙发育带对应于早成岩 B 期, 第二和第三 2 个次生孔隙发育带对应于晚成岩 A 期, 第四个次生孔隙发育带对应于晚成岩 B 期. 早成岩 A 期主要以发育原生孔隙为主, 次生孔隙发育带以原生+次生孔隙为主(图 3a, 3b). 从规模上看, 早成岩 B 期和晚成岩 A 期 2 个次生孔隙发育带规模较大. 进一步结合粘土矿物演化、 R_0 演化及压力演化表明, 次生孔隙发育带对应于粘土矿物迅速转化带、油气开始成熟到大量生烃阶段, 尤其是晚成岩 A 期次生孔隙发育带对应于超压界面下的超压发育带(图 2c, 2d, 2e).

2.2 辽西凸起孔隙演化特点

作为目前辽东湾地区主要油气产区的辽西凸起和辽中凹陷一样, 孔隙度总体上随着埋深的增加而降低, 也存在 4 个次生孔隙发育带, 次生孔隙发育带深度段分别大致对应于 1400 ~ 1600 m、2000 ~



图 1 辽东湾地区构造单元划分

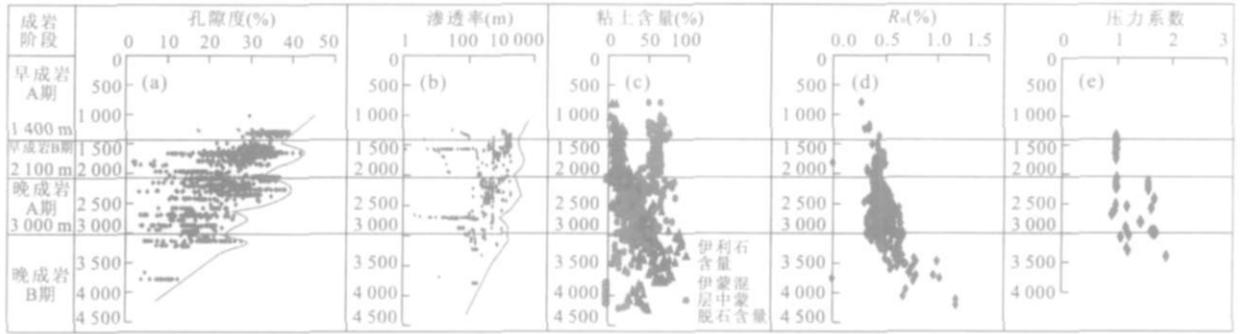


图 2 辽中凹陷孔隙演化与成岩演化、粘土演化、 R_o 演化、压力演化关系

Fig. 2 Relation graph among the porosity evolution, diagenesis evolution, clay evolution, R_o evolution and pressure evolution in Liaozhong sag

a. 孔隙演化图; b. 渗透率演化图; c. 粘土含量演化图; d. R_o 演化; e. 压力演化

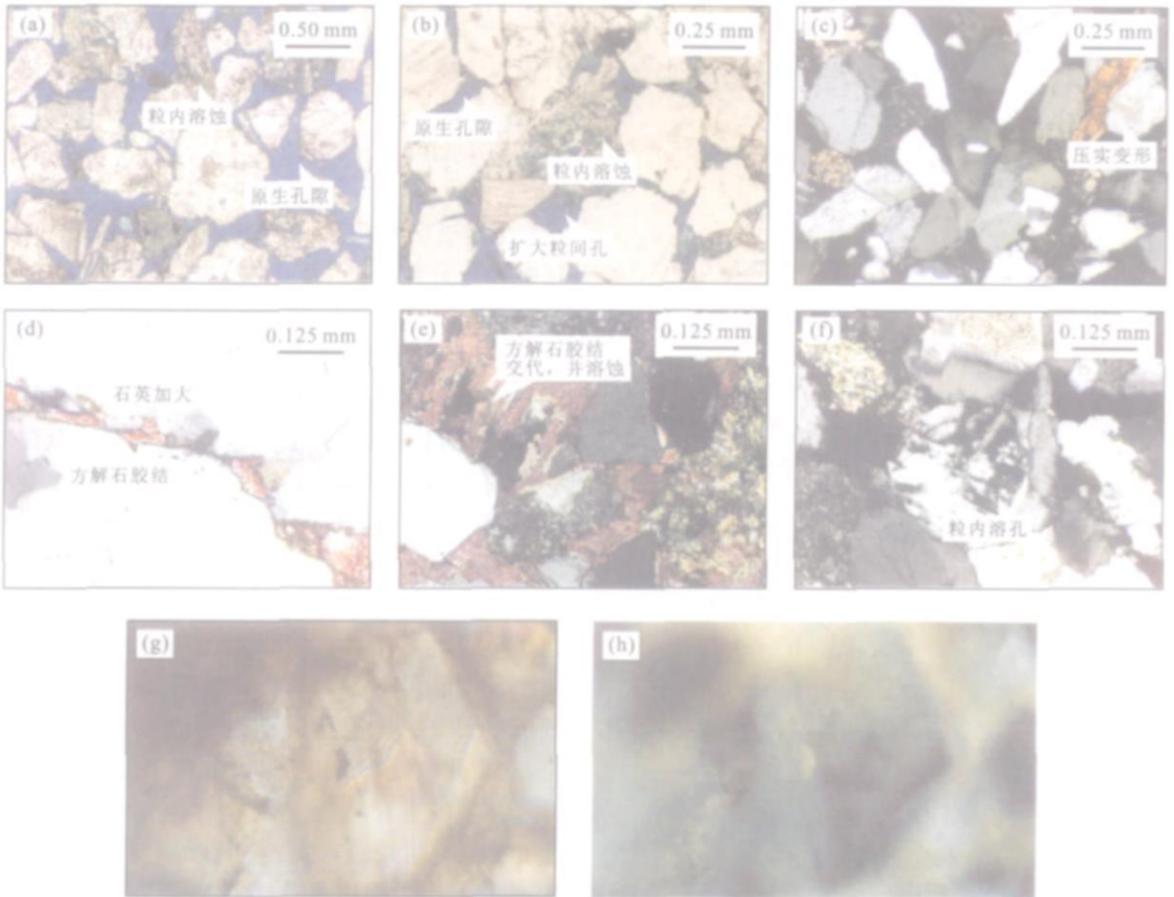


图 3 孔隙度演化的控制因素

Fig. 3 Factors controlling porosity evolution

a. JZ23-1-1, 1 567.56 m, 早成岩 A 期原生孔隙发育; b. JZ23-1-1, 1 2358.04 m, 晚成岩 A 期次生孔隙发育带, 原生+次生孔隙; c. LD27-2-2, 2 112.41 m, 压实使孔隙度降低; d. JX1-1-1, 2 923.10 m, 方解石形成于石英加大后, 方解石胶抑制石英加大; e. DL27-2-2, 2 327.51 m, 方解石胶结交代, 并有溶蚀作用; f. JX1-1-13 244 m, 粒内溶蚀; g, h. DL22-1-1 井 2 514 m 处早期烃类包裹体

2 200 m、2 300 ~ 2 500 m、2 900 ~ 3 000 m (图 4a)。B 期, 第二和第三 2 个次生孔隙发育带对应于晚成岩 A 期, 第四个次生孔隙发育带对应于晚成岩 B 期, 从规模上看, 和辽中凹陷一样, 早成岩 B 期和晚

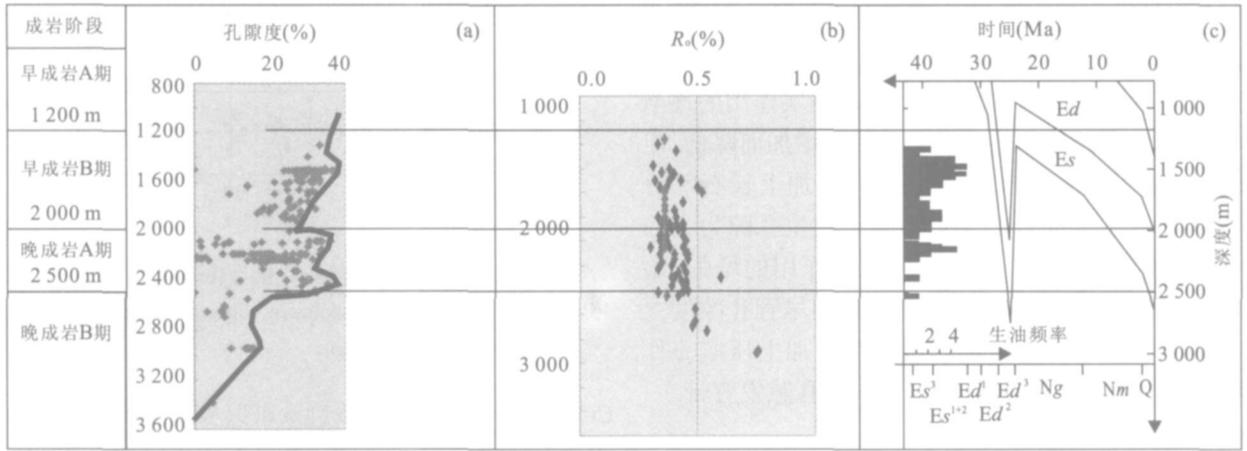


图 4 辽西凸起孔隙演化、成岩演化、 R_o 演化和埋藏史关系

Fig. 4 Relation graph among the porosity evolution, diagenesis evolution, R_o evolution, oil distribution and burial history in Liaoxi uplift

a. 孔隙度演化图; b. R_o 演化; c. 油气分布与埋藏史关系

成岩 A 期 2 个次生孔隙发育带规模较大。 R_o 演化表明, 次生孔隙发育带对应于生烃阶段 (图 4b)。油气统计表明, 东营组及沙河街组油气藏主要位于早成岩 B 期和晚成岩 A 期 2 个次生孔隙发育带 (图 4c)。

2.3 辽西凹陷孔隙演化特点

统计分析表明, 辽西凹陷和辽中凹陷及辽西凸起一样, 在孔隙演化与成岩演化及 R_o 演化对应关系方面均有类似的规律, 总体上也存在 4 个次生孔隙发育带, 分别对应于 1 500 ~ 1 800 m、2 050 ~ 2 400 m、2 600 ~ 2 700 m、3 100 ~ 3 200 m。第一个次生孔隙发育带对应于早成岩 B 期, 第二和第三 2 个次生孔隙发育带对应于晚成岩 A 期, 第四个次生孔隙发育带对应于晚成岩 B 期; 早成岩 B 期和晚成岩 A 期 2 个次生孔隙发育带规模较大, 次生孔隙发育带对应于粘土矿物的转化带以及生烃阶段。

总之, 辽东湾地区中凹陷和凸起的孔隙演化阶段是一致的, 即在总体降低的背景中存在 4 个次生孔隙发育带, 所不同的是凹陷的次生孔隙发育带相对凸起深, 次生孔隙发育带与成岩演化、有机质的演化、粘土矿物的转化、超压、油气的早期充注密切相关, 这些现象表明存在超压的辽中富生烃凹陷深层可能发育有利储层, 勘探潜力巨大。

3 孔隙演化的机理

3.1 成岩作用

通过岩石薄片的镜下观察、扫描电镜、X 衍射

等综合测试分析, 在本区识别的成岩作用和事件主要有机械压实作用、胶结作用、交代作用、溶解作用, 其中压实和胶结作用是使孔隙度变小的主要成岩作用 (图 3c, 3d)。因此, 随着埋深的增加, 孔隙度总体呈降低的趋势; 但如果岩石石英和长石含量高, 结构和成分成熟度高, 即使随着压实作用的增强, 仍保持较高的孔隙度 (图 3b)。胶结作用并不都是破坏储层的成岩作用, 比如, 早期的碳酸盐胶结物不仅利于保存粒间体积空间, 使岩石体积不至于因为机械压实作用而下降, 而且还可以抑制石英的次生加大, 从而可以为后期溶蚀提供物质基础 (图 3d)。

成岩作用中, 碳酸盐岩胶结和交代物质以及石英、长石、岩屑、杂基的溶解是形成次生孔隙的重要因素之一 (郑浚茂, 1989; 寿建峰等, 2005)。本区主要有方解石交代石英、长石、岩屑, 铁方解石交代方解石、白云石交代方解石, 铁白云石交代白云石等 (图 3e), 加上辽东湾地区碎屑岩储层多为长石砂岩类 (包括岩屑长石砂岩), 长石和岩屑等不稳定矿物也为溶蚀作用提供了物质基础。因此, 这些物质的溶蚀是次生孔隙发育的一个重要机理 (图 3e, 3f)。孔隙度与碳酸盐含量统计也表明孔隙度与碳酸盐含量互为消长关系, 也就是说如果残留碳酸盐含量低, 表明孔隙度高, 说明随着碳酸盐溶蚀作用的增强, 残留碳酸盐含量低, 储层孔渗大大改善 (图 3e)。

前面研究表明辽东湾地区中不同凹陷和凸起的 4 个次生孔隙发育带与成岩阶段有很好的对应关系, 主要存在早成岩 B 期和晚成岩 A 期 2 个次生孔

隙发育带(图 2a, 2d). 成岩研究表明, 总体上随着成岩程度的增加, 泥晶碳酸盐、亮晶方解石、泥晶铁白云石、亮晶铁白云石依次胶结, 加上压实作用的逐渐增强, 孔隙度总体趋势是随着埋深的增加而降低. 但在早成岩 B 期, 由于压实作用不强, 加上长石部分溶解, 形成了早成岩 B 期以原生+次生孔隙为主的次生孔隙带; 晚成岩 A 期由于溶蚀作用的增强, 出现 2 个次生孔隙发育带; 晚成岩 B 期尽管孔隙度大大降低, 但由于部分溶蚀作用的存在加上压实等作用造成裂缝的出现, 仍存在一个次生孔隙发育带.

3.2 有机质热演化

在成岩演化阶段中, 孔隙演化主要受岩石组分解和新生矿物沉淀控制, 这些现象的发生必须有流体的注入, 孔隙流体成分的变化是影响储层中铝硅酸盐和碳酸盐稳定的主要因素, 尤其是由有机质形成酸性溶液的介入起着关键作用(Surdam *et al.*, 1989; Lynch, 1996). 通过有机质热演化与孔隙演化对应关系并系统地比较, 可以认为温度不仅是影响烃源岩热演化, 同时也是影响孔隙演化的主导因素.

R_o 演化表明, 在油气生成期(80 ~ 120 °C), 干酪根由于热裂解和氧化裂解作用, 将脱去含氧官能团(羧基和酚基), 形成大量的有机溶剂(一元和二元羧酸)(Surdam *et al.*, 1989; Lynch, 1996). 这些溶于水的有机溶剂, 对成岩作用关系有: (1) 提供氢离子, 控制孔隙水的 PH 值和缓冲能力; (2) 与金属(Al³⁺)及其他无机物络合形成水溶性络合物, 促进这些组分的迁移; (3) 在热和细菌的作用下, 有机酸可脱羧生成 CO₂ 和气态烃, 改变碳酸盐矿物的沉淀和溶解平衡. 辽东湾地区在早成岩 B 期和晚成岩 A 期, 伴随着有机质的成熟, 油气开始生成(图 2b, 2d), 酸性水的形成改变了孔隙流体的性质, 在外缓冲的碳酸盐系统中, CO₂ 分压低, 使碳酸盐、长石溶解, 高岭石沉淀, 蒙脱石向伊利石转化, 次生孔隙大量发育. 在早成岩 B 期末期以及晚成岩 A 期部分阶段, 由于外缓冲的增强, CO₂ 分压高, 造成亚铁碳酸盐的沉淀, 孔隙度呈降低的趋势. 晚成岩 B 期, 在内缓冲的碳酸盐系统中, CO₂ 分压高, 石英次生加大发育, 碳酸盐部分溶解, 使该阶段部分阶段出现次生孔隙发育带(图 2a, 2d).

3.3 粘土矿物的演化

碳酸水溶液也是溶解碎屑岩中碳酸盐矿物、长石、岩屑的重要溶剂, 其中 CO₂ 除了来源于有机质生烃外, 还与早期碳酸盐矿物与粘土矿物反应生成的

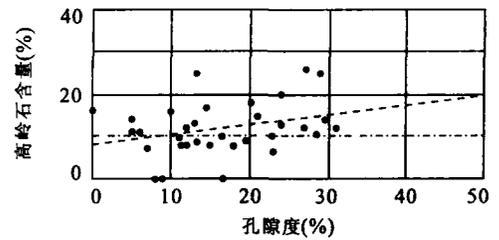


图 5 辽中凹陷高岭石含量与孔隙度交汇图

Fig. 5 Crossplot of the kaolinite content and the pores in Liaozhong depression

CO₂ 有关, 而且粘土矿物脱水可以提供酸性孔隙水中水的来源, 加上酸性孔隙水与长石或岩屑生成高岭石过程中产生一些次生孔隙(如钾长石完全高岭石化能产生相当钾长石体积 53% 的孔隙, 冯增昭等, 1994; 李丽霞, 2001). 这点可从孔隙度和高岭石交汇图(图 5)中看出, 孔隙度的大小和高岭石的含量成正比, 这说明随着长石的溶蚀, 高岭石含量增加, 孔隙度也增加, 高岭石迅速增加的地带可以作为次生孔隙发育带的标志. 因此酸性孔隙水以及其对碳酸盐岩、长石、岩屑的溶蚀造成粘土矿物的迅速转化. 所以说粘土矿物的演化与孔隙的演化息息相关, 粘土矿物迅速转化带(图 2c)与次生孔隙发育带具有较好的对应关系, 能较好地指示次生孔隙发育带的存在.

3.4 超压

超压不仅可以抑制有机质演化(Hao *et al.*, 1995), 而且对储层物性有保护和改善作用(李会军等, 2004a, 2004b; 姜涛和解习农, 2005). 辽东湾地区超压研究表明超压主要存在于快速沉降的辽中凹陷北洼及南洼泥岩发育段, 超压仅在晚成岩 A 期以下层段发育(图 2e), 同时, 超压的发育与有机质成熟阶段具有较好的对应性, 说明超压的发育与欠压实和生烃增压均有较大的关系. 对储层而言, 超压抑制了压实作用, 保留了一些孔隙, 从而使超压发育段储层物性较好. 在孔隙演化图中可以看出, 几个次生孔隙发育带均位于超压界面下, 说明超压对孔隙发育具有良好保存作用. 同时, 对辽中凹陷而言, 超压可以为油气运移提供强大的动力以及良好的封盖作用. 因此, 辽中凹陷中深层油气勘探潜力巨大.

3.5 油气的早期充注

现今油藏含油饱和度与孔隙度关系统计表明, 含油饱和度随孔隙度的增加而增加, 反之, 含油饱和度越高, 孔隙度也较大. 按照将今论古的观点, 地质历史时期油气的早期充注也可起到保护储层的作

用. 其主要机理是: 砂体捕获油气较早, 储层孔隙水流动可能受到抑制, 使胶结作用以及矿物的形成和转化受到抑制, 同时也抑制压实作用, 从而达到保护储层孔隙以及保存古油藏的双重作用. 辽中凹陷南洼旅大区包裹体研究表明, 该区存在早期油气的充注(图 3g, 3h). 早期油气充注一方面有效抑制孔隙度的降低, 另一方面在后期断裂输导向浅层运移, 同时保存了部分古油藏. 如 LD22-1-1 井 2 511 ~ 2 518 m 测试段砂岩虽薄, 但孔渗性相对其上下地层较好. 主要是由于早期古油藏对砂岩孔渗的保护作用. 而且, 辽东湾油气主要位于早成岩 B 期和晚成岩 A 期次生孔隙发育带(图 4c), 也从另外一个方面说明早期充注的油气有效保护了储层孔隙.

4 结论

(1) 辽东湾地区凹陷和凸起的孔隙演化阶段是一致的, 即在总体降低的背景中存在 4 个次生孔隙发育带, 所不同的是凹陷的次生孔隙发育带相对凸起深. 次生孔隙发育带与成岩演化、有机质的演化、粘土矿物的转化、超压、油气的早期充注密切相关, 主要体现在前 2 个主要次生孔隙发育带分别对应于早成岩 B 期、晚成岩 A 期, 对应于油气生成、超压及粘土矿物迅速演化阶段.

(2) 成岩作用中机械压实、胶结作用是主要的成岩作用. 随着成岩程度的增加, 泥晶碳酸盐、亮晶方解石、泥晶铁白云石、亮晶铁白云石依次胶结, 加上压实作用逐渐增强, 孔隙度总体趋势随着埋深的增加而降低. 但在早成岩 B 期, 由于压实作用不强, 加上长石部分溶解, 形成了早成岩 B 期以原生+次生孔隙为主的次生孔隙带; 晚成岩 A 期由于溶蚀作用的增强, 出现 2 个次生孔隙发育带; 晚成岩 B 期尽管孔隙度大大降低, 但由于部分溶蚀作用的存在加上压实等作用造成裂缝的出现, 仍存在一个次生孔隙发育带. 总之, 碳酸盐胶结物、长石、岩屑等的溶蚀是次生孔隙形成的主要原因.

(3) 有机质的成熟是长石、碳酸盐、岩屑溶解所需有机酸的主要来源, 随着有机酸溶蚀作用的增强, 粘土矿物迅速转化. 因此粘土矿物迅速转化带可以指示次生孔隙发育带的存在. 该种类型孔隙演化的机理主要来源于有机质的成熟.

(4) 异常高压及油气的早期充注均抑制了压实作用, 对孔隙起保护作用, 是影响孔隙演化的一个重

要因素. 因此, 超压区中深层次生孔隙发育带是潜在的优质储层, 同时, 对辽中凹陷这个富生烃凹陷而言, 超压可以为油气运移提供强大的动力以及良好的封盖作用. 因此, 辽中凹陷中深层油气勘探潜力巨大, 是今后隐蔽油气藏勘探的重点新领域.

References

- Block, S., Robert, H. L., Bonnell, L., 2002. Anomalous high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: Origin and predictability. *AAPG Bulletin*, 86(2): 301–328.
- Feng Z. Z., Wang, Y. H., Liu, H. J., et al., 1994. Chinese sedimentology. Petroleum Industry Press, Beijing, 60–103 (in Chinese).
- Hao, F., Cai, D. S., Zou H. Y., et al., 2004. Overpressure tectonic activity controlled fluid flow and rapid petroleum accumulation in Bozhong depression, Bohai Bay basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(5): 518–523 (in Chinese with English abstract).
- Hao, F., Sun, Y. C., Li S. T., et al., 1995. Overpressure retardation of organic-matter maturation and hydrocarbon generation: A case study from the Yinggehai and Qiongdongnan basins, offshore South China Sea. *AAPG Bulletin*, 79: 551–562.
- Hao, F., Zou H. Y., Ni, J. H., et al., 2002. Evolution of overpressured systems in sedimentary basins and conditions for deep oil/gas accumulation. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(5): 610–613 (in Chinese with English abstract).
- Holm, G., 1998. How abnormal pressures affect hydrocarbon exploration exploitation. *Oil & Gas Journal*, 96: 79–84.
- Jiang, T., Xie, X. N., 2005. Effects of high temperature and overpressure on reservoir quality in the Yinggehai basin, South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(2): 215–219 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. J., Wu T. R., Ma, Z. J., et al., 2004a. Research on the basic characteristics and control factors of high-quality reservoir in Sulige gas field. *Natural Gas Industry*, 24(8): 12–13 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. J., Wu, T. R., Wu, B., et al., 2004b. Distribution and controlling factors of high quality clastic deeply buried reservoir in China. *Geological Science and Technology Information*, 23(4): 76–82 (in Chinese with English abstract).

- Li, L. X., 2001. The diagenesis model of Tertiary sandstone reservoir in Bozhong area. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 15(2): 111–119 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. S., Pan, Y. L., Xiao, J. X., et al., 2000. Structural slope-break zone: Key concept for stratigraphic sequence analysis and petroleum forecasting in fault subsidence basins. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(3): 260–267 (in Chinese with English abstract).
- Lynch, F. E., 1996. Mineral/water interaction, fluid flow and sandstone diagenesis: Evidence from the rocks. *AAPG Bulletin*, 80(4): 486–504.
- Sangree, J. B., Vail, P. R., Mitchum, R. M., 1991. Summary of exploration applications of sequence stratigraphy. In: Armentrout, J. M., Perkins B. F., eds., *Sequence stratigraphy as an exploration tool: Concepts and practices from the Gulf Coast*. Eleventh Annual Research Conference Gulf Coast Section Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Houston, Texas 321–327.
- Shou, J. F., Zhang, H. L., Si, C. S., et al., 2005. The dynamical diagenesis of sandstone. Petroleum Industry Press, Beijing, 1–25 (in Chinese).
- Sun, X. W., 2005. Genetic analysis of overpressure reservoir from deep seated in Bonan area. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 12(3): 32–34 (in Chinese with English abstract).
- Surdam, R. C., Crossley, L. J., Hagen, E. S., et al., 1989. Organic-inorganic interaction and sandstone diagenesis. *AAPG Bulletin*, 73: 1–23.
- Wang, Y. M., Liu, H., Li, L. C., et al., 2002. Types and distribution characteristics of slope breaks of large-type down-warped lake basins. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(5): 683–688 (in Chinese with English abstract).
- Weimer, P., Bouma, A. H., Perkins, B. F., 1994. Submarine fans and turbidite systems, sequence stratigraphy, reservoir architecture and production characteristics. Gulf of Mexico and International: Gulf Coast Section of The SEPM Foundation 15th Annual Research Conference Proceedings. Houston, Texas, 440.
- Zhang, S. W., Wang, Y. M., Li, Q., 2003. Searching subtle traps using the theory of slope break. *Petroleum Exploration and Development*, 30(3): 5–7 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, C. L., 1997. The sedimentary facies and palaeogeography of the earlier Tertiary clastic in Bohai basin. Petroleum Industry Press Beijing, 1–20 (in Chinese).
- Zheng, J. M., 1989. Clastic reservoir diagenesis research. Geological Publishing House Beijing, 61–98 (in Chinese).

附中文参考文献

- 冯增昭, 王英华, 刘焕杰, 等, 1994. 中国沉积学. 北京: 石油工业出版社, 60–103.
- 郝芳, 蔡东升, 邹华耀, 等, 2004. 渤中坳陷超压—构造活动联控型流体流动与油气快速成藏. 地球科学——中国地质大学学报, 29(5): 518–523.
- 郝芳, 邹华耀, 倪建华, 等, 2002. 沉积盆地超压系统演化与深层油气成藏条件. 地球科学——中国地质大学学报, 27(5): 610–613.
- 姜涛, 解习农, 2005. 莺歌海盆地高温超压环境下储层物性影响因素. 地球科学——中国地质大学学报, 30(2): 215–219.
- 李会军, 吴泰然, 马宗晋, 等, 2004a. 苏里格气田优质储层的控制因素. 天然气工业, 24(8): 12–13.
- 李会军, 吴泰然, 吴波, 2004b. 中国优质碎屑岩深层储层控制因素综述. 地质科技情报, 23(4): 76–82.
- 李丽霞, 2001. 渤中地区第三系碎屑岩储层成岩作用研究. 中国海上油气(地质), 15(2): 111–119.
- 林畅松, 潘元林, 肖建新, 等, 2000. “构造坡折带”——断陷盆地地层序分析和油气预测的重要概念. 地球科学——中国地质大学学报, 25(3): 260–267.
- 寿建峰, 张惠良, 斯春松, 等, 2005. 砂岩动力成岩作用. 北京: 石油工业出版社, 1–25.
- 孙锡文, 2005. 渤南地区深层超压油气藏成因分析. 断块油气田, 12(3): 32–34.
- 王英民, 刘豪, 李立诚, 等, 2002. 准噶尔大型坳陷湖盆坡折带的类型和分布特征. 地球科学——中国地质大学学报, 27(5): 683–688.
- 张善文, 王英民, 李群, 2003. 应用坡折带理论寻找隐蔽油气藏. 石油勘探与开发, 30(3): 5–7.
- 赵澄林, 1997. 渤海盆地早第三纪陆源碎屑岩相古地理学. 北京: 石油工业出版社, 1–20.
- 郑茂俊, 1989. 碎屑岩储集岩的成岩作用研究. 北京: 地质出版社, 61–98.