

文章编号: 0253-9985(2007)03-0362-08

辽河坳陷辽中凹陷成岩作用与中深层孔隙演化

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, 北京 102249; 3 中海石油
湛江分公司, 广东 湛江 524057)

摘要: 根据大量的岩石薄片、X 衍射、地球化学等测试资料, 对辽河坳陷辽中凹陷成岩作用及孔隙演化进行了详细研究, 并在此基础上划分了 5 个成岩阶段: 早成岩 A 期、早成岩 B 期、晚成岩 A 期、晚成岩 B 期和晚成岩 C 期。次生孔隙演化特点、形成机理及其与成岩演化的关系研究表明, 中深层两个主要次生孔隙发育带分别对应于早成岩 B 期和晚成岩 A 期, 次生孔隙的形成主要源于粘土矿物迅速演化、油气生成及超压发育。因此, 辽中凹陷中深层超压区次生孔隙发育带油气藏勘探是当前乃至今后勘探的重点。

关键词: 成岩; 次生孔隙; 机理; 中深层; 辽中凹陷; 辽河坳陷

中图分类号: TE122.2 **文献标识码:** A

Diagenesis of Liaozhong sag in Liaohe depression and pore evolution in its middle-deep strata

Jiang Shu^{1,2}, Cai Dongsheng³, Zhu Xiaomin², Zhu Guanghui¹, Hu Xiaolin¹,(1 CNOOC Research Center, Beijing 100027; 2 China University of Petroleum, Beijing 102249;
3 Zhanjiang Company, CNOOC, Zhanjiang, Guangdong 524057)

Abstract A detailed analysis based on test data of thin rock section, X-ray diffraction, geochemistry, etc., is carried out on the diagenesis of Liaozhong sag in Liaohe depression and pore evolution in its middle- and deep-strata. Five diagenetic stages are classified according to the analysis. They are A and B stages of early diagenesis and A, B, and C stages of late diagenesis. A study on the evolution characteristics and forming mechanism of the secondary pores and their relationships with diagenesis reveals that two main secondary pore zones in middle- and deep-strata are formed mainly by the rapid evolution of clay minerals, hydrocarbon generation, and overpressure, and correspond respectively to the B stage of the early diagenesis and the A stage of late diagenesis. It is concluded that the secondary pore zones in middle- and deep-strata of overpressured areas in Liaozhong sag are the potential exploration targets for the future.

Key words diagenesis; secondary pore; mechanism; middle-deep strata; Liaozhong sag; Liaohe depression

近年来,随着层序地层学广泛应用于隐蔽油气藏勘探,油气藏的勘探已经深入凹陷的深层^[1~8],中国陆相湖盆中深层油气藏类型多是自生自储的岩性地层油气藏,因此制约该类湖盆深层油气勘探的主控因素是储层。中国东部中-新生代断陷湖盆多具近源、短源和丰富的花岗质母岩提供的基本地质

条件,致使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,又受到成岩作用的强烈影响^[9]。碎屑岩储层在早期具有较好的物性,而长石类砂岩为晚期溶蚀作用产生次生孔隙创造了条件。因此,成岩作用对中深层油气储层具有明显的控制作用。研究盆地

收稿日期: 2006-12-28

第一作者简介: 蒋恕(1976-),男,博士,矿产普查与勘探

基金项目: 国家科技攻关计划(SC04TJ-TQL-001)

内成岩演化、储层中次生孔隙的分布规律及形成机理, 对中深层油气勘探无疑是重大课题。

1 地质概况

辽中凹陷主体位于辽河拗陷的辽西凸起和辽东凸起之间(图 1)。目前, 主要在辽西凸起上发现了 JZ9-3 JZ20-2 SZ36-1 和 JZ25-1S 等一批构造油田, 而在深凹和斜坡区勘探一直未获得突破。这主要由于以前认为 2 500 m 以下储层发育不好, 加上 ESSO 公司(现为 EXXONMOBILE 公司)在辽中凹陷岩性油气藏勘探的失利, 这些都致使深凹及斜坡区中深层(大于 2 500 m)油气藏的勘探一直没有突破。这和与其相邻的辽河拗陷陆地部位在中深层发现丰富油气藏形成了鲜明的对比。

辽中凹陷中、深层的古近系沉积厚度达 6 000 m, 生油条件好, 是主要供油区, 也是隐蔽油气藏发育的潜在场所。前人研究表明, 辽东湾沙河街时期东西为近源短水系形成的近岸水下扇、扇三角洲等沉积体系, 南北为远源三角洲, 发育湖底扇及重力流水道沉积体系。沙河街组沉积末期湖盆萎缩。东营组早期湖盆活动加剧, 东西为辫状河-扇三角洲沉积体系, 南部出现轴向重力流和湖底扇体系,

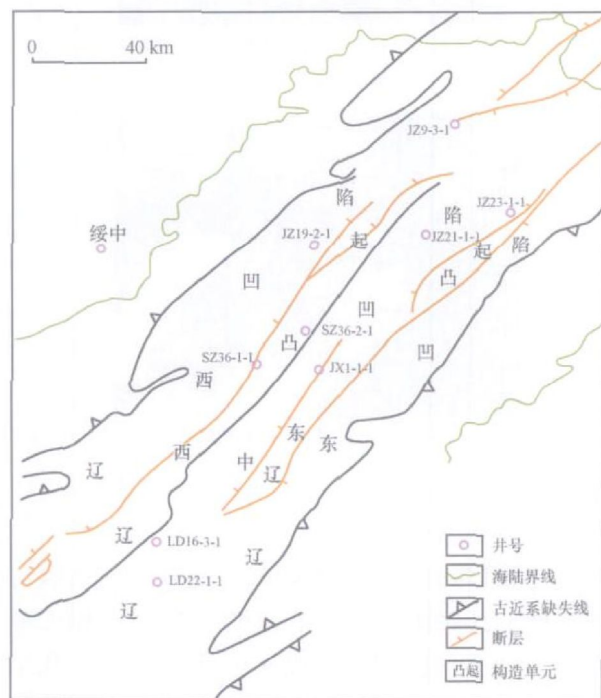


图 1 研究区构造概况

Fig. 1 Map showing the structure of the study area

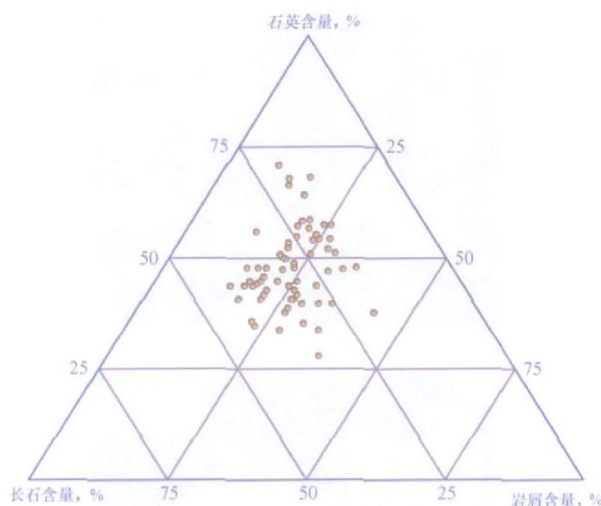


图 2 辽中凹陷砂岩类型三角图

Fig. 2 Triangular diagram of sandstone types in Liao Zhong sag

东营组晚期湖水大面积收缩, 末期河流和冲积平原取代了三角洲体系。从统计的岩石类型来看, 辽中凹陷碎屑岩储层显著的特点是长石和岩屑含量高(图 2)。这为中深层溶蚀作用创造了条件。

2 成岩事件

通过 15 口井的岩石薄片和铸体薄片的镜下鉴定、扫描电镜、X-衍射等的综合测试分析, 在本区识别出的成岩作用和事件主要有机械压实作用、胶结作用、交代作用和溶解作用。

2.1 压实和压溶作用

薄片观察的泥岩岩屑假杂基化、柔性颗粒变形、碎屑颗粒定向排列、粒间凹凸接触、压扁鲕以及鲕粒脱核和生物碎屑挤压变形等, 均是压实的结果(图 3a)。通过薄片观察, 2 000 m 以下地层基质含量少, 颗粒接触程度高, 刚性颗粒破碎, 塑性颗粒挤压变形现象常见; 2 000~3 000 m, 颗粒间线性接触普遍; 随着深度的增加, 颗粒间凹凸接触普遍, 3 000 m 以下可见缝合线接触。此外, 随埋深增加, 净砂岩压溶作用取代压实作用, 杂砂岩, 特别是杂基和云母等塑性颗粒含量高岩屑砂岩的机械压实强烈, 孔隙发育差。

2.2 胶结作用

本区早期主要的胶结作用是粘土矿物的胶结。

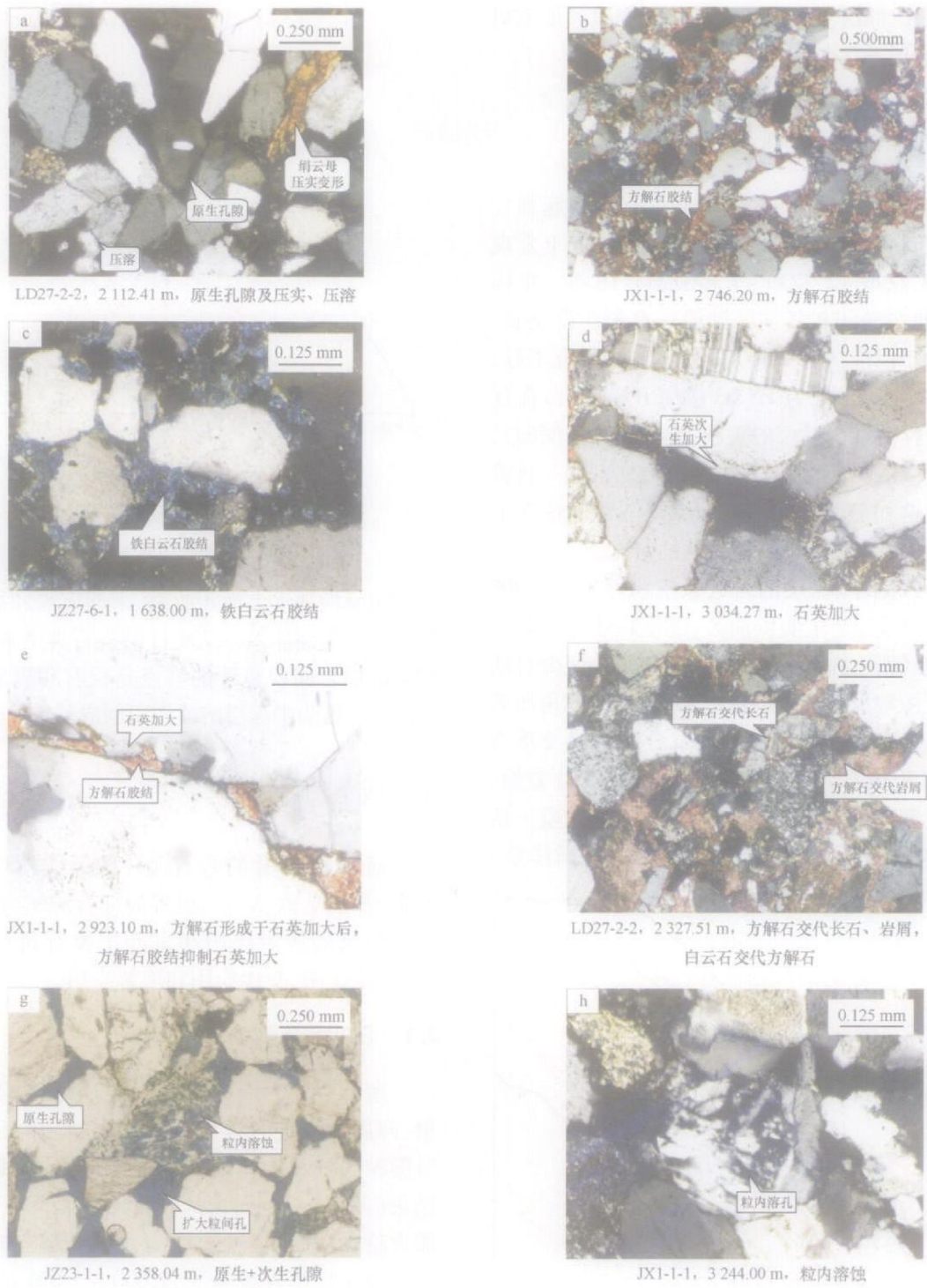


图 3 辽中凹陷储层显微照片

Fig. 3 Micrograph of reservoirs in Liaozhong sag

1 400 m 以上地层中泥质含量达 40%, 是影响储集层的主要因素; 1 500~ 1 700 m 地层中泥质含量为 10% ~ 25%, 既有蒙脱石又有高岭石。粘土矿物对有机质的脱羧和裂化起着催化作用, 产生有机酸。粘土矿物随压实成岩作用的增强, 不仅脱去孔隙水、束缚水, 而且随相变逐渐脱去层间水、晶

间水, 同时释放大量金属阳离子及 H^+ 离子, 脱去的水携带这些阳离子和有机酸率先进入邻近砂岩中, 打破环境平衡, 形成次生孔隙^[10-11]。化学胶结物主要是碳酸盐。碳酸盐胶结是本区破坏储层的主要因素, 包括方解石和铁方解石, 白云石和铁白云石 (图 3h、c)。早期的碳酸盐胶结物

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,从而对晚成岩期溶解作用的发生和次生孔隙的生成有特别意义。化学胶结物中其次是硅质和含量低、胶结能力弱的石膏、黄铁矿、菱铁矿及次生加大长石。石英次生加大分两期:早期发育于未成熟阶段,常被方解石交代;晚期次生加大发生于成熟阶段,加大大体比较大(图 3d)。石英次生加大降低了储集层的孔、渗性,也改变了其孔隙结构,使粒间管状喉道变为片状或缝状,且 SO₂ 胶结物不易溶解,降低了储集层的质量,对深部储集层影响更加明显,但压实作用可得到缓冲,石英次生加大边间的原生孔隙得以保存。

此外,胶结作用有先后顺序。研究区可见方解石胶结晚于石英次生加大(图 3e),这样可以抑制石英的次生加大,为后期溶蚀保留一些空间。

2.3 交代作用

交代作用系指在沉积期后演化过程中,沉积岩中某些矿物被化学成分不同的另一种矿物所取代的现象,是晚成岩阶段比较常见的一种成岩作用。本区主要是碳酸盐交代碎屑颗粒,粘土交代砂岩各种成分。方解石交代石英、长石、岩屑(图 3f),使颗粒边缘呈锯齿形,甚至成残骸状。另外,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。同样,粘土对石英及长石颗粒也进行交代,但不及方解石强烈。

2.4 溶解(蚀)作用

沉积岩埋藏后,随着上覆地层的不断叠加,岩石原生孔隙由于机械压实作用、压溶作用及胶结作用不断减少,原生孔隙降低,但在地下深部由于

溶解作用仍可形成次生孔隙。溶解作用是深层次生孔隙发育的最重要因素^[12~15]。碎屑岩中各种碎屑组分、胶结物及杂基以及碳酸盐岩生物格架,在特定的成岩环境下都可能发生溶解作用而形成次生孔隙。自生胶结物的溶解是最常见的一种次生孔隙类型,溶解的胶结物大多数是碳酸盐类矿物,如方解石、白云石和菱铁矿。这些胶结物溶解前可能存在于任何原生和次生孔隙中,而胶结物的溶解则可使孔隙重新开启和连通,以次生孔隙为主的砂体可以构成良好的烃类储集体。溶解形式可以是粒内的也可以是粒缘。受岩石成分及结构的影响,溶蚀作用有时是选择性的,表现为溶蚀的不均匀性(图 3g h)。

3 成岩阶段划分

不同地区的岩石在埋藏的不同阶段处于不同的温度、压力和流体环境中,因此其成岩深度不同。根据镜质体反射率、孢粉颜色指数、粘土矿物的成岩演化变化、石英次生加大、碳酸盐矿物胶结及溶解序列可划分成岩阶段。本次主要根据裘亦楠、薛叔浩等制定的成岩划分标准^[16],同时参考了吴胜和、熊琦华的成岩作用划分标准^[17],另外还参考了近年来成岩作用及其在油气储层中运用的新认识^[18~21]。依据薄片观察的自生矿物的分布及生成顺序,结合伊-蒙混层矿物中蒙脱石的含量(S)、高岭石含量、绿泥石含量、有机质的镜质体反射率(R_o)、热变指数(TAI)、最高热解温度(T_{max})等测试资料,考虑辽东湾实际地质情况,制订了辽东湾成岩阶段主要划分依据(表 1),在此基础上从点(单井)到面(区域)对辽中凹陷第三系的成岩阶段进行了划分(图 4)。

表 1 辽中凹陷成岩阶段主要划分依据
Table 1 Standards for classifying the diagenetic stages of Liaozhong sag

阶段	S, %	R _o , %	TAI	T _{max} /℃	石英加大	方解石	铁白云石	溶蚀作用	接触关系	孔隙类型
早成岩 A 期	> 70	< 0.35	< 2.00	< 430		泥晶			点状	原生发育
早成岩 B 期	> 50	< 0.45	< 2.25	< 435	1 级	亮晶	泥晶	部分	点状	原生 + 少量次生
晚成岩 A 期	> 35	< 0.50	< 2.75	< 440	2 级	含铁	亮晶	大量	点、线状	次生发育
晚成岩 B 期	> 15	< 2.00	< 4.00	< 480	3 级	含铁	亮晶	部分	线及缝合状	次生减少
晚成岩 C 期	混层消失	> 2.00	> 4.00	> 480	4 级				线及缝合状	裂缝发育

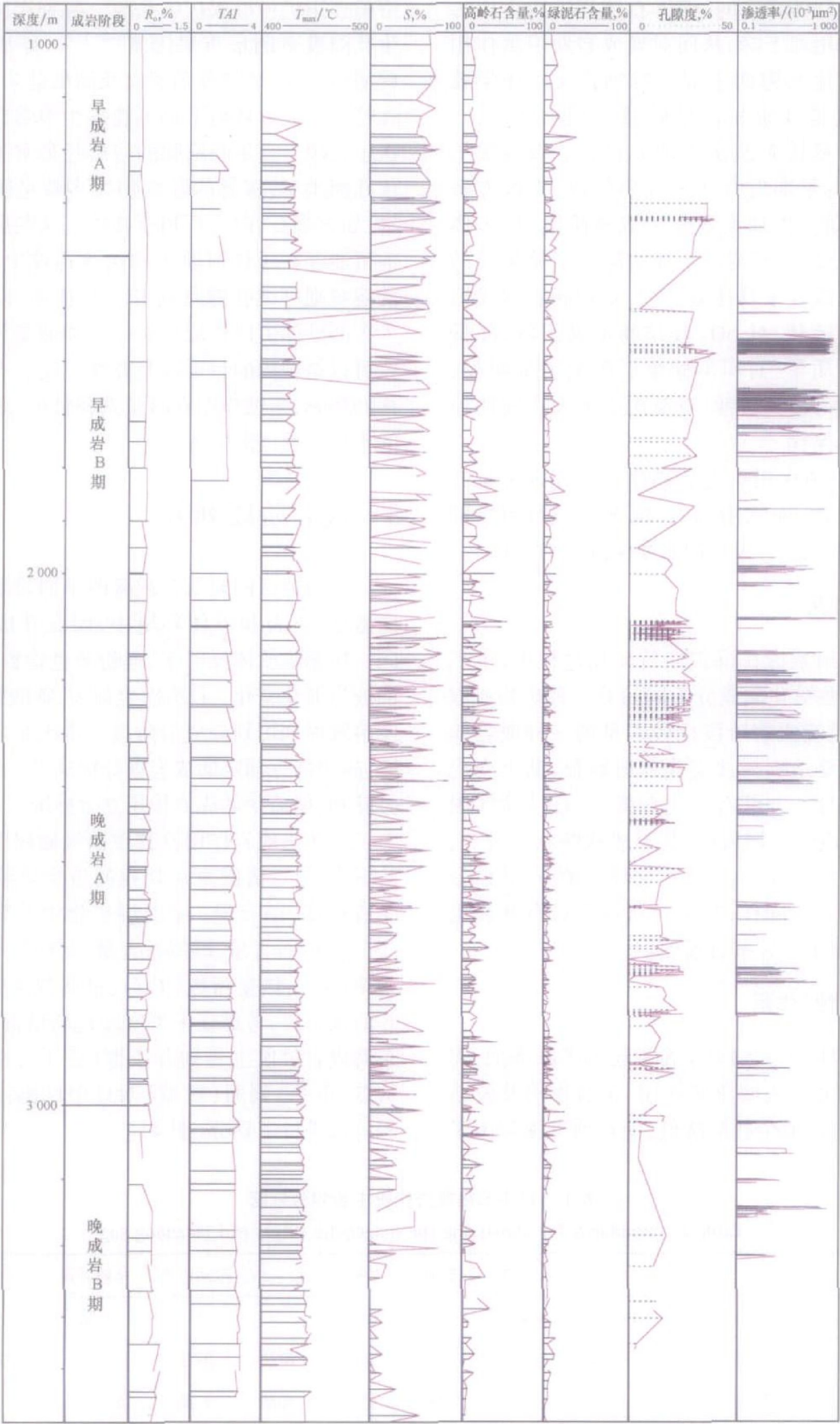


图 4 辽中凹陷第三系成岩阶段划分

Fig. 4 Diagenetic stages of the Tertiary in Liao Zhong sag

从图 4 可以看出, 早成岩 A 期地层埋深小于 1 400 m, 早成岩 B 期地层埋深在 1 400~ 2 100 m, 晚成岩 A 期地层埋深在 2 100~ 3 000 m, 晚成岩 B 期地层埋深大于 3 000m。统计表明, 东营组和沙河街组主体位于晚成岩 B 期以前, 晚成岩 A 期在东营组和沙河街组均发育。

4 孔隙演化及其机理

通过对辽中凹陷孔隙度的统计发现, 辽中凹陷孔隙演化与成岩阶段有很高的对应关系 (图 5), 比较明显的是早成岩 B 期和晚成岩 A 期对应于两个次生孔隙发育带。早成岩 A 期是原生孔隙发育带; 其末期由于压实、泥晶碳酸盐及粘土膜, 造成孔隙度下降。早成岩 B 期, 由于长石部分溶解, 因此以原生 + 次生孔隙为主, 从而出现孔隙度升高的现象; 到了早成岩 B 期末期, 由于亮晶方解石及部分泥晶铁白云石的胶结, 孔隙度再次下降。晚成岩 A 期, 尽管铁白云石胶结普遍存在, 但仍存在两个次生孔隙发育带。从高岭石含量与孔隙度交汇图 (图 6) 可以看出, 晚成岩 A 期孔隙度的大小和高岭石的含量成正比; 再结合成岩阶段划分中粘土矿物演化可知, 这两个次生孔隙发育带分别对应于粘土矿物第一和第二迅速转化带, 可能是酸性孔隙水或油气生成中有

机酸与长石或岩屑生成高岭石过程中产生了一些次生孔隙 (如钾长石完全高岭石化能产生相当钾长石体积 53% 的孔隙^[22])。成岩作用、孔隙演化及其与镜质体反射率 (R_o) 和压力的关系更进一步表明, 晚成岩 A 期以下的次生孔隙发育带与油气生成和超压密切相关 (图 7), 次生孔隙发育带位于油气开始大量生成及超压开始发育的层段, 并且超压的发育与有机质成熟阶段也具有较好的对应性, 说明超压的发育与欠压实与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。对辽中凹陷这个生烃凹陷而言, 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。尽管晚成岩 B 期由于压实、胶结及交代发育, 岩石相对致密, 孔隙度显著降低, 但仍有溶蚀、超压及压裂产生的一些次生孔隙及裂缝 (图 3h, 图 4)。

结合油气显示层位和埋藏史可以看出, 油气主要位于早成岩 B 期下部的东营组下段、晚成岩 A 期沙河街组上部的次生孔隙发育带以及晚成岩 B 期沙河街组下部 (图 5)。可见, 无论是东营组还是沙河街组, 次生孔隙均比较发育。典型探井孔隙演化证实, 中深层 (大于 2 500 m, 主要为晚成岩 A 期和晚成岩 B 期) 存在次生孔隙发育

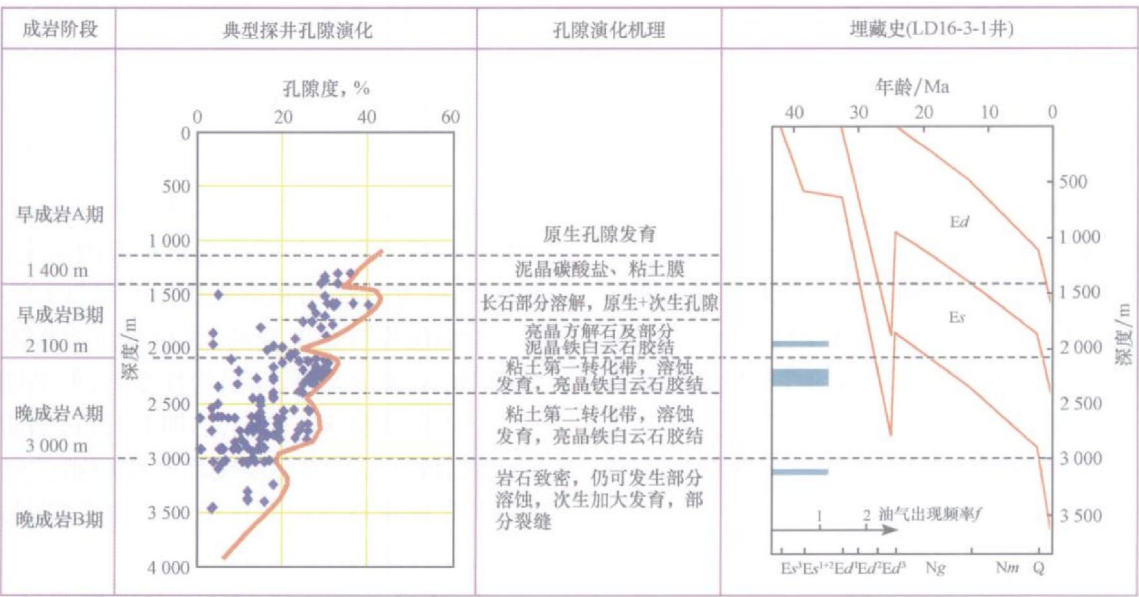


图 5 辽中凹陷成岩阶段、孔隙演化、埋藏史及其与油气的关系

Fig. 5 Diagenetic stages, pore evolution, burial history, and their relationships with hydrocarbon generation in Liaozhong sag

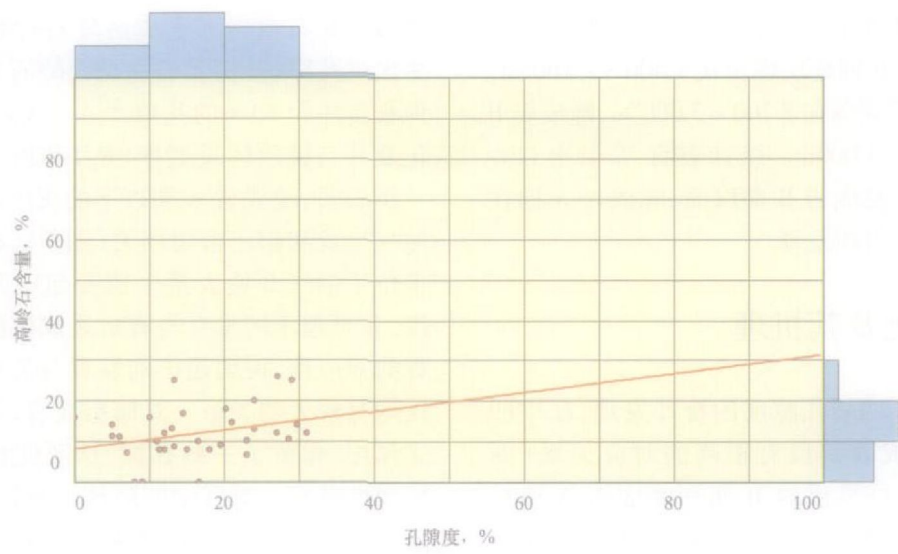


图 6 辽中凹陷高岭石含量与孔隙度交汇图

Fig. 6 Crossplot of kaolinite content and porosity in Liaozhong sag

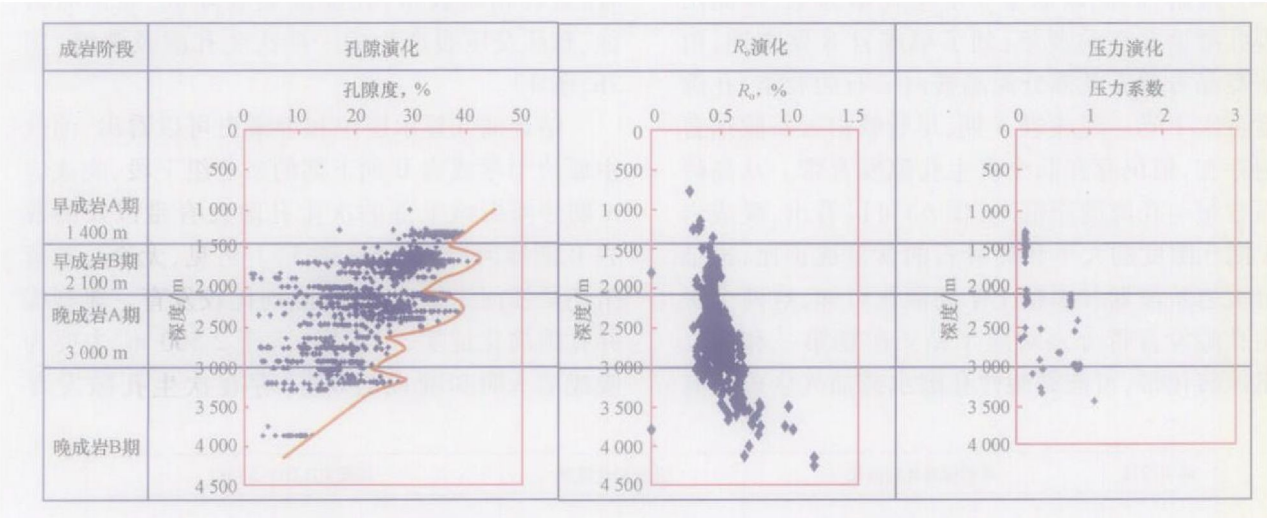


图 7 辽中凹陷成岩阶段与孔隙演化、 R_o 演化和压力演化的关系

Fig. 7 Relationship of pore evolution, R_o evolution and pressure evolution with diagenetic stages in Liaozhong sag

带,即使 3 500 m 左右也由于溶蚀作用及裂缝的发育致使孔隙度可达 15% ~ 20% (图 5)。这些层段是中深层储层发育的有利层位。2006 年辽中凹陷深凹区 JZ31-6 隐蔽油气藏勘探证实,辽中凹陷这个生烃凹陷的深凹区是隐蔽油气藏发育的有利场所,并且由于该带位于郯庐断裂带,油气运移活跃^[23],因此中深层超压区是下一步勘探的有利领域。

5 结论

1) 通过岩石薄片和铸体薄片的镜下鉴定、扫

描电镜、X-衍射等的综合测试分析,在辽中凹陷识别出的成岩作用和事件主要有机械压实作用、胶结作用、交代作用和溶解作用。尽管有些成岩作用对储层发育是不利的,如机械压实作用和胶结作用使孔隙度下降、储层物性变差,但早期碳酸盐胶结可以抑制压实作用,后期对长石、早期胶结的碳酸盐岩、岩屑的溶蚀或溶解作用则造成储层内部物质的重新分配及次生孔隙的形成,起到了后期改造储层物性的作用。

2) 依据自生矿物的分布及生成顺序,结合伊-蒙混层矿物中蒙脱石的含量、高岭石含量、绿泥石含量、有机质的镜质体反射率 (R_o)、TAI 和

T_{max} 等测试资料, 考虑辽东湾实际地质情况, 对辽中凹陷第三系的成岩阶段进行了划分。结果表明, 辽中凹陷 3 000 m 以下的地层才达到晚成岩 B 期, 可见成岩作用不强, 这为中深层油气勘探提供了潜力。

3) 辽中凹陷孔隙度演化与成岩阶段有很高的对应关系, 早成岩 B 期和晚成岩 A 期对应于两个次生孔隙发育带。次生孔隙主要为粒间溶孔、粒缘溶孔及粒内溶孔, 也有脆性岩石压裂的裂缝以及裂缝溶蚀形成的次生孔隙。其中, 晚成岩 A 期两个次生孔隙发育带分别对应于粘土矿物第一和第二迅速转化带, 也对应于高岭石的高含量带, 因此中深层高岭石发育带可以作为寻找次生孔隙带的标志。次生孔隙的形成与粘土矿物转换、油气生成和超压密切相关。

4) 辽中凹陷为生烃凹陷是隐蔽油气藏发育的有利场所, 在其中深层超压区的次生孔隙发育带找寻隐蔽油气藏是当前最现实、最有勘探潜力的领域。

参 考 文 献

- 1 Weiner P, Slatt R M, Pettingill H S. Global overview of deepwater exploration and production [A]. In Weiner P, Slatt R M, eds Petroleum systems of deepwater settings 2004 Distinguished Instructor Short Course Series No7 [C]. Tulsa SEG, 2004
- 2 Oscar E W. Deepwater oil sand reservoirs—ancient case histories and modern concepts [A]. Continuing education course notes series No16 [C]. Tulsa AAPG, 1978 11–14
- 3 Weiner P, Bouma A H, Perkins B F. Submarine fans and turbidite systems: sequence stratigraphy, reservoir architecture and production characteristics [A]. Gulf of Mexico and international Gulf Coast section of the SEPM foundation 15th annual research conference proceedings [C]. Houston SEPM, 1994 440
- 4 Sangree J R, Vail P R, Mitchum R M. Summary of exploration applications of sequence stratigraphy [A]. In Amentrout J M, Perkins B F, eds Sequence stratigraphy as an exploration tool concepts and practices from the Gulf Coast—eleventh annual research conference of Gulf Coast section of the SEPM [C]. Houston SEPM, 1991 321–327
- 5 杨川恒, 杜棚, 潘和顺, 等. 国外深水领域油气勘探新进展及我国南海北部陆坡深水油气勘探潜力 [J]. 地学前缘, 2000 7(3): 247~256
- 6 林畅松, 刘景彦, 蔡世祥, 等. 莺—琼盆地大型下切谷和海底重力流体体系的沉积构成和发育背景 [J]. 科学通报, 2001, 46(1): 69~72
- 7 李思田, 潘元林, 陆永潮, 等. 断陷湖盆隐蔽油藏预测及勘探的关键技术——高精度地震探测基础上的层序地层学研究 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2002 27(5): 592~598
- 8 蒋恕, 王华. 断陷湖盆隐蔽油气藏勘探方法与实践——以泌阳凹陷为例 [J]. 石油天然气学报, 2005 27(3): 273~277
- 9 赵澄林. 渤海湾盆地早第三纪陆源碎屑岩相古地理学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997 1~20
- 10 Surdam R C, Crossley L J, Hagen E S, et al Organic-inorganic interaction and sandstone diagenesis [J]. AAPG Bulletin, 1989, 73 1~23
- 11 Lynch F E. Mineral/water interaction, fluid flow and sandstone diagenesis: evidence from the rocks [J]. AAPG Bulletin, 1996 80(4): 486~504
- 12 郑浚茂. 碎屑岩储集岩的成岩作用研究 [M]. 北京: 地质出版社, 1989 61~98
- 13 刘孟慧, 赵澄林. 碎屑岩储集岩的成岩模式 [M]. 北京: 石油大学出版社, 1993 25~51
- 14 李忠, 李蕙生. 东濮凹陷深部次生孔隙成因与储层演化研究 [J]. 地质科学, 1994 29(3): 267~273
- 15 李丽霞. 渤中地区第三系碎屑岩储层成岩作用研究 [J]. 中国海上油气 (地质), 2001, 15(2): 111~119
- 16 裴亦楠, 薛叔浩. 油气储层评价技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997 59~66
- 17 吴胜和, 熊琦华. 油气储层地质学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997 55~86
- 18 蔡进功, 谢忠怀, 田芳, 等. 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, 2002 23(1): 84~88
- 19 刘林玉, 柳益群, 李文厚, 等. 吐哈盆地台北凹陷三角洲沉积与成岩作用 [J]. 石油与天然气地质, 2002 23(4): 402~405
- 20 李艳霞, 刘洪军, 袁东山, 等. 石油充注对储层成岩矿物演化的影响 [J]. 石油与天然气地质, 2003 24(3): 274~280
- 21 李红, 柳益群, 刘林玉. 鄂尔多斯盆地西峰油田延长组长 81 低渗透储层成岩作用 [J]. 石油与天然气地质, 2006 27(2): 209~217
- 22 冯增昭, 王英华, 刘焕杰, 等. 中国沉积学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1994 60~103
- 23 蒋恕. 辽中凹陷东营组隐蔽油气藏成藏主控因素研究 [R]. 北京: 中海石油研究中心博士后工作报告, 2006 108~110

(编辑 李 军)