

# 渤海湾盆地深部有利储层发育的主控因素

蒋凌志<sup>1)</sup>, 牛嘉玉<sup>1)</sup>, 张庆昌<sup>2)</sup>, 徐国民<sup>2)</sup>, 孟元林<sup>3)</sup>, 肖丽华<sup>3)</sup>

1) 中国石油勘探开发研究院, 北京, 100083; 2) 辽河油田分公司, 辽宁盘锦, 124010;

3) 大庆石油学院秦皇岛分院, 河北秦皇岛, 066004

**内容提要:** 本文主要从沉积、成岩方面及与之相关的因素来分析渤海湾盆地深部有利储层发育的主控因素。研究认为,除了沉积作用外,低地温梯度、高沉积速率、高加热速率、高生烃强度和异常压力等因素影响了成岩作用的进程和强度,对深部储层原生孔隙的保存和次生孔隙的形成产生积极的作用,造成了中部黄骅坳陷深层相对高孔高渗储层发育层段多,物性好,而东部辽河坳陷次之,西部冀中坳陷最差。

**关键词:** 渤海湾; 深部储层; 沉积作用; 成岩作用

渤海湾盆地深部储层指主力含油层系以下,埋深大于3500m的储层(譙汉生等,2002),因基底起伏形态和沉积古地形及后期构造运动的影响,在不同地区对应的地层层位不同。由于埋藏深度大,所以深部储层主要处于晚成岩阶段,强烈的破坏性成岩作用使得深部储层的物性一般较差。从构造演化机理分析,作为主动裂谷盆地断陷期发育的储层,其储集物性一般较坳陷期和被动裂谷盆地的储层物性要差(欧阳文生等,2007)。从对深部储层物性的统计结果来看,大于3500m埋深时,孔隙度绝大多数小于25%,一般小于15%;渗透率绝大多数小于 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,一般小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,说明深部储层以低孔、特低孔-低渗、特低渗为主。因此,深层油气富集的高产区块首先取决于对相对高孔高渗发育带形成的主控因素的分析。

众所周知,沉积作用是决定储层孔隙发育的物质基础,但不同地区由于地质条件的差异,地温梯度、沉积速率、加热速率、生烃强度和异常压力等作用特征存在差异性,造成深部储层的发育在不同地区有所不同。深部有利储层主要是指处于深部相对高孔高渗发育带的储集砂体。

## 1 渤海湾盆地深部储层的沉积特征

### 1.1 岩石学特征

渤海湾盆地古近纪主要发育四大盆缘水系物源(燕山褶皱带水系、太行山水系、鲁西隆起水系和辽东隆起水系)和埕宁隆起、沧县隆起和沙垒田凸起等盆内低隆起或凸起物源。其中冀中坳陷主要以太行山隆起物源为主,断陷早期发育一定的来自东部沧县隆起的物源。黄骅坳陷主要以燕山褶皱带物源为主,也存在埕宁隆起物源、沧县隆起物源和沙垒田凸起物源。辽河坳陷主要以西部燕山褶皱带物源和辽东隆起物源为主。不同物源区母岩成分和搬运距离不同造成上述地区深部储层的岩石学特征存在差异。辽河油田东、西部凹陷深层的母岩主要为花岗片麻岩、基性火山岩、混合岩、混合花岗岩、中酸性喷出岩、变质岩及灰岩。砂岩的岩石类型以岩屑长石砂岩为主,其次为长石砂岩和长石岩屑砂岩。石英含量一般在9.0%~50.0%之间,平均32.1%。长石含量在17.0%~43.0%之间,平均31.3%,以钾长石为主,其次为斜长石。岩屑含量一般在11.0%~44.0%之间,平均18.5%,岩屑类型有花岗岩、中-酸性喷出岩、石英岩及硅质岩、动力变质岩和片岩岩屑。

黄骅坳陷的母岩岩性主要为中酸性岩浆岩、混合花岗岩、中酸性花岗岩和沉积岩。深层砂岩的岩石类型以岩屑长石砂岩和长石砂岩为主。石英含量

注:本文为国家十五项目(编号2003BA613A01)的成果。

收稿日期:2008-06-12; 改回日期:2008-09-09; 责任编辑:章雨旭。

作者简介:蒋凌志,女,1976年生。分别于1997年、2000年和2003年在大庆石油学院、北京大学和石油勘探开发研究院获学士、硕士、博士学位。现为石油勘探开发研究院高级工程师,主要从事层序地层和沉积储层方面的研究。通讯地址:100083,北京市910信箱地质所;电话:010-62098454; Email: lingzhijiang@sina.com。

为 20% - 46%, 平均 35.5%。长石含量 25% ~ 54%, 平均 46.1%。岩屑平均含量 20%, 岩屑成分以火成岩为主。

冀中拗陷的母岩主要为花岗片麻岩、酸性喷发岩、沉积岩, 其次为石英岩、片岩和千枚岩。深层碎屑岩以长石砂岩和岩屑长石砂岩为主, 仅在晋县凹陷和廊固凹陷出现岩屑砂岩。石英的平均含量为 43.1%, 长石平均含量为 34.9%, 岩屑平均含量为 17.1%。

可见, 黄骅拗陷深部储层的长石含量最高, 冀中拗陷、辽河拗陷次之, 它们分别为: 46.1%、34.9%、31.3% (图 1a)。长石高含量区主要分布在沧县隆起两侧, 其原因可能是在古近系沉积时, 周边变质岩或花岗岩及沧县隆起的石炭系 - 二叠系长石砂岩、岩屑长石砂岩等为沉积区提供了丰富的长石。各油田古近系深层储层岩屑的含量相近, 在 17% - 20% 之间。

### 1.2 有利沉积相带

不同沉积环境下形成的不同类型的砂体, 其碎屑成分、粒度、分选、单层厚度等方面有明显差异, 也决定了它们具有不同的原始储集条件。原始储集条件愈优越, 愈有利于保存和形成深层高孔隙发育带。研究表明, 渤海湾盆地深层不同地区有利的沉积相带不同, 辽河拗陷主要是(扇)三角洲前缘的水下分流河道微相, 黄骅拗陷有利的沉积微相是重力流主水道微相和(扇)三角洲前缘水下分流河道微相, 而冀中拗陷最有利的沉积相带是河流相和三角洲前缘亚相。因为这些相带砂体成分成熟度和结构成熟度相对较高, 具有较高的长石和石英含量, 原始物性好, 为酸性热流体运移和溶解物质迁移提供很好的运移通道, 而且长石含量高为后期的溶解作用的发生提供了物质基础。

## 2 生烃强度越大, 有机酸的产量越高, 就越有利于次生孔隙的发育

渤海湾盆地深层碎屑岩储层次生孔隙发育程度除与储层中可溶性组分的含量有关外, 还与烃源岩的发育程度有关。厚度大、有机质类型好、丰度高的烃源岩生烃潜力大, 产酸量也高(苗建宇等, 2000; 卢焕勇等, 1996)。生烃强度是衡量烃源岩生烃潜力大小的一个定量指标。所以, 烃源岩的生烃强度与有机酸的产量呈正相关关系, 它影响着同一个凹(拗)陷内储层中次生孔隙的发育程度, 即: 生烃强度越高, 产酸量越大, 储层次生孔隙越发育, 否则反

之。根据“九五”期间的最新资源评价结果, 渤海湾盆地冀中拗陷、黄骅拗陷和辽河拗陷的平均生烃强度分别为  $26.2 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ 、 $46.5 \times 10^4 \text{ t/km}^2$  和  $56.2 \times 10^4 \text{ t/km}^2$  (图 1b)。三个拗陷中冀中拗陷的生烃强度最低, 在埋深大于 4500m 之后, 次生孔隙就不太发育, 孔隙度小于 10%。而黄骅拗陷和辽河拗陷储层孔隙度在同一深度下可达 15% 以上。储层中自生  $\text{SiO}_2$  的含量也从另一方面支持了这一观点, 干酪根在晚成岩阶段降解脱羧, 排出  $\text{CO}_2$  和有机酸, 形成酸性热流体, 溶蚀硅酸盐矿物长石的同时, 形成  $\text{SiO}_2$  (Surdam et al., 1989), 所以该自生  $\text{SiO}_2$  的含量与次生孔隙的发育成正相关关系。在这三个拗陷中, 黄骅拗陷的自生  $\text{SiO}_2$  的含量最高, 一般大于 10%, 辽河拗陷次之, 冀中拗陷最低, 其储层中  $\text{SiO}_2$  的含量一般小于 1%, 最大不超过 4% (图 1c)。

## 3 低地温梯度、高沉积速率使成岩阶段深度和次生孔隙发育范围下移

大地热流折射降温使深凹区成岩强度降低、次生孔隙带加深。各凹陷相同成岩阶段所对应的深度不尽相同, 地温梯度越高, 其成岩强度越强。而地温梯度的高低主要与基底埋深有关, 这是大地热流折射的结果。当大地热流从中生界进入新生界时, 由于中、新生界热导率的不同, 在不整合附近将发生热流的折射, 折射的结果使大地热流折向盆地的凸起区和斜坡带, 从而使得凸起区和斜坡区具有较高的大地热流和地温梯度, 而深凹区具有较低的大地热流和地温梯度。黄骅拗陷、冀中拗陷和辽河拗陷三个拗陷中, 黄骅拗陷歧北凹陷滩海深凹区的地温梯度、沉积速率分别为  $3^\circ\text{C}/100$  和  $375\text{m}/\text{Ma}$ , 而冀中拗陷饶阳凹陷分别为  $3.3^\circ\text{C}/100\text{m}$  和  $137.5\text{m}/\text{Ma}$ , 辽河西部凹陷为  $3.7^\circ\text{C}/100\text{m}$  和  $147.36\text{m}/\text{Ma}$  (图 1d、图 1e)。黄骅拗陷的沉积速率最大, 辽河次之, 冀中最小。在深凹低地温梯度区, 晚成岩 A 期的深度将下移, 次生孔隙发育带的范围扩大, 在更深的地层中存在次生孔隙发育带 (图 2)。

## 4 高加热速率控制着有机酸的早排, 并抑制储层的再胶结作用

油气的生成和排出与加热速率有关, 加热速率越快, 生油门限处的镜质体反射率就越低, 从沉积到进入生油门限的时间就越短, 有利于油气的早生和快生, 使烃源岩的含油饱和度迅速达到排烃门限  $S_0$  (一般  $S_0 = 1\%$  左右), 发生初次运移 (Yükler et al.,

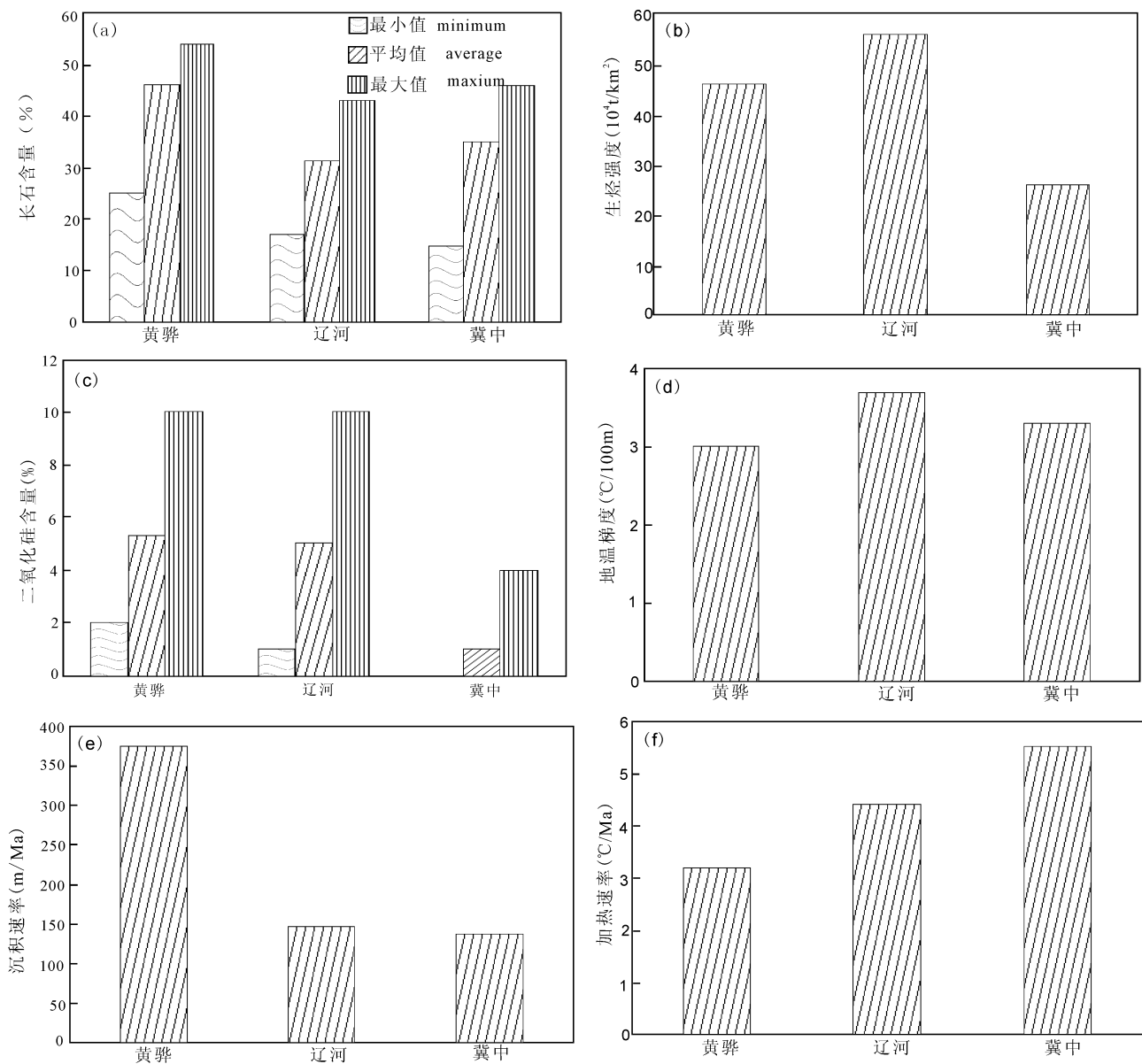


图 1 渤海湾盆地各坳陷若干参数对比图: (a) 长石含量; (b) 生烃强度; (c) 深层二氧化硅含量; (d) 地温梯度; (e) 沉积速率; (f) 加热速率

Fig. 1 Correlation map of some parameters in different depressions of the Bohai Bay basin: (a) feldspar content; (b) hydrocarbon generating intensity; (c) content of autogeny SiO<sub>2</sub>; (d) geothermic gradient; (e) deposition rate; (f) heating rate

1984;肖丽华等,1994)。而烃类的早期注入可以减缓压实作用、抑制胶结作用,同时还有利于后期烃类分解产生的酸性组分对矿物的溶解,产生次生孔隙。歧口凹陷滩海在沿岸带发现的深层油气藏在储量上占的比重很大,主要含油气层位均为渐新统沙河街组一段,埋深达 4000 m 左右仍有较好的孔隙度和渗透率,可能与油气早期充注抑制成岩作用继续进行有关。歧口凹陷滩海地区在古近纪期间快速沉降,烃源岩加热速率高,使古近系烃源岩快速进入主要

成熟生烃阶段和排烃阶段,这有利于油气充注未经长期成岩作用影响的年轻储层,抑制压实和胶结作用的进行,使深部储层保存较好的孔隙度和渗透率。板桥凹陷长芦油田沙河街组(沙一段和沙二段为渐新统,沙三段和沙四段为始新统)油藏埋深达 3600 ~ 3800m,但储层孔隙度和渗透率较好,且原生孔隙比较发育,这主要与油气早期注入储层并抑制了胶结作用有关,因为该油藏虽然埋藏深度较大,但所含原油却是低成熟的高密度原油,是烃源岩成熟早期

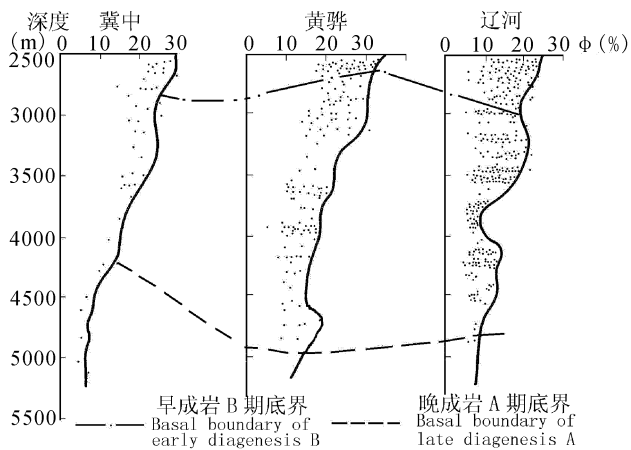


图 2 渤海湾盆地不同凹陷孔隙度随深度变化曲线对比图

Fig. 2 Correlation map of curves of porosity vs. depth in different depressions of the Bohai Bay basin

的生烃产物。板深 35 井钻探发现了埋深近 5000 m 的沙河街组油层,据岩芯铸体薄片、电镜扫描分析,未见晚成岩期典型胶结物白云石沉淀,这是烃类较早注入储层,抑制胶结作用的结果。

冀中拗陷、黄骅拗陷和辽河三个拗陷的加热速率分别为 5.52℃/Ma、3.2℃/Ma、4.42℃/Ma(图 1f)。黄骅拗陷的加热速率最快,成熟前所用的时间最短,冀中拗陷加热速率最慢,成熟前所用的时间最长。

### 5 异常压力延迟有机酸释放、利于深部次生孔隙发育的同时,也利于原生孔隙的保存

渤海湾盆地高压异常对深层高孔隙发育带的形成具有重要意义。主要表现在:①异常高压抑制有机酸的排出,有利于深部储层形成次生孔隙。早在 20 世纪 70 年代末,McTavish(1978)就提出了有关异常高压对有机质热演化抑制的观点(McTavish, 1978),我国学者在莺歌海—琼东南盆地也发现了这一现象(Hao Fang et al., 1995; 郝芳等, 1996),渤海湾盆地黄骅拗陷板桥和歧口凹陷也存在类似的问题(图 3)。有机质热演化生烃和 CO<sub>2</sub> 与有机酸的排出是同时进行的,所以,在超压抑制有机质热演化的同时,也不可避免地延迟了有机酸和 CO<sub>2</sub> 的排出。这样在更深的地层范围,干酪根可以降解生烃,同时排出 CO<sub>2</sub> 和有机酸,形成酸性热流体,溶蚀储层中的易溶组分,产生次生孔隙。②异常高压可减小岩石格架承受的有效应力,减小机械压实作用对储层孔隙的影响。异常高压所产生的直接效果是原来由颗

粒格架承受的地层负荷一部分由孔隙流体承担,使得地层内的流体压力超过静水压力,降低了砂体所

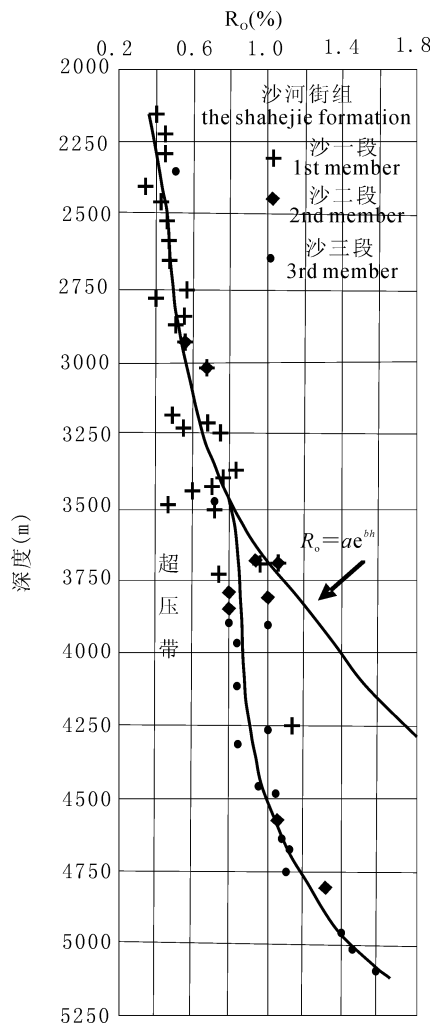


图 3 板桥和歧口凹陷超压对 R<sub>o</sub> 的抑制作用

Fig. 3 The inhibitory action of overpressure to R<sub>o</sub> in the Banqiao and Qikou Sags

承受的有效应力,抑制了储层机械压实,从而对储层的孔隙起到保护作用。据 Scherer(1987)和寿建峰等(1998)的研究结果,每超压 1000psi(6.9MPa),可以保护 1.5% ~ 2.1% 的砂岩孔隙度(Sherer, 1987; 寿建峰等, 1998)。③异常高压可增加化学反应的活化能,抑制胶结作用。异常高压抑制有机质热演化的实质是增加了化学动力学反应的活化能(Hao Fang et al., 1995)。成岩作用中的许多化学反应,如石英次生加大和粘土矿物演化均服从化学动力学定律(孟元林等, 1996; Walderhaug, 1996; Meng Yuanlin et al., 2001),由此进一步推断,由于异常高压增加了成岩反应的活化能必将抑制石英次生加大和粘土矿物转化等成岩作用的进行,从而抑制了自

生矿物的形成与储层的胶结作用。

渤海湾盆地深层高压异常压力带与高孔隙发育带、含油气性有明显的关系,主要表现在高压异常带之中和之下的砂岩储层具有较高的孔隙度。例如,在黄骅拗陷中北区,在晚成岩 A<sub>1</sub> 期,孔隙仍以混合孔隙为主,有大量原生孔隙发育,而在晚成岩 B 期仍发育次生孔隙,孔隙的演化阶段比其它凹陷下移了一个成岩期。

## 6 不同地区高孔高渗带发育的差异性

渤海湾盆地不同拗陷深部储层的岩石学特征、沉积环境、地温梯度、生烃强度、沉积速率、加热速率以及地层压力的差异,导致次生孔隙的发育程度不同地区有很大的差异。综合分析表明(图 4),黄骅拗陷(尤其是歧口和板桥凹陷)的异常高孔隙发育带层数最多,而且深度也最深,4800m 时仍存在高孔隙发育带。辽河拗陷深层的异常高孔隙带也比较发育,但较黄骅拗陷略差,而以廊固凹陷为代表的冀中拗陷异常高孔隙带不很发育。主要原因是:黄骅拗陷易溶组分长石含量最高,为后期溶解作用的发生提供了很好的物质基础;同时黄骅拗陷的生烃强度也较大,为溶解作用的发生提供了更多的酸性流体;黄骅拗陷的地温梯度最低,沉积速率最大,所以相同的深度所发生的成岩作用最弱,可以在更深的地层

中发育高孔高渗带;黄骅拗陷的加热速率最大,高的加热速率有利于油气的早生和快生,可使烃源岩的含油饱和度迅速达到排烃门限饱和度,发生初次运移。烃类的早期注入,阻碍了储层的再胶结作用,有利于次生孔隙的保存。冀中拗陷的长石含量中等,也可以为后期溶解作用的发生提供较好的物质基础,但是冀中拗陷的生烃强度最低,沉积速率最低,加热速率最低,地温梯度较高,这些不利因素使得冀中的次生孔隙发育差。辽河拗陷虽然长石含量低,但也达到 30% 以上,而且生烃强度最大,沉积速率和加热速率也较高,所以辽河的次生孔隙也比较发育,仅次于黄骅拗陷。

## 7 结论

(1) 从岩石组分分析来看,四大物源母岩成分的不同导致各拗陷深部储层岩石组分差异较大,黄骅拗陷长石含量高,为后期溶解作用的发生提供了很好的物质基础,而辽河和冀中拗陷略低。

(2) 多种因素控制深部储层异常高孔隙带的发育程度,不同地区具较大差异性。黄骅拗陷生烃强度较大,地温梯度低,沉积速率大,加热速率大,使得深部储层的溶解作用强,压实和胶结等作用相对弱,从而决定了黄骅拗陷深层的异常高孔隙带最发育;辽河拗陷生烃强度大,沉积速率和加热速率较大,使

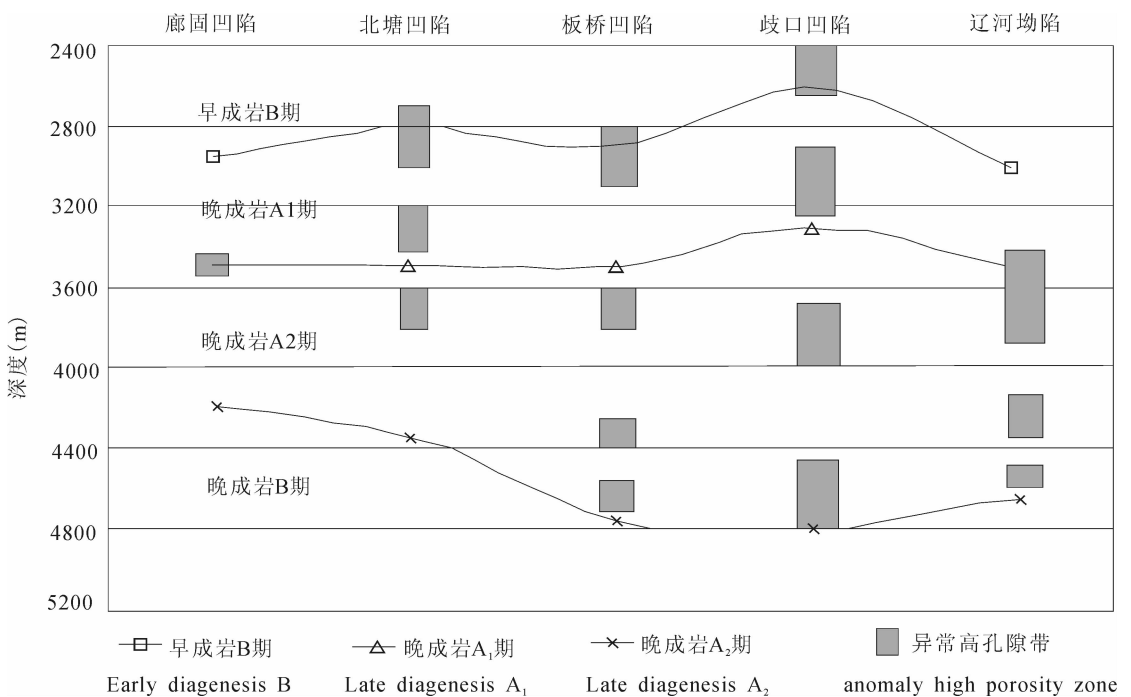


图 4 渤海湾盆地不同地区异常高孔隙带发育剖面图

Fig. 4 Development profile of anomaly high porosity intervals in different area of the Bohai Bay basin

得辽河拗陷深层的异常高孔隙带也比较发育,但较黄骅拗陷略差。冀中拗陷生烃强度低,地温梯度高,沉积速率和加热速率低,造成了冀中拗陷深层的异常高孔隙带不很发育。

(3) 开展深部储层相对高孔高渗带的研究和评价,应结合研究区的沉积、成岩和构造等多方面的特征来分析其发育段和地质特征,打破深部油气勘探的储层禁区,开拓深部油气勘探的巨大潜力。

### 参 考 文 献 / References

郝芳,李思田,孙永传. 1996. 莺歌海—琼东南盆地的有机质成熟作用及油气生成模式,中国科学(D辑),26(6):555~560.

卢焕勇,袁佩芳,祝宗琪等. 1996. 胜利油田下第三系沙河街组烃源岩热解产物初析. 西北大学学报(自然科学版),26(6):516~518.

孟元林,肖丽华,王建国. 1996. 粘土矿物转化的化学动力学模型及其应用. 沉积学报,14(2):110~116.

苗建宇,祝宗琪,刘文荣等. 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. 石油学报,21(3):36~40.

欧阳文生,张枝焕,陆黄生等. 2007. 储集层沉积的两种极端模式——主动裂谷和被动裂谷. 石油勘探与开发,34(6):687~690.

譙汉生,方朝亮,牛嘉玉,关德师. 2002. 中国东部深层石油地质. 北京:石油工业出版社,1~46

寿建峰,朱国华. 1998. 砂岩储层孔隙保存的定量预测研究,地质科学,2:244~249.

肖丽华,孟元林. 1994. 生烃史模型中存在的问题. 长春地质学院学报,24(3):87~90.

Hao Fang, Sun Yongchuan, Li Sitian, and Zhang Qiming. 1995. Overpressure retardation of organic-matter maturation and hydrocarbon generation: A case study from the Yinggehai and Qiongdongnan basins, off South China sea. AAPG Bull., 79(4): 551~562.

McTavish R A. 1978. Pressure retardation of vitrinite digenesis, offshore north-west Europe. Nature,271(16):648~650.

Meng Yuanlin, Yang Junsheng, Xiao Lihua and Li chen. 2001. Diagenetic evolution modeling system and its application. In: Hao Dongheng. ed. Treatises of X III Kerulien International Conference of Geology. Shijiazhuang, P. R. China, 25~27.

Sherer M. 1987. Parameters influencing porosity in sandstones: A model for sandstone porosity prediction. AAPG Bull., 71(5):485~491.

Surdam R C, Crossey L J, Hagen E S. Heasler H P. 1989. Organic — inorganic and sandstone diagenesis, AAPG Bull., 73(1):1~23.

Walderhaug O. 1996. Kinetic modeling of quartz cementation and porosity loss in deeply buried sandstone reservoirs. AAPG Bull., 74:731~745.

Yükler M A, Fritz K 1984. A review of models used in petroleum resource and organic geochemistry. In: Brooks J and Welle D. eds. Advance in Petroleum Geochemistry, Vol. 1. London: Academic Press, 69~113.

## Major Factors Analysis on Controlling the Formation of Favorable Reservoir in Deep Level of Bohai Bay Basin

JIANG Lingzhi<sup>1)</sup>, NIU Jiayu<sup>1)</sup>, ZHANG Qingchang<sup>2)</sup>, XU Guomin<sup>2)</sup>, MEN Yuanlin<sup>3)</sup>, XIAO Lihua<sup>3)</sup>

1) *Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing, 100083;*

2) *Liaohu Oilfield, Petrochina, Panjing, Liaoning, 124010;*

3) *Qinhuangdao Branch, Daqing Petroleum Institute, Qinhuangdao, Hebei, 066004*

**Abstract:** Main controlling factors for the development of deep buried reservoirs in the Bohai Bay basin are discussed on sedimentation, diagenesis and other related factors. Besides the influence of sedimentation, low geothermic gradient, high deposition rate, high heating rate, high hydrocarbon generation intensity and overpressure are main factors for the formation of anomaly high porosity intervals in deep buried reservoirs of the Bohai Bay basin, because they affected the course and intensity of diagenesis. The relatively high porosity and high permeability intervals were best developed in the Huanghua depression, and second in the Liaohu depression, and worst in the Jizhong depression.

**Key words:** Bohai Bay basin; deep buried reservoir; sedimentation; diagenesis

