

# 莺歌海盆地莺歌海组二段泥岩盖层封闭性综合评价

冯 冲<sup>1</sup>, 黄志龙<sup>1</sup>, 童传新<sup>2</sup>, 朱建成<sup>2</sup>, 范泓澈<sup>1</sup>, 刘江涛<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国海洋石油总公司 湛江分公司, 广东 湛江 524057; 3. 中国石油化工股份有限公司 石油工程技术研究院, 北京 100101)

**摘要:** 通过实测莺歌海盆地莺歌海组二段泥岩盖层的排替压力, 建立了盖层排替压力与声波时差的线性关系, 进而提出了利用声波时差及地震速度资料求取排替压力的方法。接着, 利用测井声波时差和地震速度资料, 按等效深度法确定莺歌海组二段下部泥岩盖层的超压分布。综合考虑盖层累计厚度、排替压力、剩余压力、气藏内部压力、断裂对盖层破坏程度和天然气本身性质(比如流动黏度), 提出了盖层封闭能力综合评价指数, 并据此对莺歌海组二段泥岩盖层综合封闭能力进行评价。结果表明: 莺歌海组二段泥岩盖层封闭能力强的地区分布在乐东区大部、临高区南部及东方区东部到一号断裂之间的地区, 一号断裂南段、东方区东部和北部地区则为盖层封闭能力较强的地区, 研究区边部由于地层上倾出露地表, 盖层封闭能力逐渐减弱。莺歌海组二段泥岩盖层封闭能力中等及以上地区可作为天然气的有效盖层; 由现有气藏分布可知, 莺歌海组二段泥岩盖层封盖能力良好, 中深层的天然气保存条件优越。

**关键词:** 排替压力; 泥岩; 盖层; 天然气; 封闭能力; 莺歌海组二段; 莺歌海盆地

**中图分类号:** TE122; P618.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2011)04-0373-05

## Comprehensive Evaluation on the Sealing Ability of Mudstone Cap Rock in Member 2 of Yinggehai Formation of Yinggehai Basin

FENG Chong<sup>1</sup>, HUANG Zhi-long<sup>1</sup>, TONG Chuan-xin<sup>2</sup>,  
ZHU Jian-cheng<sup>2</sup>, FAN Hong-che<sup>1</sup>, LIU Jiang-tao<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;  
2. Zhanjiang Branch Company, China National Offshore Oil Corporation, Zhanjiang 524057, Guangdong, China;  
3. Research Institute of Petroleum Engineering, China Petroleum and Chemical Corporation, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Through measuring the displacement pressure of mudstone cap rock in member 2 of Yinggehai Formation of Yinggehai Basin, the linear relation between displacement pressure of cap rock and acoustic time was demonstrated, and the method to calculate the displacement pressure with acoustic time and seismic velocity data was put forward to. Then, based on acoustic time and seismic velocity data, the overpressure distribution of mudstone cap rock in the lower of member 2 of Yinggehai Formation was determined by means of equivalent depth method. Considering the cap rock thickness, displacement pressure, overpressure, pressure of the gas reservoir, the damage of fracture to cap rock and the characteristic of gas (such as flow viscosity), the comprehensive index to evaluate the sealing ability of cap rock was put forward to, and was applied in member 2 of Yinggehai Formation. The results showed that the area with the best sealing ability of cap rock included most part of Ledong District, southern part of Lingao District and the region between eastern part of Dongfang District and No. 1 fracture; the area with the better sealing ability included southern part of No. 1 fracture, eastern and southern parts of Dongfang District; the sealing ability of cap rock in the edge of studied area gradually deceased because the formation exposed on the surface. Cap rock with the sealing ability above middle level could be considered as the effective one; according to the distribution of gas reservoir, the sealing ability of mudstone cap rock in member 2 of Yinggehai

收稿日期: 2011-01-09

基金项目: 中国海洋石油总公司湛江分公司天然气地质基础研究项目(Z2008SLZJ-FN0149)

作者简介: 冯 冲(1984-), 男, 黑龙江伊春人, 工学博士研究生, 从事石油地质研究。E-mail: fengchong135@hotmail.com

Formation and the sealing condition of gas reservoir in middle-deep layer were favorable.

**Key words:** displacement pressure; mudstone; cap rock; gas; sealing ability; the second member of Yinggehai Formation; Yinggehai Basin

## 0 引言

莺歌海盆地位于海南岛西侧,盆地呈北北西向延伸的不规则菱形结构,面积  $12 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,为南海北部大陆架西区发育的新生代转换-伸展型含油气盆地<sup>[1-2]</sup>。以莺歌海盆地东北部的一号断裂和西南部的红河断裂为界,盆地划分为中央坳陷带、河内坳陷带、莺东斜坡带和莺西斜坡带共 4 个二级构造带。基底岩性主要为前第三系花岗岩、变质岩、凝灰岩。盆地主要沉积第三系和第四系地层,地层由下向上依次为始新统、渐新统的崖城组和陵水组,中新统三亚组、梅山组和黄流组,上新统莺歌海组以及第四系乐东组地层(图 1)。从沉积演化特征看,本区从下至上发育有 3 套盖层:上第三系中新统三亚组一段、梅山组二段、上第三系上新统莺歌海组二段(莺东可延续到莺歌海组一段)区域性盖层。其中莺歌海组二段为本区比较可靠的中深层区域性盖层<sup>[3]</sup>。

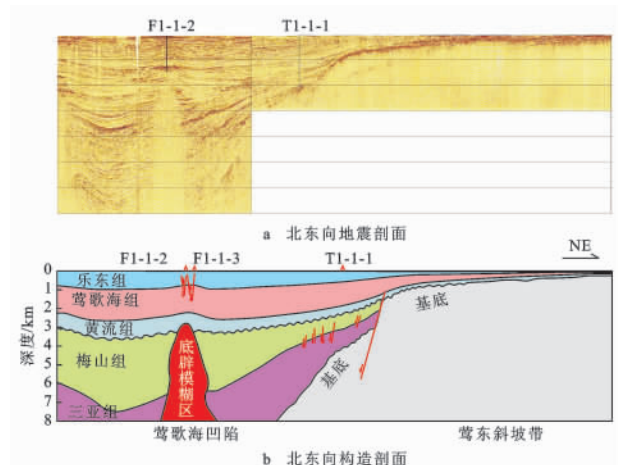


图 1 莺歌海盆地地层对比关系

Fig. 1 Stratigraphic Correlation of Yinggehai Basin

莺歌海盆地浅层天然气的成功勘探表明,气藏的分布与盖层之间存在密切关系,盖层封闭能力强的地区有利于气藏的富集与保存。然而,前人多用取值的方法对盖层的综合封闭能力进行评价<sup>[4-8]</sup>,研究结果受个人认识程度影响较大。为此,笔者从盖层的微观封闭机理和宏观发育特征等方面出发,建立了盖层对天然气封闭能力的综合评价公式,并对莺歌海组二段中深层区域性盖层封闭能力进行评价,为中深层天然气成藏潜力研究提供参考。

## 1 盖层发育与分布特征

莺歌海组二段由范围广、厚度大且横向分布非常稳定的陆架、陆坡泥岩组成。根据地震资料解释成果显示,该地层最大厚度可达 3 000 m。在盆地西北部的临高区,该地层为滨、浅海相,岩性以粉砂质泥岩、泥岩为主;在盆地中央坳陷带的东方区、乐东区,该地层沉积相以浅海相和半深海相为主,水体相对稳定,岩性以泥岩为主,粉砂质泥岩含量少,泥地比一般为 77%~98%;在盆地东部的莺东斜坡区,该地层沉积相仍以浅海相和半深海相为主, T13-1-1 井揭示泥地比为 91%<sup>[3]</sup>。根据泥岩单层厚度统计结果显示,泥岩单层厚度主要分布在 10 m 以下,并且不缺乏 25 m 以上单层厚度的泥岩,泥岩最大单层厚度超过 400 m(图 2)。

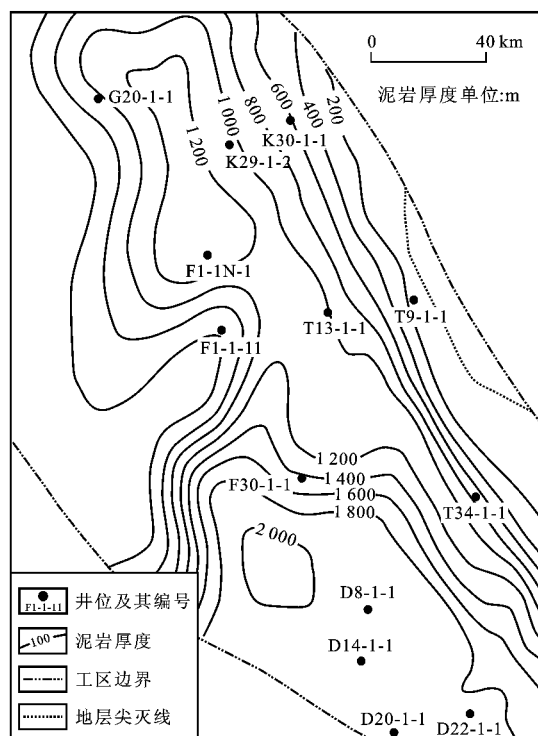


图 2 莺歌海组二段泥岩盖层厚度分布

Fig. 2 Distribution of Thickness of Mudstone Cap Rock in Member 2 of Yinggehai Formation

## 2 盖层微观封闭能力

盖层存在 3 种微观封闭机理:毛细管封闭、压力封闭和烃浓度封闭<sup>[9]</sup>。研究表明,烃浓度封闭是演

化达到成气阶段的烃源岩所特有的,并只对扩散相天然气起封闭作用<sup>[10-11]</sup>。莺歌海组二段有机质生烃能力较弱,综合评价为一套非烃源岩,起不到烃浓度封闭作用;因此,对其封闭能力的评价主要是毛细管封闭和压力封闭能力。

## 2.1 毛细管封闭能力

衡量盖层毛细管封闭能力的主要参数是排替压力,排替压力是岩石中润湿相流体(孔隙水)被非润湿相流体(油或气)排替所需的最小压力<sup>[12]</sup>。盖层的排替压力越大,其盖层的毛细管封闭能力越强,反之则越弱。

### 2.1.1 盖层排替压力与声波时差、地震速度的关系

盖层的排替压力和声波时差具有密切关系<sup>[13-16]</sup>,而地震速度是声波时差的倒数;因此,可以利用声波时差及地震速度资料求取盖层的排替压力。

研究区盖层孔隙度与声波时差之间存在线性关系(图3)

$$\varphi = 0.4266\Delta t - 26.738 \quad (1)$$

式中: $\Delta t$ 为盖层声波时差; $\varphi$ 为盖层孔隙度;判定系数为0.883。

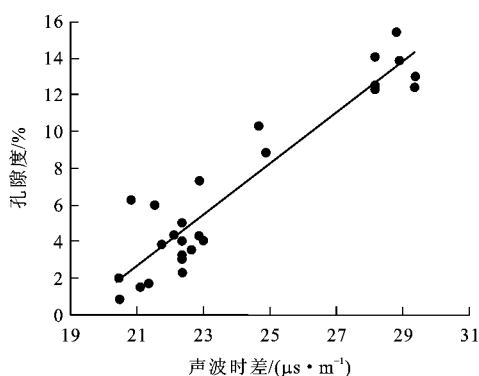


图3 莺歌海盆地盖层孔隙度与声波时差的关系

Fig. 3 Relationship Between Porosity and Acoustic Time of Cap Rock in Yinggehai Basin

研究区盖层孔隙度和排替压力呈指数关系(图4)

$$P_d = 42.568\varphi^{-0.6717} \quad (2)$$

式中: $P_d$ 为盖层排替压力;判定系数为0.9064。通过式(1)、(2)求得到声波时差与饱和水排替压力的关系为

$$P_d = 42.568(0.4266\Delta t - 26.738)^{-0.6717} \quad (3)$$

式(3)中的饱和水排替压力为实验室条件下测得的,其值比实际地层条件下的饱和水排替压力略大,其误差主要因为气水界面张力( $\sigma_{w-g}$ )具有随温度增高而降低的特征。因此,在应用过程中需要对其进行校正<sup>[17]</sup>。气水界面张力的变化规律为

$$\sigma_{w-g} = 4.275 / (T + 32.5) \quad (4)$$

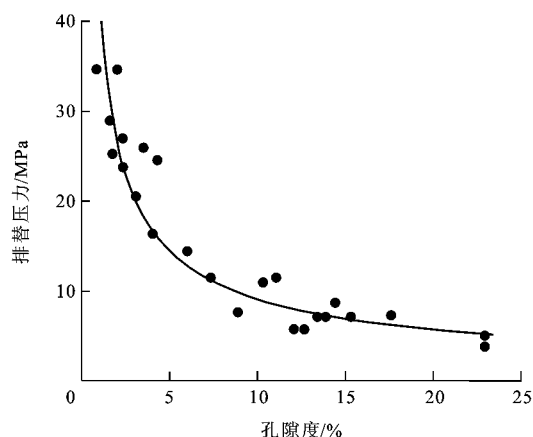


图4 莺歌海盆地盖层排替压力与孔隙度的关系

Fig. 4 Relationship Between Displacement Pressure and Acoustic Time of Cap Rock in Yinggehai Basin

其中

$$T = \frac{H-100}{100}t + T_0$$

式中: $T$ 为地温; $H$ 为埋深; $t$ 为地温梯度; $T_0$ 为地表温度(18℃)。由此得到地下岩石排替压力( $P_w$ )的计算公式

$$P_w = \frac{59.375}{[(H-100)/100]t + 50.5} P_d$$

即

$$P_w = \frac{252747.5}{(H-100)t + 5050} \cdot (0.4266\Delta t - 26.738)^{-0.6717} \quad (5)$$

依据声波时差与排替压力的关系,可以利用测井声波时差资料来预测井的排替压力。

莺歌海盆地有健全的地震测线网,地震资料预测地下岩石的排替压力是可行的,这样可以弥补测井声波时差在无井区和深层无法预测排替压力的不足,计算原理与声波时差预测相同。

### 2.1.2 排替压力分布特征

利用排替压力的求取方法对莺歌海组二段泥岩盖层排替压力的平面分布进行研究。莺歌海组二段下部界面排替压力为1.5~5.0 MPa,由盆地中心向盆地边缘排替压力逐渐增大。盆地中心欠压实作用的影响大于埋深影响,导致乐东区排替压力最小,大部分地区在2 MPa以内,盖层物性封闭性较差;东方区排替压力为2~3.5 MPa;莺东斜坡带及临高地区排替压力最高,大于3.5 MPa(图5)。

## 2.2 压力封闭能力

### 2.2.1 盖层超压的求取方法

对研究区中深层泥岩盖层压力的预测可根据声波时差,利用等效深度法计算求得<sup>[18-19]</sup>

$$\Delta P = \rho_r z + \frac{\rho_r - \rho_w}{c} \ln \frac{\Delta t}{\Delta t_0} - \rho_w z \quad (6)$$

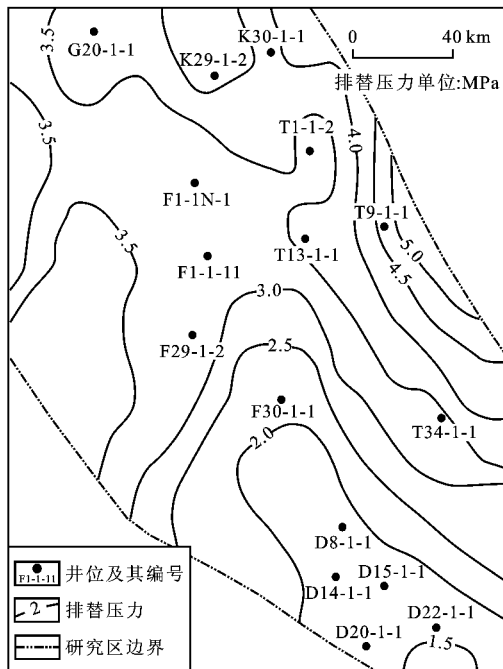


图 5 莺歌海组二段下部盖层排替压力等值线

Fig. 5 Isoline of Displacement Pressure of Cap Rock in the Lower Member 2 of Yinggehai Formation

式中:  $\Delta P$  为盖层剩余压力;  $\rho_r$  为沉积岩平均密度;  $\rho_w$  为地层水密度;  $\Delta t_0$  为外推地表处盖层的声波时差;  $c$  为盖层正常压实趋势线斜率;  $z$  为盖层埋深。同理也可以用地震速度资料求取剩余压力。

### 2.2.2 盖层超压分布特征

莺歌海组二段下部泥岩盖层剩余压力为 0~55 MPa; 整体上东南高, 西北低; 乐东区最高, 东方区次之, 临高区及岭头区最低。D15-1 和 D22-1 井区剩余压力可以达到 45 MPa 以上, 为典型的强超压区。与乐东区相比, 东方区由于底辟构造差异对压力系统的影响, 剩余压力明显要小, F29-1 和 F1-1 井附近剩余压力为 10~27 MPa。岭头区及临高区由于埋深变浅, 分别向东和向西北方向剩余压力逐渐降低为 0 (图 6)。

## 3 盖层封闭能力综合评价

从微观封闭机理上看, 盖层排替压力和剩余压力的耦合是盖层的综合封盖能力, 再考虑到宏观封闭特征, 气藏封盖保存条件主要受盖层厚度、排替压力、剩余压力、气藏内部压力、断裂对盖层破坏程度和天然气本身性质 (流动黏度) 的共同影响<sup>[20]</sup>。因此, 可以用盖层封闭能力综合评价指标来综合反映上述 5 个因素对盖层封盖保存能力的作用, 即

$$f = a \frac{(P_d + \Delta P) h \mu}{(k - 1) z} \quad (7)$$

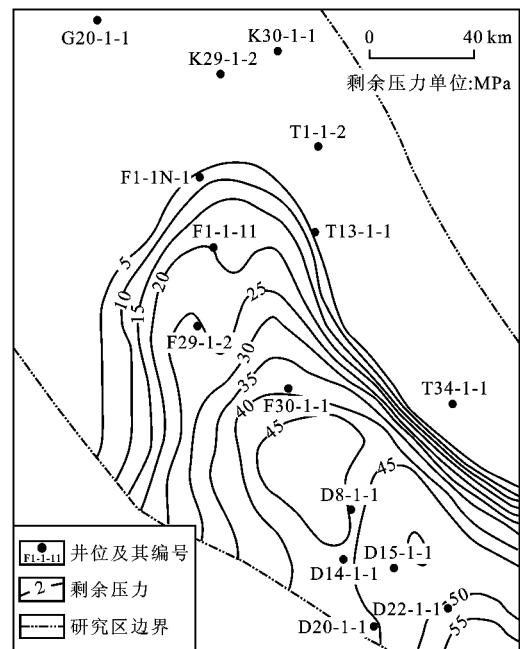


图 6 莺歌海组二段下部盖层超压等值线

Fig. 6 Overpressure Isoline of Cap Rock in the Lower Member 2 of Yinggehai Formation

式中:  $f$  为气藏盖层封闭能力综合定量评价指标;  $h$  为盖层厚度;  $\mu$  为天然气黏度;  $k$  为气藏压力系数;  $a$  为断裂对盖层的破坏程度, 其值为 0~1<sup>[21]</sup>。

大量研究表明, 断裂活动可破坏盖层的封闭性, 成为油气向上运移的通道<sup>[22-23]</sup>。莺歌海盆地晚第三纪拗陷发育, 断裂不再活动, 对应地震反射界面 T60 以上构造成因断裂不发育。目前发现的中新统及以上沉积地层的断裂都是流体底辟成因的张性或张扭性断裂, 其特征是倾角大、断距小、延伸距离短, 平面上分布在底辟带内。这些断裂对盖层的破坏程度很小, 可以忽略不计。

由于莺歌海组二段下部气藏很少, 一般气柱高度在 50 m 之上的气藏为有工业价值的气藏, 所以气藏压力系数取 50 m 气柱高度气藏的值。天然气黏度可根据 Lee 等的经验公式求取<sup>[24]</sup>。当  $f > 0.75$ , 盖层封闭能力为强; 当  $0.75 \leq f \leq 0.5$  时, 盖层封闭能力为较强; 当  $0.5 < f \leq 0.25$  时, 盖层封闭能力为中等; 当  $f \leq 0.25$  时, 盖层封闭能力为差。

莺歌海盆地莺歌海组二段泥岩盖层封闭能力强的地区分布在乐东区大部、临高区南部及东方区东部到一号断裂之间的地区, 一号断裂南段、东方区东部和北部地区为盖层封闭能力较强的地区, 研究区边部由于地层上倾出露地表, 盖层封盖能力逐渐减弱。莺歌海组二段泥岩盖层封闭能力中等及以上的地区可作为天然气的有效盖层; 由现有气藏的分布

可知,莺歌海组二段泥岩盖层封盖能力良好,中深层的天然气保存条件优越(图7)。

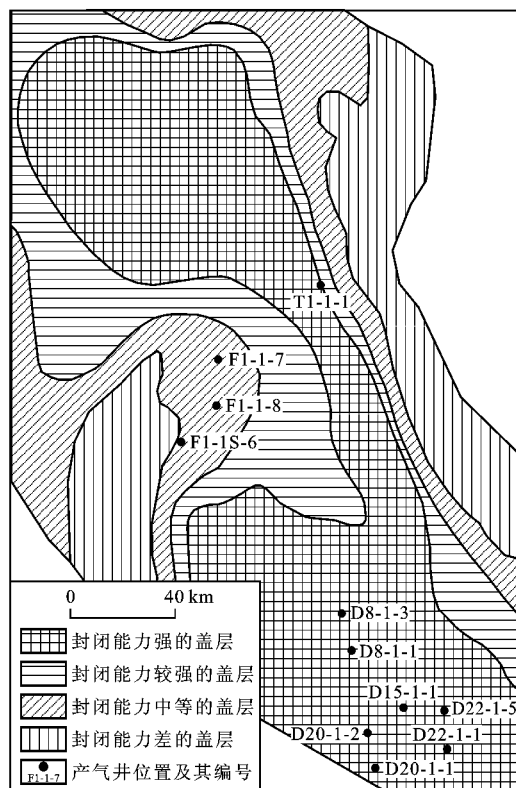


图7 莺歌海组二段泥岩盖层封闭性综合评价

Fig.7 Mudstone Cap Rock's Evaluation Map in Member 2 of Yinggehai Formation

## 4 结语

(1)从微观封闭机理上看,盖层的综合封闭能力是盖层排替压力和剩余压力的耦合,再考虑到盖层宏观特征,气藏封盖保存条件的优劣主要受到盖层厚度、排替压力、剩余压力、气藏内部压力、断裂对盖层破坏程度和天然气本身性质(流动黏度)的共同影响。

(2)结合现有产气井的位置,莺歌海组二段综合封闭指数显示,封闭能力中等及以上的盖层都是天然气的有效盖层。

(3)莺歌海组二段区域性盖层评价认为,封闭能力中等及以上的盖层分布在乐东、东方区大部、临高区南部和莺东斜坡带一号断裂西南部地区,覆盖面积大,从盖层角度体现出该盆地中深层天然气保存条件良好。

### 参考文献:

[1] 张启明,刘福宁,杨计海.莺歌海盆地超压体系与油气聚集[J].中国海上油气(地质),1996,10(2):65-75.

[2] 何家雄,祝有海,翁荣南,等.莺歌海盆地油气渗漏系统及油气勘探前景[J].西南石油大学学报:自然科学版,2010,32(1):1-10.

[3] 陈希仁,洗仲猷.莺歌海盆地的基本石油地质条件[R].广东湛江:中国海洋石油总公司湛江分公司勘探开发研究院,1999.

[4] 黄劲松,刘长国,牟广山.贝尔凹陷大一段下部旋回泥岩盖层封闭能力综合评价[J].大庆石油学院学报,2009,33(6):19-24.

[5] 张立含,周广胜,尚福华,等.绥滨凹陷城子河组泥岩盖层封闭能力综合评价[J].油气地质与采收率,2008,15(1):39-40.

[6] 李建民,王树海.贝尔凹陷布达特群潜山盖层封闭能力综合评价[J].大庆石油学院学报,2006,30(3):8-10.

[7] 谈玉明,任来义,张洪安,等.深层气泥岩盖层封闭能力的综合评价——以东濮凹陷杜桥白地区沙河街组三段泥岩盖层为例[J].石油与天然气地质,2003,24(2):191-195.

[8] 王欢,王琪,张功成,等.琼东南盆地梅山组泥岩盖层封闭性综合评价[J].地球科学与环境学报,2011,33(2):152-158.

[9] 吕延防,付广,张发强,等.超压盖层封烃能力的定量研究[J].沉积学报,2000,18(3):465-468.

[10] 黄志龙,高耀斌,郝石生.天然气盖层浓度封闭的定量评价及其应用[J].沉积学报,1996,14(2):89-94.

[11] 付广,吕延防.天然气扩散作用及其研究方法[M].北京:石油工业出版社,1999.

[12] Schowalter T T. Mechanics of Secondary Hydrocarbon Migration and Entrapment[J]. AAPG Bulletin,1979,63(5):723-760.

[13] 付广,陈章明,姜振学.盖层物性封闭能力的研究方法[J].中国海上油气(地质),1995,9(2):83-88.

[14] 付广,庞雄奇,姜振学.利用声波时差资料研究泥岩盖层封闭能力的方法[J].石油地球物理勘探,1996,31(4):521-528.

[15] 刘文国,吴元燕,况军.准噶尔盆地区域盖层排替压力研究[J].江汉石油学院学报,2001,23(1):17-19.

[16] 付广,付晓飞,孟庆芬.用声波时差研究泥岩盖层毛细管封闭能力[J].石油物探,2003,42(2):261-264.

[17] 黄志龙,郝石生.盖层突破压力及排替压力的求取方法[J].新疆石油地质,1994,15(2):163-166.

[18] 真柄钦次.压实与流体运动[M].陈荷立,译.北京:石油工业出版社,1981.

[19] 付广,张发强.利用声波时差资料研究欠压实泥岩盖层古压力封闭能力的方法[J].石油地球物理勘探,1998,33(6):812-818.

[20] 许书堂,杨玉娥,张东霞,等.东濮凹陷深层气盖层封闭性及有效性研究[J].断块油气田,2010,17(3):316-319.

[21] 吕延防,万军,沙子萱,等.被断裂破坏的盖层封闭能力评价方法及其应用[J].地质科学,2008,43(1):162-174.

[22] 渠芳,陈清华.对孤岛油田西南缘断层活动性的新认识[J].地球科学与环境学报,2009,31(4):394-399.

[23] 旷理雄,郭建华,童小兰,等.准噶尔盆地南缘东段油气成藏条件及成藏模式[J].地球科学与环境学报,2007,29(1):34-40.

[24] Lee A L, Gonzalez M H, Eakin B E. The Viscosity of Natural Aases[J]. Journal of Petroleum Technology, 1966, 18(8): 997-1000.