

# 烃浓度盖层封闭天然气的有效性及其研究意义

付 广 陈章明 万龙贵

(大庆石油学院, 安达市 151400)

**提 要** 本文在烃浓度盖层封闭机理及其形成地质条件分析的基础上, 通过烃浓度盖层封闭能力形成时期的确定, 利用其与气源岩排气门限的匹配关系, 探讨了烃浓度盖层封闭天然气的有效性。烃浓度盖层封闭能力形成时期只有早于或相近于气源岩排气门限时, 才能有效地封闭气源岩排出呈分子扩散相运移的天然气; 否则其封闭的有效性变差。并以松辽盆地三肇凹陷青山口组烃浓度盖层对下伏侏罗系气源岩天然气封闭的有效性为例进行分析, 阐明其在天然气远景资源评价中的重要意义。

**关键词** 烃浓度盖层 封闭有效性 封闭能力形成时期 气源岩排气门限 青山口组 侏罗系

**分类号** P 618.130.1

**第一作者简介** 付广 男 34岁 硕士 副教授 石油天然气地质与勘探

天然气由于分子小、重量轻, 在地下除了较石油更易以渗透方式通过盖层孔隙运移散失外, 扩散作用也是天然气通过盖层孔隙运移散失的重要方式。只要有烃浓度差存在, 天然气即可发生由高浓度区向低浓度区的扩散运移。根据 D. Leythaeuser<sup>[1]</sup>的理论计算结果表明, 天然气在地下通过盖层的扩散损失是十分可观的, 足以毁掉具有工业开采价值的天然气藏。因此, 烃浓度盖层能否封闭住呈分子扩散相运移的天然气, 对于天然气聚集成藏具有重要意义。

烃浓度盖层能否有效地封闭呈分子扩散相运移的天然气, 除与其烃浓度封闭能力大小有关外, 还要受到烃浓度封闭能力形成时期与气源岩排气门限匹配关系 (即烃浓度盖层封闭天然气的有效性) 的控制。烃浓度盖层封闭能力形成时期只有早于或相近于气源岩的排气门限, 才能有效地封闭住气源岩排出呈分子扩散相运移的全部或大部分天然气; 相反, 如果烃浓度盖层的封闭能力形成时期远晚于气源岩的排气门限, 那么将造成气源岩排出呈分子扩散相运移的天然气大量损失。因此, 研究烃浓度盖层封闭天然气的有效性对于准确地估算天然气的聚集量以及远景资源评价都具有重要意义。

## 1 烃浓度盖层封闭天然气机理及其形成条件

大量的事实证明, 天然气在地壳中的扩散是一

种十分普遍的地质现象, 只要有烃浓度差存在即可发生高浓度区向低浓度区转移以达到浓度平衡的扩散作用, 其扩散过程符合费克定律:

$$\frac{dQ}{dt} = -D \cdot A \cdot \frac{dc}{dx} \quad (1)$$

式中:  $\frac{dQ}{dt}$ ——天然气扩散速率 ( $m^3/s$ )

$D$ ——天然气扩散系数 ( $m^2/s$ );

$A$ ——天然气扩散流经过的面积 ( $m^2$ );

$\frac{dc}{dx}$ ——天然气浓度梯度 ( $m^3/m^3/m$ )。

由式 1 可知, 天然气在地下的扩散速率大小, 主要取决于天然气扩散系数和浓度梯度的大小。影响天然气扩散系数的因素有扩散物质性质、扩散介质的特征、扩散系统的温度和孔隙结构形状等, 它们对扩散系数大小的影响如表<sup>[2]</sup>所示。然而, 在地下对确定的泥岩盖层来说, 天然气通过其的扩散系数就是确定不变的。因此, 天然气在地下通过泥岩盖层的扩散速率大小主要取决于烃浓度的大小, 即烃浓度梯度越大, 天然气的扩散速率越大; 反之则越小。

正常情况下, 由于地层孔隙水中含气浓度的大小主要受到温度、压力等条件的影响, 即随埋深增加, 温度、压力增大, 地层孔隙水中含气浓度增大<sup>[3]</sup>。因此, 天然气具有向上递减的含气浓度梯度, 在此浓度梯度的作用下, 天然气将穿过上覆地层向地表扩散运移。

表 1 扩散系数随各种影响因素的变化特征表

Table 1 Variation of diffusion coefficients with different factors

影响因素	对扩散系数的影响
扩散组分	气体分子量越小, 扩散系数越大; 反之则越小。
扩散介质的性质	介质粘度越大, 扩散系数越小; 反之则越大。
扩散系统的温度	扩散系统温度越高, 扩散系数越大; 反之则越小。
岩石孔隙度	岩石孔隙度越大, 扩散系数越大; 反之则越小。
气体组成	气体组成越复杂, 扩散系数越小; 反之则越大。

当上覆盖层为生烃岩且又具异常高孔隙流体压力时, 由于异常高孔隙流体压力的存在, 使得天然气在其孔隙水中的溶解能力增强, 其内有机质演化生成的天然气的供给, 可导致盖层孔隙水中含气浓度明显较正常压实泥岩孔隙水中含气浓度增大, 如图 1 所示, 改变了地层剖面上孔隙水中含气浓度梯度的变化情况, 使原来向上递减的含气浓度梯度在此处发生变化, 从欠压实泥岩压实主带 ( $Z_0$ ) 以下出现向下递减的含气浓度梯度, 阻止了下伏地层中天然气通过此泥岩盖层的向上扩散运移。由于这种作用是由烃浓度梯度造成, 所以称其为烃浓度封闭作用, 具有这种封闭作用的盖层称之为烃浓度盖层。

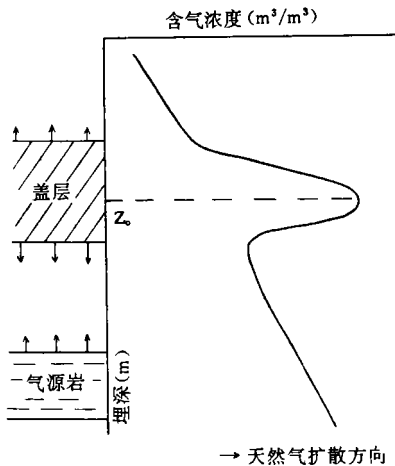


图 1 烃浓度盖层封闭天然气扩散机理示意图

Fig. 1 Sketch of the diffusion mechanism of gases sealed by hydrocarbon concentration as a cap rock

由上述分析可得, 烃浓度盖层的形成是有条件的, 首先应具有生烃能力, 且有机质演化进入排气门限, 才能使其孔隙水处于含气饱和状态。其次盖层还要欠压实形成异常高的孔隙流体压力, 才能造

成异常高含气浓度的形成。只有同时满足了上述两个条件才能形成烃浓度盖层。

## 2 烃浓度盖层封闭能力形成时期的确定

由上述烃浓度盖层形成地质条件的分析可得, 烃浓度盖层的封闭能力并非一经沉积就形成的, 而是随其埋深增加, 压实成岩程度增大, 粘土矿物脱水转化, 有机质向油气演化到一定阶段, 才开始形成封闭能力的。烃浓度盖层封闭能力的形成除与其内的孔隙流体超压的形成有十分密切关系外, 更重要的是取决于其内生成的气体的量能否满足其孔隙水溶解的需要, 只有当其内生成的天然气量使其内孔隙水达到饱和状态时, 才能形成烃浓度封闭作用。

由于天然气的生成, 自有有机质埋藏初期生成生物化学气始, 至热降解气、热裂解气生成阶段止, 是有机质随埋深增大不断向烃类气转化的结果。根据庞雄奇<sup>[4]</sup>的研究, 气源岩生成的气体首先要满足其自身对气体的吸留量 (岩石矿物的吸着气量、孔隙水、油的溶解气量、岩石孔隙空间的游离气存留量的总和) 之后, 其过剩的气体才能排出源岩母体, 即达到该源岩的排气临界值之后, 才能出现排气作用, 如图 2 所示。当盖层中有有机质演化进入排气门限时, 盖层孔隙水中天然气已经达到饱和状态。根据泥岩欠压实产生形成的地质条件<sup>[5]</sup>, 可知此时其已欠实形成了异常高孔隙流体压力。因此, 本文将盖层的排气门限作为烃浓度盖层封闭能力的形成时期。

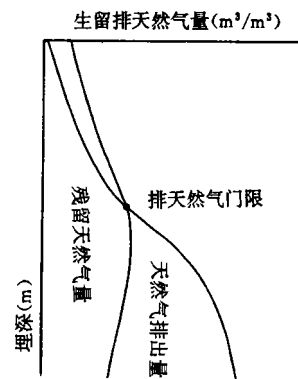


图 2 源岩排气地质模式图 (据庞雄奇, 1992)

Fig. 2 Geological model of gas expulsion by source rocks

## 3 烃浓度盖层封闭天然气的有效性

由上述分析可知, 烃浓度盖层封闭能力形成时期以及气源岩的排气门限都是在地质演化过程中达

到一定阶段后才形成的。二者之间如何匹配, 直接影响着天然气聚集与保存数量的多少。由图 3 中可以看出, 如果烃浓度盖层封闭能力形成时期 ( $t'_c$ ) 早于气源岩的排气门限 ( $t_e$ ) 时, 除气源岩在进排气门限之前的少部分扩散排出的天然气不能被封盖外, 气源岩进入排气门限后的所有呈分子扩散相运移的天然气可全部被封盖, 即天然气的扩散损失量 ( $Q'_d$ ) 接近为零, 表明烃浓度盖层封闭的有效性最好; 如果烃浓度盖层封闭能力形成时期晚于气源岩的排气门限, 则烃浓度盖层所能封闭住气源岩排出呈分子扩散相运移的天然气量大小就受到二者时间差大小的制约。如果烃浓度盖层封闭能力形成时期 ( $t''_c$ ) 远晚于气源岩的排气门限 ( $t_e$ ) 时, 则气源岩排出呈分子扩散相运移的天然气被此烃浓度盖层封闭住的量 ( $Q''_c$ ) 就越小, 天然气扩散损失量 ( $Q''_d$ ) 就越大, 表明烃浓度盖层封闭有效性越差; 如果烃浓度盖层封闭能力形成时期 ( $t'''_c$ ) 与气源岩的排气门限 ( $t_e$ ) 相近时, 则气源岩排出呈分子扩散相运移的天然气被此烃浓度盖层封闭住的量 ( $Q'''_c$ ) 就越大, 天然气扩散损失量 ( $Q'''_d$ ) 就越小, 表明烃浓度盖层封闭的有效性越好。

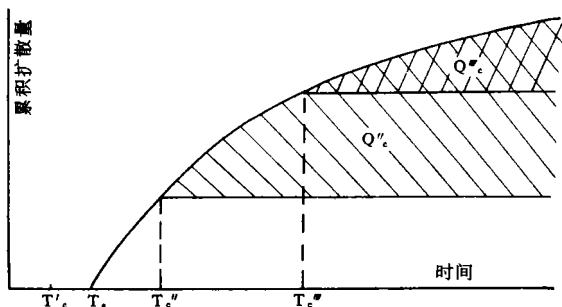


图 3 烃浓度盖层封闭天然气有效性模式图

Fig. 3 Sketch showing the efficiency of gas sealing by hydrocarbon concentration caprocks

#### 4 三肇凹陷青山口组烃浓度盖层封闭下伏侏罗系气源岩天然气的有效性分析

三肇凹陷位于松辽盆地中央坳陷区内, 西接大庆油田, 东到朝阳沟油田, 北抵滨洲铁路, 南至松花江边。

该区是松辽盆地天然气勘探的重点地区, 产气层位较多, 既有下部含油气组合的泉三、四段的扶扬层, 又有深部含油气组合的登娄库组产气层。天

然气主要来自下伏上侏罗统气源岩。上侏罗统气源岩生成排出的天然气在向上覆地层中进行扩散运移时, 首先遇到的第一个区域性烃浓度封盖层就是青山口组泥岩, 其封闭能力的强弱及封闭能力形成时期的早晚对该凹陷内上侏罗统天然气的聚集与保存具有重要意义。

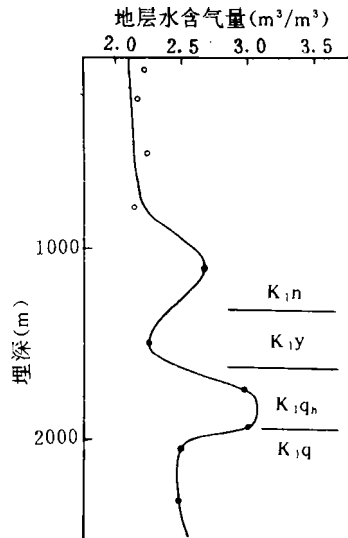


图 4 徐 9 井地层水含气浓度随深度变化图

Fig. 4 Variation of the gas concentration in formation water with burial depth in the Xu-9 well

##### 4.1 青山口组泥岩烃浓度盖层的封闭能力及其封闭能力的形成时期

三肇凹陷青山口组为一大套深浅湖相的暗色泥岩沉积, 其中有机质丰富, 有机碳含量为 0.9%~2.8%, 氯仿沥青“A”为 0.09%~0.5%, 总烃为  $900 \times 10^{-6} \sim 3400 \times 10^{-6}$ , 母质类型主要以 I 型干酪根为主, 少量为 II 型干酪根。且目前已进入大量生烃期 ( $R_o$  为 0.5%~1.2%), 具有较强的生烃能力, 是该区中下部含油气组合的主力烃源岩。该区青山口组泥岩由于厚度 (大于 300 m) 大, 且沉积速率 (青一段为 193.58 m/ma, 青二、三段为 50.01 m/ma) 快, 与压实排水不相平衡, 造成其内部产生欠压实现象。根据等效深度法计算, 该区青山口组泥岩的最大异常孔隙流体压力主要分布在凹陷中心, 最大可达到 15MPa, 由此向四周异常孔隙流体压力逐渐减小<sup>①</sup>。上述证据表明该区青山口组泥岩目前应具有烃浓度封闭能力。由图 4 中可以看出, 该区青山口组泥岩孔隙水中的含气浓度明显高于下伏

① 付 广, 姜振学, 陈章明等. 松辽盆地三肇地区青山口组泥岩盖层的封闭特征. 天然气地球科学, 1995, 6 (2): 14~19.

地层孔隙水中的含气浓度，具有明显向下递减的含气浓度梯度，对下伏天然气的向上扩散运移具有较强的烃浓度封闭能力。

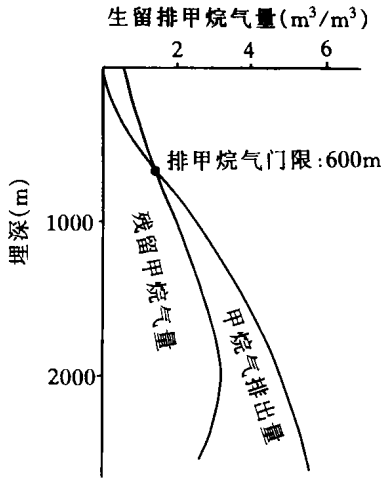


图 5 三肇凹陷青山口组气源岩排甲烷气史图

Fig. 5 Methane expelling history from the Qingsankou sourcerock in Sanzhao

m 时其内有机质演化开始进入排甲烷气门限，如图 5 所示，且此时其内欠压实已经形成（据付广等（1994）研究，青山口组泥岩在 357 m 处开始欠压实），表明此时泥岩孔隙水中已被天然气所饱和，烃浓度封闭能力已经开始形成。根据地层厚度资料推测该区青山口组泥岩烃浓度盖层封闭能力形成时期大约在嫩三段沉积末期。

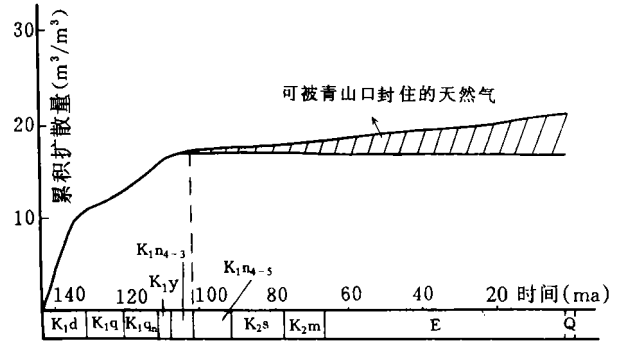


图 7 三肇凹陷侏罗系天然气扩散损失量随时间变化图

Fig. 7 Variation of gas diffusive flux in Jurassic sourcerocks with time in Sanzhao sag

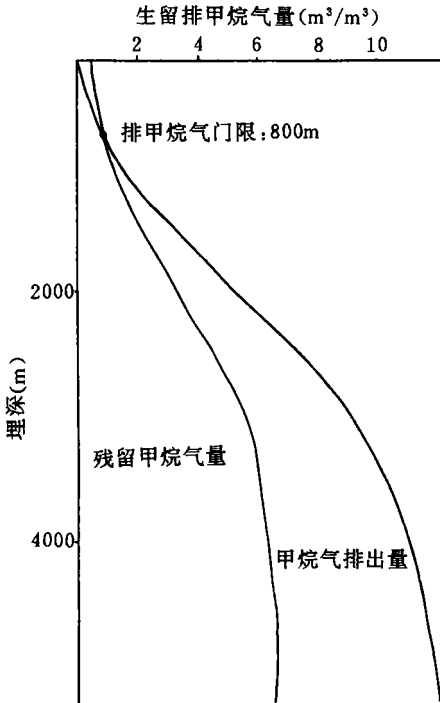


图 6 三肇凹陷侏罗系气源岩排甲烷气史图

Fig. 6 Methane expelling history from the Jurassic sourcerock in Sanzhao sag

#### 4. 2 上侏罗统气源岩排气门限

三肇凹陷上侏罗统主要是湖沼相沉积为主，暗色泥岩发育，营城组、沙河子组和火石岭组暗色泥岩的累积厚度分别为 60 m、500 m 和 400 m。29 块泥岩样品的地化指标统计结果为，有机碳含量为 0.56%~3.88%，平均为 1.9038%；干酪根类型主要为 II 型，少部分为 III 型；有机质演化已进入高成熟至过成熟阶段 ( $R_o$  为 2.08%~3.55%)，表明三肇凹陷上侏罗统泥岩为有利的生气源岩。

用上述同样方法可以得到，该区上侏罗统气源岩在埋深达到 800 m 左右有机质演化开始进入排甲烷气门限，开始向外排出甲烷气体，如图 6 所示。根据地层厚度资料推测大约在侏罗系沉积末期上侏罗统气源岩开始进入甲烷排气门限。

#### 4. 3 青山口组泥岩烃浓度盖层封闭上侏罗统天然气的有效性分析

由上述分析结果可以得到，青山口组泥岩烃浓度盖层封闭能力形成时期（嫩三段沉积末期）远远晚于上侏罗统气源岩的排甲烷气门限（侏罗系沉积末期），封闭有效性差，造成大量的上侏罗统天然气呈分子扩散相运移散失，如图 7 所示，累积可达到  $1.96 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，约占总生气量（根据周平等

根据庞雄奇（1992）<sup>[4]</sup>的气源岩排烃门限控油气理论研究得到，该区青山口组泥岩在埋深达到 600

(1991)计算整个三肇凹陷上侏罗统气源岩的总生气量为  $11.96 \times 10^{12} \text{ m}^3$  (16.38%)。只有少量的上侏罗统气源岩排出呈分子扩散相运移的天然气 ( $0.44 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ), 约占整个三肇凹陷上侏罗统气源岩总生气量的 3.7%) 能被青山口组烃浓度盖层封闭住, 如图 7 所示。因此说, 这可能也就是该区目前只能找到中小型侏罗系天然气藏, 而找不到大型侏罗系天然气藏的一个不可忽视的重要原因。

## 5 结 论

只有具生烃能力且具异常高孔隙流体压力的泥岩盖层, 才具烃浓度封闭能力。烃浓度盖层封闭能力形成时期只有早于或相近于气源岩的排气门限, 才能封闭住气源岩排出呈分子扩散相运移的全部或

大部分天然气, 封闭有效性好, 相反, 只能封闭住气源岩排出呈分子扩散相运移的少量天然气, 封闭有效性差。

## 参 考 文 献

- [1] D Leythaeuser, et al. Role of diffusion in primary migration of hydrocarbons. AAPG Bull, 66 (4): 408~429.
- [2] 郝石生, 黄志龙, 杨家青. 天然气运聚平衡原理及应用. 北京: 石油工业出版社, 1994, 30~50.
- [3] 张义纲. 天然气动态平衡成藏的四个基本条件. 石油地质, 1991, 13 (3): 210~221.
- [4] 庞雄奇, 陈章明, 陈发景等. 含油气盆地地史、热史、生留排烃史数值模拟研究与气源岩定量评价. 北京: 地质出版社, 1993, 70~96.
- [5] 付 广, 陈章明, 姜振学等. 轮南地区石炭系泥岩盖层的压力封闭特征. 新疆石油地质, 1995, 16 (1): 19~23.

# The Sealing Efficiency for Natural Gas by the Hydrocarbon Concentration Caprock and Its Significance

*Fu Guang and Chen Zhangming*

(Daqing Petroleum Institute, Anda 151400)

## Abstract

Based on the sealing mechanism of the hydrocarbon concentration caprock and its geological conditions, and by means of determining the period that the sealing ability of hydrocarbon concentration caprock formed and investigating the matching relationship of that with the gas expulsion period of source rocks, the authors have discussed the sealing efficiency of the hydrocarbon concentration caprock, i. e., only the sealing period is earlier than or near the expulsion period of source rocks can the hydrocarbon concentration caprock seal the gas expelled by source rocks in diffusive phase, and if not, the sealing efficiency of the hydrocarbon concentration caprock is bad. This paper analysed the efficiency of the hydrocarbon concentration caprock of the Qingsankou formation mudstone which seals the gas from Jurassic system and expounded the significance of sealing efficiency in the evaluation of gas prospective resources.

**Key Words** hydrocarbon concentration caprock sealing efficiency formation period of sealing ability gas expulsion period of source rock Qingsankou formation Jurassic system