

文章编号: 1000-0550(2006) 01-0141-07

泥岩盖层抑制浓度封闭形成与演化及其研究意义

付 广 苏玉平

(大庆石油学院 黑龙江大庆 163318)

摘 要 在泥岩盖层抑制浓度封闭机制及其形成条件分析的基础上,通过异常孔隙流体压力的形成与演化对于泥岩盖层抑制浓度封闭形成与演化规律进行研究,根据异常孔隙流体压力形成与演化建立了一套泥岩盖层抑制浓度封闭形成与演化特征的恢复和预测方法。该方法不仅可以恢复泥岩盖层抑制浓度封闭的形成时期,还可以预测泥岩盖层抑制浓度封闭能力的演化过程,同时还可以确定目前泥岩盖层抑制浓度封闭的演化阶段和预测其今后的变化,将该方法应用于松辽盆地古龙凹陷古 11 井青山口组和嫩一、二段泥岩盖层抑制浓度封闭的形成与演化的恢复和预测中,恢复和预测的结果复合实际地质条件,表明该方法用于泥岩盖层抑制浓度封闭形成与演化是可行的。

关键词 泥岩盖层 抑制浓度封闭 异常含气浓度 异常孔隙流体压力 形成 演化 预测 恢复

第一作者简介 付广 男 1962 年出生 教授 博士生导师 油气藏形成与保存

中图分类号 TE121.1 **文献标识码** A

1 前言

随着天然气地质研究的深入,人们已经认识到扩散相天然气在地下的运移所需要的动力明显不同于游离相和水溶相天然气,它不需要压力差,只要存在浓度差就可以由高浓度区向低浓度区发生天然气扩散运移。而且因其以分子形式进行运移,所以它更易通过那些致密的泥岩盖层而运移散失。抑制浓度封闭是阻止扩散相天然气运移的重要机制^[1-3],其能力的强弱制约着扩散相天然气的富集数量,尤其是古抑制封闭能力的强弱,对扩散相天然气富集程度的影响更大。因此,开展泥岩盖层抑制浓度封闭能力形成和演化的恢复与预测,对于研究泥岩盖层对扩散相天然气封闭的有效性和泥质岩盖层封油气理论的发展均具有重要意义。

2 抑制浓度封闭机理及形成条件

由文献^[1]可知,抑制浓度封闭作用的形成是有条件的,它只能存在于既具生烃能力,又具异常孔隙流体压力的泥岩盖层中。在这种条件下,由于地层孔隙水中的含气浓度是其所处环境温度、压力的函数,即温度和压力越大,天然气在地层孔隙水中的溶解能力越强;反之则越弱^[4]。泥岩盖层自身生成的天然气,在其内异常高孔隙流体压力的作用下溶于孔隙水中,造成泥

岩盖层内孔隙水中的含气浓度明显高于正常压实地层孔隙水中的含气浓度(二者之间的差值称为异常含气浓度),使原来向上递减的含气浓度在此处出现向下递减^[5]。其欠压实主带以下部分生成的天然气,在向下递减的含气浓度的作用下,向下伏储气层中扩散运移,阻止了下伏储气层中天然气的向上扩散运移。对下伏扩散相运移的天然气形成的封闭作用,被称之为抑制浓度封闭^[1]。泥岩盖层中异常含气浓度越大,抑制浓度封闭能力越强;反之则越弱。

3 抑制浓度封闭的形成与演化

由上可知,泥岩盖层的抑制浓度封闭的形成关键取决于其内异常含气浓度的形成,由文献^[2]可知,异常含气浓度的形成又受到异常孔隙流体压力形成的制约。

大量的研究表明,异常孔隙流体压力并非是泥岩盖层一沉积就存在的,而是随着埋深增加,压实成岩作用增强,粘土矿物转化脱水和有机质向油气转化达到一定阶段后,由于其内大量孔隙流体排出受阻承压形成的,如图 1 所示。然而,异常孔隙流体压力形成后,并不是不变的,随着埋深增加,粘土矿物转化脱出的结合水及有机质演化生成的油气量越来越多,在上下排出受阻及孔隙空间体积近于不变的情况下,滞留在孔隙中的大量流体在水热增压和流体增加承压^[6]

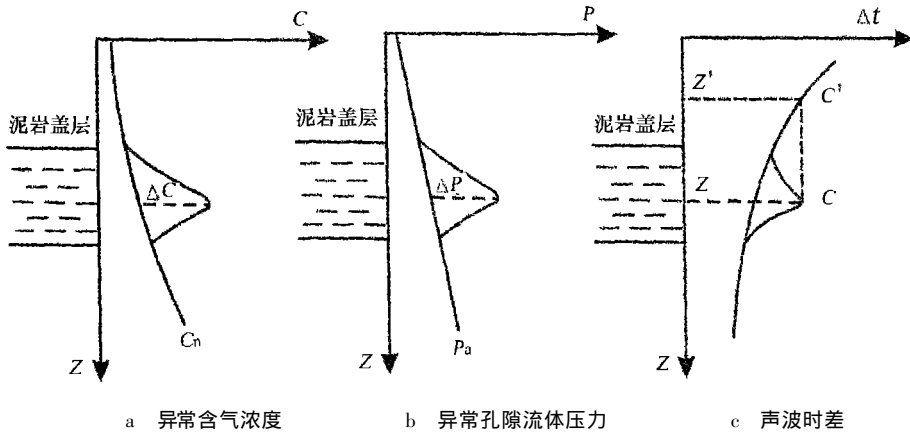


图 2 泥岩盖层抑制浓度封闭(异常含气浓度)形成时期示意图

Fig 2 The sketch map of formation period of restraining concentration seal (abnormal gas bearing concentration) in the mudstone caprock

于计算, 本文不妨做如下假设:

(1) 泥岩盖层异常声波时差在某一次异常孔隙流体压力释放前均是不变的, 但不同次异常孔隙流体压力释放前异常声波时差值是不同的;

(2) 泥岩盖层中孔隙流体压力达到静水压力的 1.8 倍时, 即发生异常孔隙流体压力释放;

(3) 泥岩盖层中孔隙流体压力下降至静水压力的 1.3 倍时, 异常孔隙流体压力释放作用停止。

根据上述 3 点假设, 由图 1 可以得到泥岩盖层中的最大异常孔隙流体压力为:

$$\Delta P_{\max} = P_b - P_w \quad (1)$$

式中: ΔP_{\max} ——泥岩盖层中最大异常孔隙流体压力, Pa

P_b ——泥岩盖层破裂压力, Pa

P_w ——静水压力, Pa

由异常孔隙流体压力计算公式(式 2 和式 1), 可以得到泥岩盖层第一次破裂, 即第一次异常孔隙流体压力释放深度。

$$\Delta P = \rho_z + \frac{\rho_r - \rho_w}{c} \ln \frac{\Delta t}{\Delta t_0} - \rho_w Z \quad (2)$$

式中: ΔP ——泥岩盖层中异常孔隙流体压力,

Pa

ρ_r ——沉积岩平均密度, g/cm^3 ;

ρ_w ——地层水密度, g/cm^3 ;

c ——泥岩盖层正常压实趋势线斜率;

Δt ——泥岩盖层声波时差值, $\mu s/m$;

Δt_0 ——外推的地表处泥岩盖层声波时差值, $\mu s/m$;

m;

Z ——泥岩盖层埋深, m;

$$Z_{m1} = \frac{\rho_r - \rho_w}{(1.80\rho_w - \rho_r)c} \ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_0} \quad (3)$$

式中: Z_{m1} ——泥岩盖层异常孔隙流体压力第一次释放时的深度, m;

Δt_1 ——泥岩盖层异常孔隙流体压力第一次释放前的异常声波时差值, $\mu s/m$ 。

由上可知, 当泥岩盖层埋深达到 Z_{m1} 时, 泥岩盖层发生破裂, 异常孔隙流体压力释放, 压力降低, 当其压力下降至静水压力的 1.3 倍时, 异常孔隙流体压力释放作用停止, 泥岩盖层开始愈合, 但此时异常声波时差值已经降低, 其大小为:

$$\Delta t_2 = \Delta t_0 e^{\frac{1.3\rho_w - \rho_r}{\rho_r - \rho_w} Z_{m1}} \quad (4)$$

式中: Δt_2 ——泥岩盖层中异常孔隙流体压力第一次释放后或第二次演化的异常声波时差值, $\mu s/m$;

随着埋深增加, 泥岩盖层中的异常孔隙流体压力在水热增压和流体增加承压等的作用下, 继续增大, 当其第二次破裂时, 由式 3 可以得到其埋深为:

$$Z_{m2} = \frac{\rho_r - \rho_w}{(1.80\rho_w - \rho_r)c} \ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_0} \quad (5)$$

异常孔隙流体压力第二次释放后又一次减小的异常声波时差值为:

$$\Delta t_3 = \Delta t_0 e^{\frac{1.3\rho_w - \rho_r}{\rho_r - \rho_w} Z_{m2}} \quad (6)$$

由上类推可以得到, 泥岩盖层第 i 次破裂时的埋深和破裂后的异常声波时差值分别为:

$$Z_{mi} = \frac{\rho_r - \rho_w}{(1.80\rho_w - \rho_r)c} \ln \frac{\Delta t_i}{\Delta t_0} \quad (7)$$

$$\Delta t_i = \Delta t_0 e^{\frac{1.3\rho_w - \rho_r}{\rho_r - \rho_w} Z_{mi}} \quad (8)$$

由式 7 和式 8 便可以求得泥岩盖层第 i 次破裂时的埋深和其释放后的异常声波时差值, 根据地层厚度及沉积速率资料, 便可推测得到泥岩盖层第 i 次破裂时期。以此类推, 当 Δt_i 小于或等于泥岩盖层正常压实声波时差值时, 表明泥岩盖层欠压实作用停止, 异常孔隙流体压力消失, 即泥岩盖层中异常孔隙流体压力演化作用停止。

由异常含气浓度与异常孔隙流体压力之间的对应关系, 由上述方法便可以确定出异常含气浓度的演化过程, 即盖层抑制浓度封闭的演化过程。

5 研究意义

通过泥岩盖层的抑制浓度封闭性的形成与演化研究, 可以解决以下三个问题:

5.1 恢复泥岩盖层抑制浓度封闭的形成时期。

根据泥岩盖层异常含气浓度对应的声波时差值的大小, 由式 9 便可以计算泥岩盖层抑制浓度封闭的形成深度 (Z_0), 由地层厚度和沉积速率资料, 便可以确定出泥岩盖层抑制浓度封闭的形成时期。

$$Z_0 = \frac{1}{c} \ln \frac{\Delta t_0}{\Delta t} \quad (9)$$

5.2 恢复和预测泥岩盖层的抑制浓度封闭能力的演化

在确定出某一演化阶段泥岩盖层异常孔隙流体压力释放埋深和释放后的声波时差值的基础上, 便可由式 10 计算出某一演化阶段泥岩的异常孔隙流体压力值。

$$\Delta P_i = \rho_w Z_i + \frac{\rho_r - \rho_w}{c} \ln \frac{\Delta t_i}{\Delta t_0} - \rho_w Z_i \quad (10)$$

式中: ΔP_i ——某一演化阶段泥岩盖层中异常孔隙流体压力, Pa

Z_i ——某一演化阶段泥岩盖层埋深, m

由式 10 的计算结果, 代入式 11 便可计算得到某一演化阶段盖层中的异常含气浓度, 从而便可以确定出某一演化泥岩盖层抑制封闭能力的强弱。

$$\Delta C_i = 0.0224 / K_p \left(\rho_r \cdot Z_i + \frac{\rho_r - \rho_w}{c} \ln \frac{\Delta t_i}{\Delta t_0} - \rho_w Z_i \right) + \frac{\rho_r \cdot Z_i + \frac{\rho_r - \rho_w}{c} \ln \frac{\Delta t_i}{\Delta t_0}}{RT_i + b_m \left(\frac{\rho_r - \rho_w}{c} \ln \frac{\Delta t_i}{\Delta t_0} \right)} \phi_i - \frac{\rho_w Z_i \phi_i}{RT_i + b_m \rho_w Z_i} + \frac{b_m (\rho_w Z_i)^2 K_p}{RT_i + b_m \rho_w Z_i} - \frac{b_m \left(\rho_r \cdot Z_i + \frac{\rho_r - \rho_w}{c} \ln \frac{\Delta t_i}{\Delta t_0} \right)^2 K_p}{RT_i + b_m \left(\frac{\rho_r - \rho_w}{c} \ln \frac{\Delta t_i}{\Delta t_0} \right)} \quad (11)$$

其中: $\phi_i = 0.35 \phi_m$;

$$\phi_m = 9.69834 \times 10^{-3} + 1.639 \times 10^{-6} t - 1.2579 \times 10^{-6} t^2 + 2.1292 \times 10^{-3} t^3;$$

$$K_p = e^{-18.561} \cdot e^{2133.89/T}$$

上式中: ΔC_i 为泥岩盖层的异常含气浓度, m^3 / m^3 ; K_p 为天然气水合平衡常数; b_m 为天然气分子的范德华体积, $4.28 \times 10^{-5} m^3 / mol$; R 为气体常数, $8.315 J / (mol \cdot K)$; P 为压力, Pa; T 、 t 为温度, K、 $^{\circ}C$; ϕ_i 为水分子有效间隙度; ϕ_m 为水分子最大间隙度, $T_i = T_0 + G_i \frac{Z_i}{100}$, T_i 为泥岩盖层在某一演化阶段 (Z_i) 的古地温, $^{\circ}C$; T_0 为古地表温度, $^{\circ}C$; G_i 为某一演化阶段 (Z_i) 的古地温梯度, $^{\circ}C / 100m$ 。

5.3 确定泥岩盖层抑制浓度封闭目前的演化阶段和预测其今后变化

在上述泥岩盖层异常孔隙流体压力释放深度和次数研究的基础上, 通过其抑制浓度封闭 (异常含气浓度) 演化研究, 根据泥岩盖层目前埋深与其上覆埋深比较, 便可以确定出其目前抑制浓度封闭的演化阶段和预测其今后变化。

6 应用举例

本文选取松辽盆地古龙凹陷古 11 井青山口组和嫩一、二段泥岩盖层为例, 利用上述方法研究其抑制浓度封闭能力的形成与演化规律, 从而阐述其在天然气成藏与分布中的作用。

古龙凹陷位于松辽盆地中央凹陷区西部, 是一个长期发育的继承性凹陷, 它始于早白垩世登娄库组, 历经泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组。至晚白垩世的四方台组、明水组则凹陷处于上升过程中的沉降阶段。明水组末期的构造运动使其定型。第三纪、第四纪是全盆地的夷平时期, 凹陷的构造形态变化不大。

青山口组和嫩一、二段沉积时期古龙凹陷水体最深, 分布面积最大, 沉积了厚度较大的两套泥岩沉积, 青山口组泥岩厚度约为 280~520 m, 嫩一、二段泥岩厚度约为 269~349 m, 沉积速率分别为 56~104 m / Ma 和 53.8~69.8 m / Ma 是古龙凹陷中部含油气组合两套主力烃源岩, 同时又是扶、杨油层和萨、葡、高油层油气的两套区域性盖层。由图 3 中可以看出, 古龙凹陷最深处的古 11 井青山口组和嫩一、二段泥岩盖层声波时差明显偏离正常压实趋势线, 表明其欠压实具异常孔隙流体压力, 对扩散相天然气具有抑制浓度封闭能力。

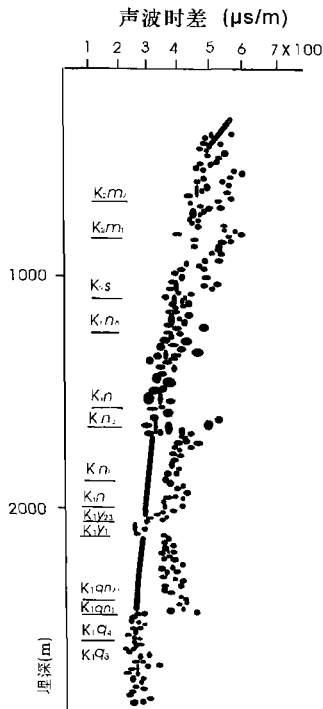


图 3 古 11 井声波时差与深度关系
Fig 3 The relation between interval transit time and depth in Well Gu 11

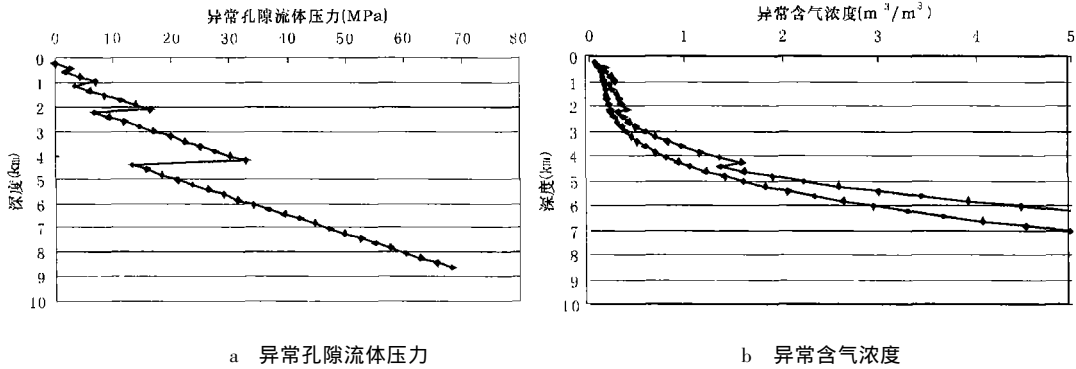


图 4 古 11 井青山口组泥岩盖层抑制浓度封闭 (异常含气浓度) 演化曲线
Fig 4 the evolution curve of restraining concentration seal (abnormal gas bearing concentration) of K_{1qn} mudstone caprock in well Gu 11

再增大, 抑制浓度封闭作用也再增大), 第三演化阶段于其沉积厚度达到 2 229.3 m 时 (约下第三系沉积末期) 结束。目前正处于抑制浓度封闭的第四演化阶段, 异常含气浓度为 0.37 m³/m³ 左右。由图 4 中还可以看出, 青山口组泥岩盖层今后还应将经历抑制浓度封闭的 1 次演化。由图 5 可以看出, 古 11 井嫩一、二段泥岩盖层抑制浓度封闭性演化阶段也可以分为 5 个演化阶段, 约在其沉积厚度达到 196.9 m 时 (约为嫩四段沉积初期), 因异常孔隙流体压力的形成,

由图 3 中古 11 井青山口组和嫩一、二段泥岩盖层压实系数和声波时差特征, 根据式 1 至式 10 对其异常孔隙流体压力形成深度、释放次数、释放深度和大小进行预测, 并利用此结果, 利用式 11 对其异常含气浓度的形成与演化进行了研究, 结果如图 4 和图 5 所示。

由图 4 中可以看出, 古 11 井青山口组泥岩盖层抑制浓度封闭性演化可以分为 5 个演化阶段, 在其沉积厚度达到 221.3 m 时 (约青二、三段沉积中期), 因异常孔隙流体压力的形成, 抑制浓度封闭开始形成, 之后抑制浓度封闭能力随埋深增加而逐渐增大。在其沉积厚度达到 568.4 m (约为嫩一段沉积中期) 时因异常孔隙流体压力第一次释放而使异常含气浓度达到最大值 (但由于此时埋深相对较浅, 有机质尚未成熟, 天然气生成量有限, 地层孔隙中含气浓度相对较低, 故异常含气浓度也相对较低, 抑制浓度封闭能力作用相对较弱), 并开始减小, 结束第一次演化, 随之转入第二演化阶段。其第二阶段的演化在沉积厚度达到 1 125.7 m (约嫩四段沉积中期) 时结束 (此阶段有机质刚刚进入生烃门限, 天然气生成量高于第一演化阶段, 地层水中含气浓度增大, 异常含气浓度也

抑制浓度封闭开始形成, 之后抑制浓度封闭能力随埋深增大而逐渐增大。其沉积厚度达到 505.7 m 时 (约嫩四段沉积初期) 因异常孔隙流体压力第一次释放而使异常含气浓度达到最大值 (与上同理, 抑制浓度封闭作用相对较弱), 并开始减小, 结束第一次演化, 进入第二演化阶段。之后随着异常孔隙流体压力的再次增大, 异常含气浓度又开始增大, 即抑制浓度封闭能力逐渐增强, 其第二阶段的演化在其沉积厚度达到 1 001.5 m 时 (约四方台组沉积初期) 结束 (与上同

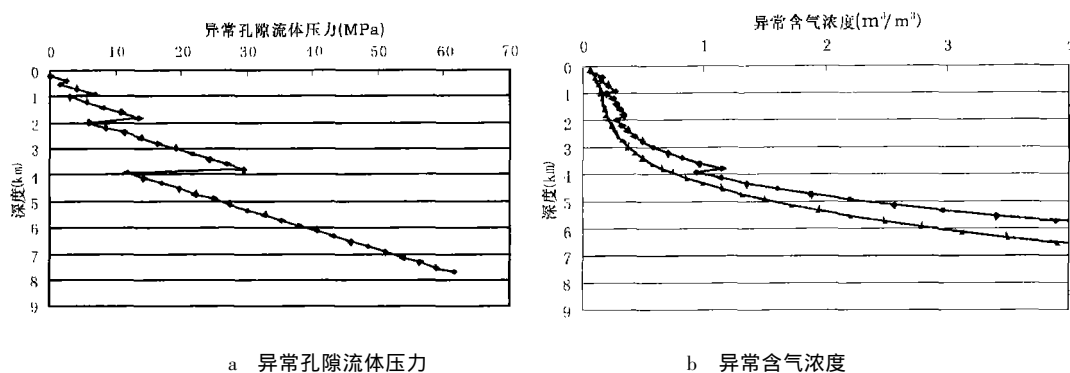


图 5 古 11 井嫩一、二段泥岩盖层抑制浓度封闭(异常含气浓度)演化曲线

Fig 5 The evolution curve of restraining concentration seal (abnormal gas bearing concentration) of K_1n_{1+2} mudstone caprock in Well Gu 11

理,抑制浓度封闭作用再增强),目前正处于抑制浓度封闭的第三演化阶段,异常含气浓度为 $0.20 \text{ m}^3 / \text{m}^3$ 左右。由图 5 中还可以看出,嫩一、二段泥岩盖层抑制浓度封闭今后还应将经历 2 次演化。

由该凹陷源岩生排烃史研究表明,古龙凹陷青山口组烃源岩于嫩四段沉积末期开始向外排烃,在明水组沉积初期进入大量排烃时期。嫩一、二段源岩于明水组沉积末期开始向外排烃,在第四系达到高峰期。由此可以看出,古龙凹陷青山口组和嫩一、二段泥岩盖层抑制浓度封闭能力开始形成时期均早于其大量向外排烃时期,对于封闭其排出的扩散相天然气是十分有利的。虽因其内异常孔隙流体压力的 3 次(青山口组)和 2 次(嫩一、二段)释放曾经造成其抑制浓度封闭能力减弱,但它们的释放时期均早于其大量排气期,未造成扩散相天然气的大量散失,且目前又具有很强抑制浓度封闭能力。有利于扩散相天然气在的扶、杨油层和萨、葡、高油层的聚集和保存。这些特征应是古龙凹陷中部含油气组合天然气成藏的一个重要条件。

7 结论

上述研究方法在松辽盆地古龙凹陷古 11 井青山口组和嫩一、二段的应用结果表明,该方法用于泥岩盖层抑制浓度封闭能力形成与演化的恢复与预测是可行的。不仅可以确定其形成时期,恢复和预测其抑制浓度封闭能力的演化过程,同时还可以确定目前抑制浓度封闭处于哪一个演化阶段及预测其今后的变化。因此,这是一种研究和预测泥岩盖层抑制浓度封闭形成与演化的有效方法。

参考文献 (References)

- 付广,吕延防. 天然气扩散作用及其研究方法. 北京:石油工业出版社,1999. 79~88 [Fu Guang, Lv Yanfang. Gas Diffusion and Its Research Method. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999. 79~88]
- 付广,张发强. 烃浓度盖层古异常含气浓度的恢复方法. 中国海上油气(地质),1999,13(6): 429~433 [Fu Guang, Zhang Faqiang. A method recovering an ancient abnormal gas-bearing concentration of hydrocarbon concentration caprock. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1999, 13(6): 429~433]
- 付广,王兴涛,方纯昌. 利用声波时差资料研究欠压实浓度盖层抑制浓度封闭作用形成时期及其研究意义. 石油地球物理勘探,2001,36(3): 279~284 [Fu Guang, Wang Xingtao, Fang Chunchang. Determining forming period of restrained seal action of undercompacted concentration caprock by using interval travel time data and its research meaning. OGP, 2001, 36(3): 279~284]
- 付晓泰,王振平,卢双舫. 气体在水中的热解机理及溶解度方程. 中国科学(B辑),1996,26(2): 124~130 [Fu Xiaotai, Wang Zhenping, Lu Shuangfang. The dissolving mechanism and dissolving equation of gas in water. Science in China (Series B), 1996, 26(2): 124~130]
- 吕延防,付广,高大岭,等. 油气藏封盖研究. 北京:石油工业出版社,1996. 4~30 [Lv Yanfang, Fu Guang, Gao Daling et al. Research on Seal of Oil-gas Reservoirs. Beijing: Petroleum Industrial Press, 1996. 4~30]
- 付广,吕延防,杨勉,等. 超压泥岩盖层封闭油气机理的新认识. 见:宋岩,魏国齐,洪峰,等. 天然气地质研究与应用. 北京:石油工业出版社,2000. 219~223 [Fu Guang, Lv Yanfang, Yang Mian et al. New understanding of seal oil-gas mechanism of overpressured mudstone caprock. In Song Yan, Wei Guoqi et al. eds. Research and Application of Gas Geology. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000. 219~223]
- 张义纲. 天然气生成聚集与保存. 南京:海河大学出版社,1991. 138~148 [Zhang Yigang. Gas Generation, Accumulation and Preservation. Nanjing: Hhai University Press, 1991. 138~148]

8 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. 石油地球物理勘探, 1998, 33(6): 812~820 [Fu Guang, Zhang Faqiang. A method for analyzing the palaeo-pressure

sealing ability of poorly compacted shale barrier with the use of acoustic logging data. OGP, 1998, 33(6): 812~818]

Recovering to Formation and Evolution of Restraining Concentration Seal of Mudstone Caprock and Its Significance

FU Guang SU Yu-ping

(Daqing Petroleum Institute, Daqing Heilongjiang 163318)

Abstract Based on the analysis of restraining concentration seal mechanism of mudstone caprock and its formation conditions, by studying formation and evolution law of abnormal pore fluid pressure, this paper tries to study formation and evolution of restraining concentration seal of mudstone caprock. According to the formation and evolution of abnormal pore fluid pressure, this paper has established a method recovering and forecasting the formation and evolution law of abnormal gas-bearing concentration. This method can not only recover the formation period of restraining concentration seal of mudstone caprock, but also forecast its evolution process, in the meantime, determine the present evolution stage of restraining concentration seal. The method was applied in recovering and forecasting the evolution of restraining concentration seal of K_1qn and $K_{1n_{1+2}}$ mudstone of Well Gu11 in Gubng sag of Songliao Basin. The results are in accordance with the actual geological conditions, which indicates that the method is practical to study the formation and evolution of restraining concentration seal of mudstone caprock and the method is effective.

Key words mudstone caprock, restraining concentration seal, evolution, abnormal pore fluid pressure, formation, recovering, forecasting