

异常高压区的古沉积厚度和 古地层压力恢复方法探讨

刘福宁

(南海西部石油公司研究院, 广东湛江 524057)

古沉积厚度和古地层压力的恢复是研究沉积盆地发育史、排烃史、油气运移聚集历史的一个极为重要的方面。本文从QDN盆地泥岩声波时差资料出发,用泥岩压实的不可逆原理,建立单层组地层的孔隙度-深度,孔隙度-时间的正常压实趋势线,推导出了一套适用于异常高压区的古厚度和古地层压力恢复的方法。并利用此方法分析了该区异常地层压力形成机制、时间,以及油气运移聚集条件。

关键词 异常高压 古沉积厚度 古地层压力

作者简介 刘福宁 男 29岁 工程师(硕士) 石油地质

古沉积厚度和古压力的恢复是盆地发育史、排烃史、油气运移聚集历史研究的重要环节。过去许多人在古厚度恢复时,用浅部地层的正常压实趋势线来分析深部不同时代、不同物源、不同沉积环境的地层压实情况,特别是在异常高压区,这种方法势必造成误差。本文用泥岩声波时差资料,从泥岩压实的不可逆原理出发,建立单个地层组的孔隙度与深度、孔隙度与沉积时间的正常压实趋势线,用反剥离的方法探讨异常高压区的古沉积厚度和古地层压力的恢复方法。

一、基本原理及方法

(一) 基本原理

用剥离的方法把某一地层现今的厚度和地层压力恢复到沉积时或埋藏中途某一时刻的厚度和压力。在盆地演化过程中,由于上覆岩层的增加,地层的孔隙度和厚度就减小。在整个盆地的发育过程中,理想地认为岩石颗粒体积基本保持不变(由于岩石的压缩系数较小),地层厚度的变化主要通过孔隙流体体积及孔隙度的变化来实现。

假设地层中岩石颗粒与孔隙流体可以彼此分离,即图1 L₂层中单位横截面积的地层柱内孔隙流体的总厚度W,和岩石颗粒的总厚度S_r就可表示为:

$$W = \int_{z_1}^{z_2} \phi_i dz$$

$$S_g = \int_{z_1}^{z_2} (1 - \phi_i) \cdot dz$$

ϕ_i 为 z_1 到 z_2 深度段内各点的孔隙度值。

当顶部地层 L_3 被剥去后, 整个下伏地层恢复到地层 L_2 沉积末期的厚度。由于上覆岩层压力减小, 地层恢复后增加的厚度主要是靠孔隙度的增加来实现。恢复后 L_2 地层各点的孔隙度变为 ϕ'_i , 其单位横截面地层柱内的岩石颗粒的总厚度为 S'_g :

$$S'_g = \int_{z'_1}^{z'_2} (1 - \phi'_i) dz$$

由于岩石颗粒的压缩系数较小, 恢复前后 L_2 地层岩石颗粒的总厚度不变:

$$S_g = S'_g$$

$$\text{即} \quad \int_{z_1}^{z_2} (1 - \phi_i) dz = \int_{z'_1}^{z'_2} (1 - \phi'_i) dz \quad (1)$$

解其方程 (1), 就可以恢复出各点的古埋深。

(二) 正常压实趋势线的建立

在古沉积厚度和古地层压力恢复中, 关键是建立比较准确的正常孔隙度压实趋势线。过去许多人只用单井垂向上的孔隙度压实趋势线, 因而出现了用浅部地层的孔隙度压实趋势去衡量深部不同物源、不同沉积时代、不同沉积速率的下伏地层压实的情况, 势必造成很大的误差。

一般情况下, 埋深越大, 孔隙度越小; 时代越老, 孔隙度也越小。因此笔者在古厚度和古压力恢复过程中, 假设时间和深度两因素彼此可以分离, 从而分别建立深度-孔隙度, 时间-孔隙度的正常压实趋势线。

1. 深度-孔隙度压实趋势线的建立

在 QDN 盆地研究中, 笔者选取了多口井 (从盆地边缘到中心) 的每个层组, 属于正常地层压力、水饱和、电性特征比较相似的厚层泥岩的声波时差资料, 根据声波地层因子的方法^[1]:

$$\phi = 1 - \left(\frac{\Delta t_{ma}}{\Delta t} \right)^{1/1.6} \quad (2)$$

将声波时差资料换算成孔隙度, 回归出现代单组地层孔隙度-深度的正常趋势方程为: $\phi = \phi_0 e^{-Kz}$ 。 ϕ 为孔隙度, ϕ_0 为地表孔隙度, K 为压实系数, z 为埋深, e 为自然对数的底, Δt 为实际地层的声波时差, Δt_{ma} 为岩石的骨架时差。表 1 是不同沉积时期不同地层的孔隙度-深度的正常压实趋势方程的系数。

· 单层组地层的正常压实趋势线, 尽可能地减小了不同时代、不同物源、不同沉积速率等因素对声波时差资料的影响, 即用同一时代同一物源的地层孔隙度随深度变化趋势去衡量同时代、同物源不同深度地层的压实情况。用此方法根据等效深度法计算的泥岩地层压力, 与邻层实测砂岩压力变化趋势基本一致 (图 2), 两者的绝对误差基本在 3 MPa 左右。

2. 孔隙度-时间正常压实趋势线的建立

笔者统计了该区等深度、电性特征相似的、不同层位厚泥岩的声波时差, 发现其时间因

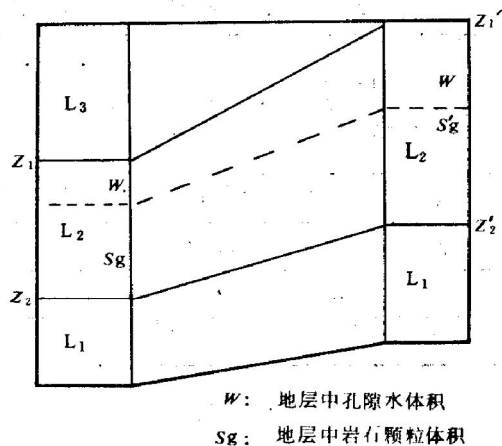


图 1 古厚度恢复的原理

表1 不同沉积时期不同地层正常的孔隙度-深度压实趋势方程 ($\phi = \phi_0 e^{-Kz}$) 的系数值

时代 地层	Q		N_{A+P}		N_m		N_s		E_t	
	ϕ_0	$K (10^{-4})$	ϕ_0	$K (10^{-4})$	ϕ_0	$K (10^{-4})$	ϕ_0	$K (10^{-4})$	ϕ_0	$K (10^{-4})$
Q	54.9	2.744								
N_{A+P}	53.5	2.791	54.3	2.791						
N_m	51.9	2.932	52.7	2.932	54.9	2.932				
N_s	50.4	3.032	51.3	3.032	53.63	3.032	55.6	3.032		
E_t	48.7	3.416	49.6	3.416	51.9	3.416	54.1	3.416	55.7	3.416

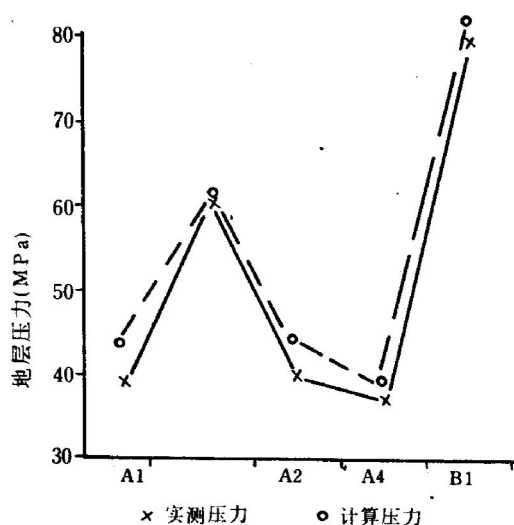


图2 实测砂岩压力与用单层压实趋势方程计算的泥岩压力对比图

子对声波时差的影响可以用方程 (3) 表示:

$$\Delta t_{T_1} = \Delta t_{T_2} \cdot e^{K_t(T_2 - T_1)} \quad (3)$$

$\Delta t_{T_1}, \Delta t_{T_2}$ —— T_1, T_2 沉积时间的声波时差; T_1, T_2 ——沉积时间 (Ma), K_t ——时间压实系数, 本区为 $K_t = 0.01072$ 。

根据方程 (2)、(3) 可以推导出孔隙度-时间压实趋势方程:

$$\phi_{T_1} = 1 - \frac{1 - \phi_{T_2}}{e^{[K_t(T_2 - T_1)]/1.6}} \quad (4)$$

ϕ_{T_1}, ϕ_{T_2} —— T_1, T_2 时等深度的孔隙度值。

在古沉积厚度和古地层压力恢复中, 每剥掉 L_3 , 同时也应剥掉沉积 L_3 所用的时间 ΔT 值, 即首先用时间-孔隙度压实趋势方程恢复时间因子所起的压实作用, 然后再用深度-孔隙度压实趋势方程进行古厚度和古压力的恢复。

(三) 具体方法

在正常压实条件下, 恢复前后的孔隙度变化基本上符合于各组各时期的正常压实趋势方程, 用方程 (1) 就可以恢复出各期的古厚度。恢复前后的地层压力也基本上为正常地层压力:

$$P = \rho_w \cdot g \cdot Z$$

式中: P ——地层压力 (Pa), ρ_w ——地层水的密度 (kg/m^3), Z ——埋深 (m), g ——重力加速度 (m/s^2)。

在异常高压区, 由于压实与排液不均衡的作用, 孔隙流体不得不支撑上覆岩层的部分压力, 地层的孔隙度也偏离了正常压实趋势线。根据泥岩压实的不可逆原理^[3], 图3中高压泥岩 X_1 的压实历史不可能是 $N-M-B-X_1$ 曲线所表示的轨迹, 而可能是 $N-X_{ci}-X_1$ 所表示的路线。即 X_1 泥岩埋深到等效深度 X_{ci} 处时, 孔隙流体排出受阻, 孔隙度不再变小, 地层开始形成异常高压 (欠压实), 并一直深埋到 X_1 处。由于压实过程中流体不可能一点不排出, 孔隙度也不可能一点不减小, 实际上 X_1 泥岩的压实历史很可能是以极缓的斜率由 N 到 X_1 。为了计算和分析方便, 这里以不排液的极端情况来表示。图3中, X_1 点的等效深度 X_{ci} 可以用:

$$X_{ci} = X_1 - \Delta X_1 = X_1 - \left[\frac{1}{K} \ln \left(\frac{\phi_1}{\phi} \right) \right]$$

ϕ_i 为 X_i 点的实际孔隙度, Φ 为该时期该地层的孔隙度趋势值 $\Phi = \Phi_0 e^{-\kappa z}$ 。

根据等效深度法^[4] X_i 点的实际地层压力:

$$P = \rho_w \cdot g \cdot X_i + (\rho_b - \rho_w) \cdot g \cdot \frac{1}{K} \cdot$$

$$\ln \left(\frac{\phi_i}{\Phi} \right)$$

ρ_b 为岩石的平均密度 (kg/m^3), P 为地层实际压力值 (Pa)。

图3中当上覆地层剥去 L_3 后, X_i 点恢复到 X'_i 点。如果 $X_i - X'_i < \Delta X_i$, 说明恢复后的 X'_i 点还位于异常高压的深度范围内, 其上覆 $\Delta X'_i$ 厚的岩层压力继续被 X'_i 地层的孔隙流体所支撑。根据泥岩压实的不可逆原理可知, X'_i 点在 L_3 厚度剥离前后孔隙度基本保持不变, 即

$$\phi'_i = \phi_i$$

当 $X_i - X'_i \geq \Delta X_i$ 时, 图3中的B点已基本恢复到正常压实范围内, 其孔隙度应满足恢复后沉积时期本组的正常压实方程:

$$\phi'_i = \Phi_0 \cdot e^{-\kappa X'_i}$$

经整理, 恢复后的古厚度 $X'_i - X'_{i-1}$ 为:

$$\begin{cases} X'_i - X'_{i-1} = (X_i - X_{i-1}) - \int_{X_{i-1}}^{X_i} \phi_i dz + \int_{X'_{i-1}}^{X'_i} \Phi_0 e^{-\kappa X'_i} dz & (X_i - X'_i \geq \Delta X_i) \\ X'_i - X'_{i-1} = X_i - X_{i-1} - \int_{X_{i-1}}^{X_i} \phi_i dz + \int_{X'_{i-1}}^{X'_i} \phi_i dz & (X_i - X'_i < \Delta X_i) \end{cases}$$

恢复后各层的古压力 P' 可表示为:

$$\begin{cases} P' = \rho_w \cdot g \cdot X'_i + (\rho_b - \rho_w) \cdot g \cdot \frac{1}{K} \cdot \ln \left(\frac{\phi'_i}{\Phi} \right) & (X_i - X'_i < \Delta X_i) \\ P' = \rho_w \cdot g \cdot X'_i & (X_i - X'_i \geq \Delta X_i) \end{cases}$$

三、应 用

QDN 盆地是一个新生代沉积盆地, 其下第三系普遍发育着异常高压, 笔者用上述方法以 D1 井为例对各层进行了古沉积厚度、古压力恢复。并用恢复后的结果分析了下第三系 E_i 组异常地层压力的形成时间以及油气运移聚集条件。

表2是经过恢复后 D1 井不同时期各层的埋深及沉积速率, 图4A是 D1 井现代的地层压力剖面, 图4B是 N_{4+3} 沉积末期的地层压力剖面, 图4C是 N_4 末期的地层压力剖面。

从以上结果来看, 本区下第三系 E_i 组的异常地层压力主要是在晚中新世-上新世时 (N_{4+3}) 盆地快速下沉, 以 333.4 m/Ma 的速率沉积了一套半深海相泥岩为主的地层, E_i 地层

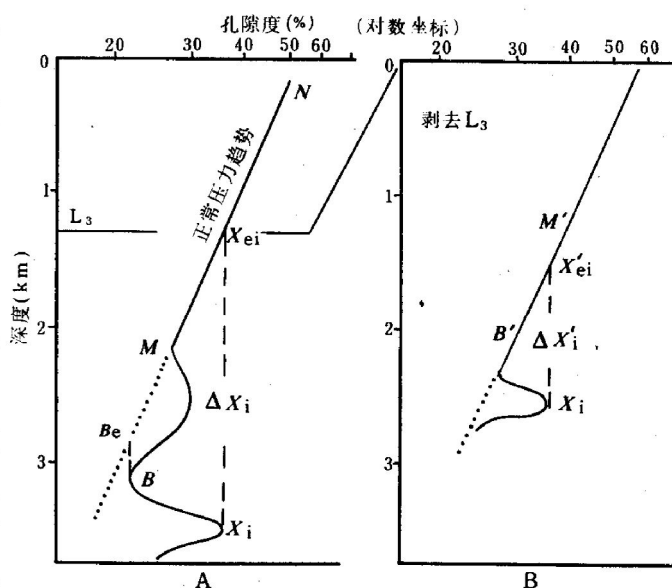


图3 高压泥岩压实历史示意图

A图: 现代孔隙度压实曲线, B图: 剥去 L_3 地层后的孔隙度压实曲线

被快速压实, 且与排液作用不能均衡, 形成了该区 E_1 组区域性的异常高压。根据地化指标, 本区烃类成熟门限深度在 3200m 左右, 从表 2 和图 4 可见, 梅山组沉积末期, E_1 组底面深只有 1860m, 远没有达到烃类成熟门限, 在 N_{h+y} 沉积期间, E_1 组逐渐达到成熟门限, 并且大量的生烃 (E_1 组是本区主要的烃源岩)。

表 2 D1 井不同沉积时期各地层埋深及沉积速率

时代 地层	Q		N _{h+y}		N _m		N _s		E ₁	
	底深	厚度	底深	厚度	底深	厚度	底深	厚度	底深	厚度
Q	1802		2334		580		933		719	
N _{h+y}	3708	1906								
N _m	4023	315	2720	386						
N _s	4571	548	3305	585	1349	769				
E ₁	4999	428	3738	433	1860	514	1491	558		
沉积速率 (m/Ma)	634.6		333.4		86.6		155.5		205.4	

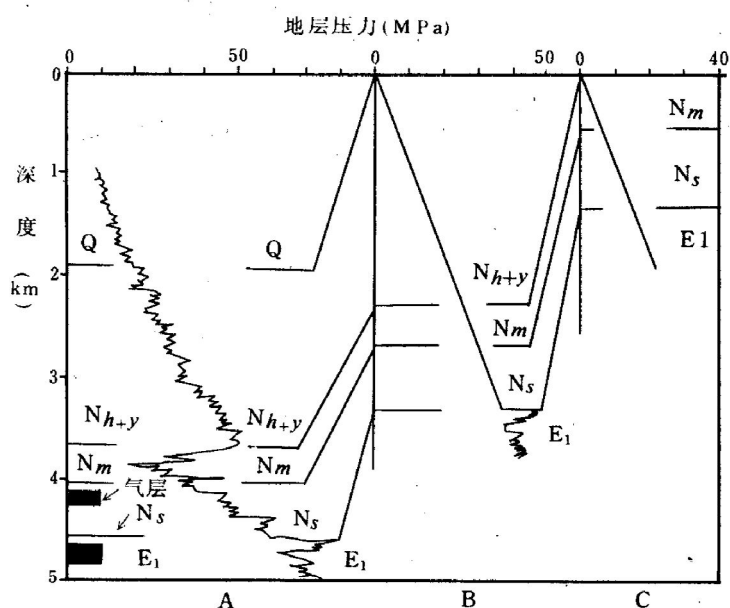


图 4 D1 井不同沉积时期的地层压力剖面图

A—现今地层压力剖面图, B— N_{h+y} 沉积末期地层压力剖面图,

C— N_m 沉积末期地层压力剖面图

N_{h+y} 沉积期间, E_1 组不仅大量生烃而且也形成了区域性的异常高压。异常高压形成时间和烃类大量生成时间相互配合, 为烃类从母岩中排出提供了必要的动力。油气从母岩中排出后, 在水动力和浮力的作用下, 向低水动力势方向运移, 并聚集在临近的低水动力势圈闭中^[2], 如图 4A 中低水动力势的 E_1 组气层。同时, 在 N_{h+y} 时期, E_1 组顶部形成的极高的异常高压泥岩具有很好的封闭作用, 为本时期油气聚集提供了盖层条件。

在晚中新世-上新世 (N_{h+y}) 时, 下伏的 N_s 、 N_m 组基本上没有达到成熟门限, 不可能大量的生烃, 而且它们的地层压力基本上保持静水柱压力。

第四纪 (Q) 时, 由于整个盆地进一步快速下沉, 以 634.6m/Ma 的速率沉积

了半深海相泥岩。此期间 E_1 组已形成的异常高压还没有及时失效, 再次遭受快速的压实作用, 使 E_1 的孔隙流体压力进一步升高。

第四纪期间, N_s 、 N_m 以及部分的 N_{h+y} 地层由于快速压实作用和排液不均衡, 也形成了异常高压, 同时达到生烃门限的地层开始生烃, 生成的烃类运移出母岩, 并聚集在纵向上的低势区, 如图 4A 中的 N_s 气层。

四、结 论

(1) 在古沉积厚度和古地层压力的恢复中,关键是建立比较准确的孔隙度压实趋势线。对于不同物源、不同时代、不同沉积环境的地层建立单层的深度-孔隙度压实趋势线和剖面上的时间-孔隙度压实趋势线。

(2) 从泥岩压实的不可逆原理出发,推导出了一套适应于异常高压区的古厚度、古地层压力恢复方法。

参 考 文 献

1. Raiga - Clemenceau J. The Concept of acoustic formation factor for more accurate Porosity determination from sonic transit time data. *Log Analyst* 1988, (1): 54—59
2. Hunt J M, Generation and migration of petroleum from abnormally pressure fluid compartments. *AAPG Bull.* 1990, 74 (1), 1—12
3. 李明诚. 石油与天然气运移. 北京: 石油工业出版社, 1987, 236—242
4. 真柄钦次. 压实与流体运移. 陈荷立等译. 北京: 石油工业出版社, 1981. 41—70

AN APPROACH TO RECONSTRUCTION OF PALEO-SEDIMENTARY THICKNESS AND PALEO-FORMATION PRESSURE IN ABNORMAL HIGH PRESSURE REGION

Liu Funing

(Nanhai West oil Corporation, Zhanjiang, Guangdong)

Abstract

The reconstruction of paleo-sedimentary thickness and paleo-formation pressure is very important indeed in studying the history of the basin's evolution, hydrocarbon exploration, migration and accumulation. According to the data of mudstone coustic time of DN Basin, normal-compaction trend lines of single formation pore-depth and pore-time were set up by application of mudstone compaction irreversible principle, and the reconstruction method of paleo-sedimentary thickness and paleo-formation pressure in a abnormal high pressure region was derived in this paper. Finally the author used this method to analyse the mechanism and time of the pressure formation and the condition of hydrocarbon accumulation and migration.