

文章编号: 1001-6112(2000)01-0059-05

盐湖盆地的古厚度恢复

李兰斌¹, 孙家振¹, 陈钟惠¹, 陈文礼², 赵全民², 肖 学²

(1. 中国地质大学资源学院, 武汉 430074; 2. 河南石油勘探局研究院, 南阳 4731432)

摘要: 本文针对盐湖盆地地层结构特点, 采用一种沉积物厚度去压实(古厚度计算)的改进算法, 考虑了由剥蚀作用、盐运动及互层引起的厚度和埋深变化。根据岩层现今厚度、岩性、剥蚀厚度、异常压实及盐层厚度的变化, 计算各地层时代末期的古厚度。这将为准确进行盐湖盆地埋藏史分析, 构造演化分析提供重要途径。

关键词: 盐湖盆地; 盐运动; 互层; 岩性比例; 地层古厚度

中图分类号: TE121.1

文献标识码: A

沉积地层的古厚度是研究盆地演化过程中的一个重要参数。古厚度的恢复常采用回剥反演法。由现今厚度逐层回剥反演计算古厚度, 即常说的“去压实校正”。假设前提是孔隙流体能够快速排泄以保持压实平衡(即无过量的孔隙流体压力)。在这种情况下, 一特定岩石的压实可用孔隙度与岩石静态压力的关系(忽略不同岩性密度的影响)或孔隙度和深度之间的关系来表示, 例如

$$\Phi(z) = \Phi_0 e^{-Cz}$$

式中, Φ_0 为初始孔隙度, C 为压实常数。

通常的古厚度恢复实际算法是基于在压实过程中岩层的骨架厚度保持不变的假设。此外还假设基底稳定下沉, 地层连续沉积, 且除压实作用外没有其他导致厚度变化的原因。显然实际过程中这一基本算法不够全面。还应该考虑异常孔隙流体压力, 地层的抬升和剥蚀, 薄互层地层结构, 沉积物胶结, 盐运动及盐层压实厚度不变和流变等的影响^[2]。本文针对盐湖盆地盐泥韵律特定地层结构及盐体运动特点, 采用改进的数学模型进行古厚度计算。这对无正确确定盐湖盆地沉降中心及其迁移, 研究古构造的形成与发展, 判断古隆起等都极其重要。

1 基本算法

岩层的骨架厚度是指颗粒物质部分的厚度。设一岩层的现今厚度为 T_0 , 其深度为 D_0 , 孔隙度-深度关系为 $\Phi(z)$, 则其骨架厚度可由下式求得:

$$H = \int_{D_0}^{D_0+T_0} (1 - \Phi(z)) dz$$

式中 H 为骨架厚度, z 为深度。

如果忽略矿物成岩作用和目的层物质的带入和带出, 据压实原理(即压实期间骨架厚度保持不变), 岩层在埋深 D_N 的古厚度 T_N 可通过解下面方程求出:

$$f(T_N) = \int_{D_N}^{D_N+T_N} (1 - \Phi(z)) dz - H = 0$$

若

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-Cz)$$

则有:

$$\begin{aligned} T_0 + \frac{\Phi_0}{C} \exp(-CD_0) [\exp(-CT_0) - 1] \\ = T_N + \frac{\Phi_0}{C} \exp(-CD_N) [\exp(CT_N) - 1] \end{aligned}$$

收稿日期: 1998-07-08.

作者简介: 李兰斌(1964-), 女, 湖南人, 在职博士, 主要从事地震地质及沉积盆地分析的教学及科研工作.

显然,此方程无法得到解析解。但可采用牛顿迭代法快速得到满足精度的数值解。将上式写成:

$$T_N = T_0 + \frac{\Phi}{C} \exp(-CD_0) [\exp(-CT_0) - 1] - \frac{\Phi}{C} \exp(-CD_N) [\exp(-CT_N) - 1]$$

定一个初值 $T_N^{(0)}$ 值,代入上式,可计算出一个 $T_N^{(1)}$ 值,将 $T_N^{(1)}$ 值再代入上式右边,计算得出 $T_N^{(2)}$ 值,……,逐次迭代得到 $T_N^{(1)}, T_N^{(2)}, T_N^{(3)}, \dots, T_N^{(k)}, T_N^{(k+1)}$,直到 $T_N^{(k+1)} - T_N^{(k)}$ 小于给定误差时为止。可取 $T_N = T_N^{(k)}$ 即为所求的古厚度(原始沉积厚度)。

在上式计算中,仅需 Φ, C 两个参数,因此,正常压实情况下,利用上式求 T_N 值可以克服地层中点的 Φ 值来代替大套地区的 Φ 值而计算精度不高的缺点。对一套地层自顶到底逐层用此算法进行回剥(古厚度的加和)能够获得一古厚度矩阵,即每一岩层在每一地层单元末期的厚度。

2 剥蚀厚度的计算

如果出现明显的抬升和剥蚀。基本算法就不适用。通常认为压实作用是不可逆的变形,所以当地层抬升(即负荷减少)时孔隙度保持不变。因此,在一次抬升剥蚀事件之后,原有的孔隙度-深度关系对于剥蚀层及其以下地层不再适用,而应保持其历史中最大埋深时的孔隙度-深度关系。如果在事件 j 时层 i 的一部分被剥蚀,这部分厚度则应根据相应的资料计算出并加到时间 j 的古厚度中,以得到时间 $j-1$ 处的古厚度。剥蚀厚度的计算方法较多^[3],可利用古地温梯度资料计算,或外推地震反射资料法,或测井资料推测泥岩压实作用法进行回剥量计算^[4]。

如果剥蚀作用是局限在一个局部地区,可以用地震剖面估算剥蚀厚度,如图 1 所示,构造顶部地层 C 组的大部分已经被剥蚀。估计剥蚀厚度的最普通方法是平行于 B(C 组的底)画一条 A 线,并测量 A 与剥蚀面的距离。这个方法假设 C 组在剥蚀前厚度是均一的,但对于同沉积构造地层向着构造顶部可能会减薄。因此有理由假定,在大多数情况下在重要的隆起和剥蚀发生之前沉积速率减慢。这种减薄需要通过解释多条地震剖面予以证实。

利用测井资料估算剥蚀厚度常采用 Magara

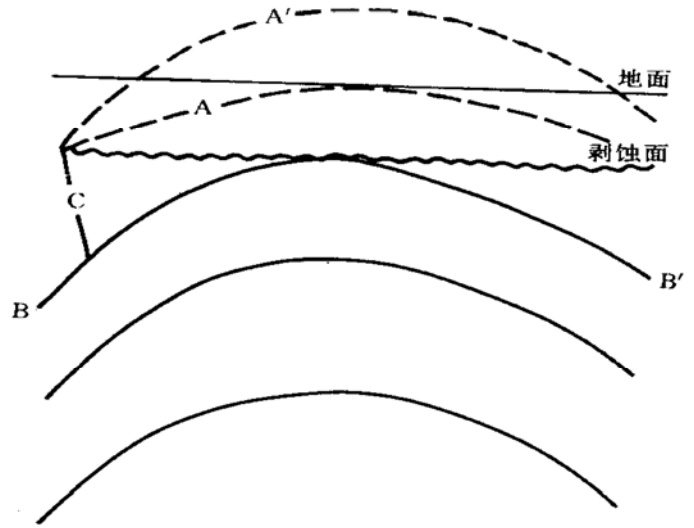


图 1 局部剥蚀作用的概略图(据 Magara, 1976)

Fig. 1 Model of partial erosion

(1976) 提出的泥岩压实外推法。对大多数沉积盆地,静水压力通常发育在较浅深度。所以,如果在一个地区的静水压力带内给定深度的泥岩层,其压实程度明显大于另一个没有剥蚀地区同样深度的泥岩层,则认为前一地区在地质历史中埋藏更深,并由于剥蚀而失去一部分最上部地层。许多沉积盆地较浅层段内,泥岩传播时间的对数与埋深之间的关系可以用直线来表示(图 2a)。这些层段内的孔隙压力已知是接近静水压力的。在没有大的剥蚀情况下,将这个正常压实趋势外推到地面,便得出地面传播时间值 Δt_0 (图 2a)。另一方面,图 2b 是沉积序列最上部已被

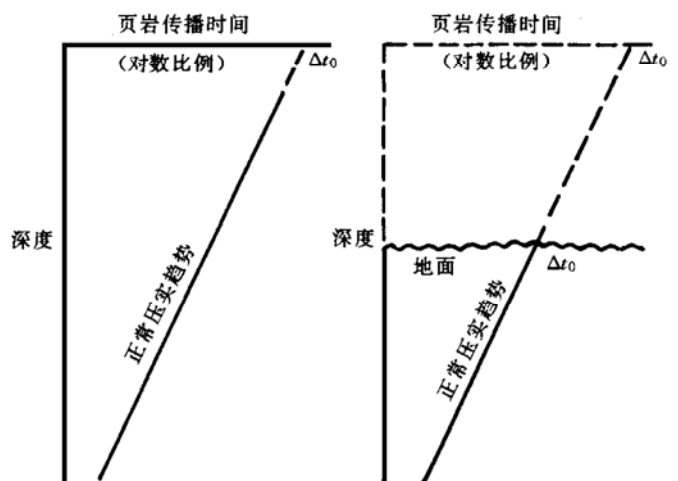


图 2 正常压实泥岩声波时差-深度曲线(据 Magara, 1976)

a. 无剥蚀作用; b. 有剥蚀作用

Fig. 2 A curve of interval transit time and depth for mudstones under normal compaction

a. without erosion; b. with erosion

剥蚀掉的地区传播时间-深度图的概略例子。如果把地下的正常压实趋势外推到现今地面, 则地面传播时间值(Δt_0)将小于未剥蚀情况下的地面传播时间值(Δt_0)。如果把正常压实趋势进一步外推到 Δt_0 , 就能够确定沉积地层的最初地面(图 2b)。在现今地面与外推值为利用测井资料估算剥蚀厚度常采用 Δt_0 的水平面间距离就是大致的剥蚀厚度。这种方法在地层连续剥蚀时不适用。综合地震和测井两种资料及计算方法可较为准确地确定地层剥蚀量。

3 异常压实校正

地层处于欠压实状态时, 孔隙度不再满足上述压实方程, 处理的方法是利用测井资料或地震速度确定欠压实层段及其孔隙度-深度关系曲线 $\Phi'(z)$, 首先以欠压实状态进行古厚度恢复(求 T'_N), 即求解方程

$$f(T'_N) = \int_{b_N}^{b_N+T'_N} (1 - \Phi'(z)) dz - \int_{b_0}^{b_0+T'_0} (1 - \Phi(z)) dz = 0$$

然后将其恢复到正常压实状态, 即求解方程

$$f(T_N) = \int_{b_N}^{b_N+T_N} (1 - \Phi(z)) dz - \int_{b_N}^{b_N+T_N} (1 - \Phi(z)) dz = 0$$

4 盐运动的处理

舞阳凹陷核二上段和核一段为盐岩发育段, 主要为一套岩盐和深灰色泥岩、泥膏岩、膏盐岩不等厚互层。岩石类型中碎屑岩密度由浅至深逐渐变大, 而石盐岩密度由浅至深保持不变, 通过统计舞阳凹陷数口井盐岩密度, 盐岩密度保持在 2.1 kg/cm^3 , 900m 以上盐岩密度大于泥岩密度, 从井深 900m 开始与碎屑岩发生密度倒转。德国化学家曾对盐岩的塑性做过研究, 随着温度及压力的增高, 盐岩的塑性增强, 当盐岩埋深到 500m 时, 即可达到盐的软化点; 当盐岩埋深到 3000m 时, 流动性极强。Jackson^[2]等甚至指出, 许多盐构造在上覆层不足 400m 时就开始了。盐岩的密度倒转及塑性流动引起的盐层厚度的变化, 对地层的压实有很大影响, 当其厚度减小的幅度大于同沉积调节的厚度时, 下伏地层的深度减小。因此必须计算盐运动引起的地层厚度变化。

对舞阳凹陷盐构造形成机制初步研究认为, 它主要受区域拉张作用控制影响, 同时受密度倒转, 差

异负载等因素影响。确定盐运动引起地层的厚度变化应综合分析盐埋藏深度, 盐运动时期及运动速度^[5]。

地层古厚度恢复计算中考虑盐层厚度变化, 不仅是算法优于传统方法, 而且是盐湖盆地地层古厚度恢复所必须的。

5 互层的处理

通常以均匀大套地层进行回剥量计算的算法显然不适应砂泥薄互层, 尤其是盐泥互层的地层模型, 修正的方法是对互层进行处理^[1]。假设一互层的现今厚度为 T_0 , 最大埋深 D_{\max} , 且由 n 个子层组成, 这些子层均为基本岩性(如盐岩, 砂岩, 泥岩, 膏泥岩, ...), 它们的厚度比例为:

$$\rho_1^0, \rho_2^0, \dots, \rho_n^0, \sum_{i=1}^n \rho_i^0 = 1$$

每种岩性的孔隙度-深度关系表述为: $\Phi = \Phi(z)$ 这种岩层的压实特性与各子层的排列顺序有关, 可以综合利用钻井, 测井或地震岩性反演剖面获取各子层的排列顺序。但通常这种顺序难以得到或不予考虑。可以假设各种岩性是均质的, 即大套地层的每一部位具有相同的岩性比例。第 i 种岩层的厚度由下式给出:

$$H_i = \rho_i^0 \int_{b_{\max}}^{b_{\max}+T_0} (1 - \Phi(z)) dz$$

压实期间这些骨架厚度仍保持不变, 但比例 ρ_i 却在变化, 因为不同岩性的压实特性不同, 为计算古深度 D_N 处的古厚度 T_N , 有 $n+1$ 个方程来确定 $n+1$ 个未知数: $T_N, \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$, 即

$$f_i = \rho_i \int_{b_N}^{b_N+T_N} (1 - \Phi(z)) dz - H_i = 0$$

$$f_{n+1} = \sum_{i=1}^n \rho_i - 1 = 0$$

引入雅可比(Jacobi)矩阵并建立向量函数, 用广义牛顿迭代法求解此方程组便可得到古厚度 T_N 及其各种岩性的“古比例” $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ 。

6 实例

表 1 为舞阳凹陷 WC3 井现今地层岩性数据。正常压实时

砂岩孔隙度 $\Phi = 0.392 \exp(-0.000365z)$;

泥岩孔隙度 $\Phi = 0.66 \exp(-0.000867z)$;

盐岩(膏岩)孔隙度基本保持不变。

声波测井资料揭示 H_2^1 、 H_3 段地层为欠压实状态: $\Phi' = 0.54 \exp(-0.000672z)$ 由地震资料解释确定 WC3 位于 YX 盐丘西南边, 采用平滑方法确定 N 沉积期盐丘自北北东方向南运动, 使 WC3 井 H_1 地层盐层增厚 12m, H_2^1 盐层增厚 9m。综合地震和测井资料确定 EL 沉积期地层剥蚀厚度为 387m。最终回剥计算结果如图 3 所示。结果显示, 盐层厚度可以增加或减少, 各地层中岩性比例是变化的, 如表 2 所示为 H_2^1 地层各沉积末期岩性古比例。

7 结论

本文采用改进的古厚度计算方法, 与已有算法的不同之处在于考虑剥蚀、盐运动及互层的影响。盐岩层随深度的增加, 密度和体积保持不变, 盐运动使地层厚度增加或减少; 互层作为一种混合岩性处理, 沉降期间岩性的比例是变化的; 压实阶段起重要作用

表 1 WC3 井现今地层岩性数据表

Table 1 Present stratum thickness and lithologic proportion for well WC3

层位	厚度/m	各岩性含量/%		
		砂岩	泥岩	盐岩
Q	200		100	
N	193.5		100	
EL	707.5	50	50	
H_1	551		35	65
H_2^1	615	6	49	45
H_2^2	523	48	52	
H_3	815	34	66	

表 2 H_2^1 地层各时期岩性比例(%)

Table 2 Lithologic proportion in various period for well WC3

岩性	Q	N	EL	H_1	H_2^1
砂岩	6	6	5.9	6.3	6.4
泥岩	49	49.3	49.9	52.3	54.7
盐岩	45	44.7	44.2	41.4	38.9

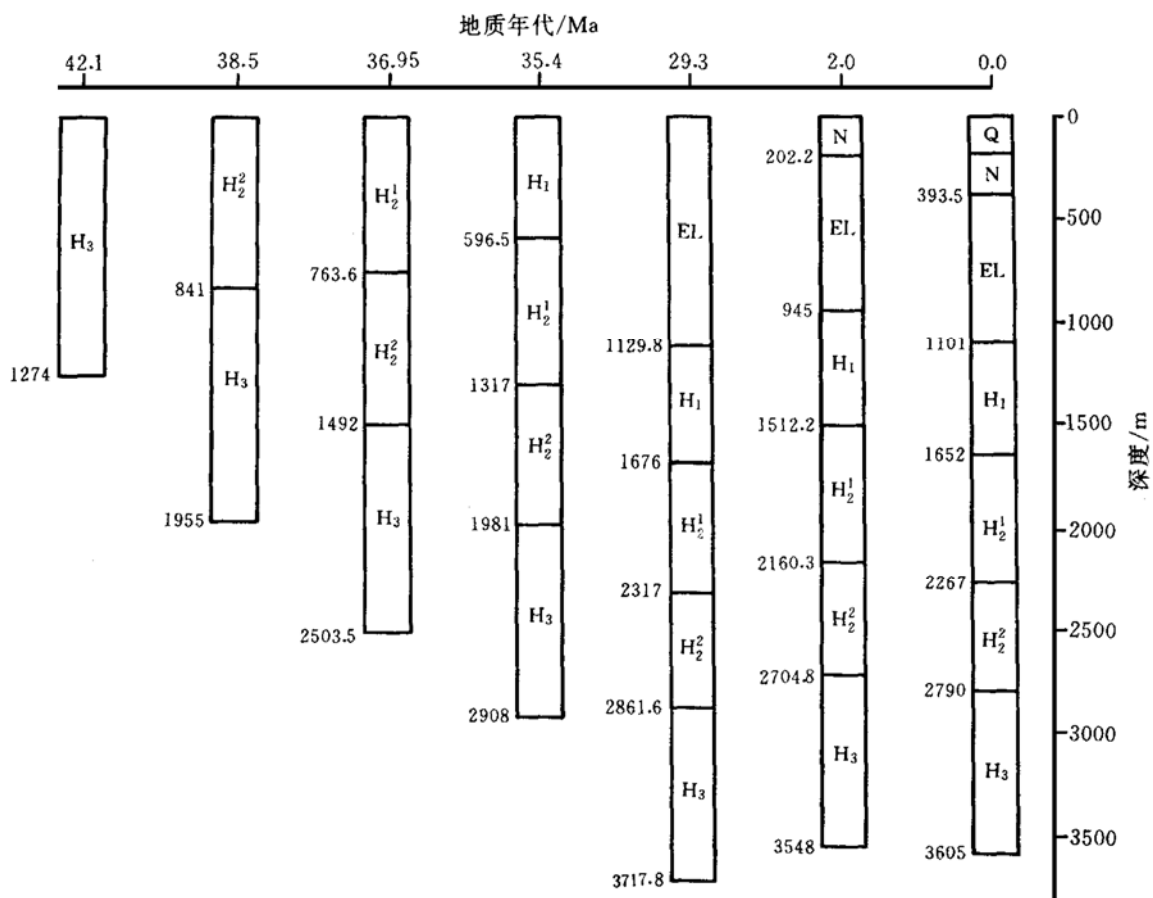


图 3 WC3 井古厚度恢复计算实例

Fig. 3 Backstripping inversion of original stratum thickness for well WC3

用的是最大埋深, 而不是现今深度。实例计算说明这种改进古厚度恢复计算方法是可行的, 这对正确分析盐湖盆地埋藏史、构造演化史具有重要意义。

参考文献:

[1] J Springer. Decompaction and backstripping with regard to erosion, salt movement, and interlayered bedding [J]. *Computer & Geosciences*, 1991, 19(8).

- [2] Jackson M P A, et al. Regional extension as a geologic trigger for diapirism [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1994, 106(8).
- [3] 李伟. 恢复地层剥蚀厚度方法综述[J]. *中国海上油气*, 1996, 10(3).
- [4] 真柄钦次. 石油圈闭的地质模型[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991.
- [5] 戈红星. 文留盐构造成因与掩埋机制[J]. *石油学报*, 1997, 18(2).

BACKSTRIPPING INVERSION OF ORIGINAL STRATUM THICKNESS IN A SALT BASIN

LI Lan-bin¹, SUN Jia-zhen¹, CHEN Zhong-hui, CHEN Wen-li², ZHAO Quan-min², XIAO Xue²

(1. *China University of Geoscience, Wuhan 430074, China;*

2. Henan Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Nanyang 473132, China)

Abstract: An improved backstripping inversion method of original stratum thickness was applied to Wuyang salt basin. The method considered erosion, salt movement, interlayered bedding, and abnormal compaction in the basin. By using this method we can calculate the original stratum thickness and lithologic proportion in every sedimentary telophase based on nowadays stratum thickness, lithologic proportion, abnormal compaction, and salt thickness, which is very important to embedding history analysis and tectonic evolution analysis in salt basin.

Key words: salt basin; salt movement; interlayered bedding; lithologic proportion; original stratum thickness

(上接第 15 页)

residual carbon. According to the original coalification degree of the daughter samples, the peak temperature of secondary pyrolysis changed in different styles such as lag, advance and fixation. To the coal at the metaphase pyrolytic stage, the reactive temperature zone of hydrocarbon generation extends to the lower temperature direction and the secondary hydrocarbon generation starts earlier due to the existence of weak chemical bond and bituminized substance. To the coals at the early and terminal pyrolytic stage, activation of secondary hydrocarbon generation needs equivalent or stronger reactive conditions than the past since the hydrocarbon generation is mainly depend on the pyrolysis of principal part of the coal structure. The secondary hydrocarbon generating potential of coals is limited by primary evolution degree. Based on the stage characteristic of secondary hydrocarbon generation of coal and the self-generating and self-reser

ving specialties of coalbed methane, the superimposed metamorphism beyond the period of hydrocarbon generating peak ($R_{o,m} \cong 0.95\%$) offers the most effective ways to elaborate the hydrocarbon generating potential of coals.

Key words: Ordos Basin; Late Paleozoic coals; secondary hydrocarbon generation; reaction kinetic characteristics; program pyrolytic modeling