

文章编号: 1001-6112(2000)04-0302-05

用声波测井资料计算剥蚀量的方法改进

刘景彦¹, 林畅松¹, 喻岳钰¹, 武法东¹, 姜亮², 陈志勇²

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 东海石油公司 地质研究所, 上海 200030)

摘要: 作者提出了用声波传播时间与深度关系的指数模型来计算剥蚀量的一种改进方法。该方法同时考虑了声波在岩石基质中传播时间的物理范围和声波在地表的传播时间, 从而在浅部和大深度上都能较好地反映地质真实和预测压实趋势, 提高了剥蚀量估计。文中应用这一改进方法对东海西湖凹陷第三系地层作了压实趋势拟合和主要不整合面的剥蚀量计算, 得出的东海 1 井中新世末的 T_0^0 界面剥蚀厚度达 1 750m。

关键词: 声波传播时间; 压实趋势; 剥蚀量计算

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

地层抬升遭受剥蚀而形成的不整合面广泛存在于不同的沉积盆地中。恢复剥蚀过程和剥蚀量大小对研究沉积物的埋藏史、构造演化史和热史等具有重要的意义。特别是在含油气盆地中, 不整合面和剥蚀量的研究更是至关重要的。因为剥蚀量的大小、范围、剥蚀年代和时间间隔直接与油气的生成、运移、聚集和保存条件有关, 是油气勘探中不可忽视的重要问题。

剥蚀量的计算方法很多。当剥蚀量较大而埋藏较浅时, 常常可应用声波时差法估算泥页岩的压实趋势和计算剥蚀量的大小。这一方法自 Magara^[1] 提出以来不断得到改进。最近, Henry^[2] 对 Magara 应用声波时差估算泥岩压实趋势的计算模型进行了一些修改, 考虑了声波在岩石中传播速率的物理范围, 取得了较好的计算结果。但笔者在研究中发现, Henry 模型忽略了声波在浅部地层特别是在地表附近传播速率的特殊性, 以致造成了浅部拟合的偏差。为此, 本文对该模型作了进一步改进, 并应用到东海西湖凹陷第三系地层的剥蚀量计算中。

1 模型改进

在正常压实情况下, 页岩压实与上覆的负荷或埋深有关, 孔隙度是页岩压实程度的度量, 而声波测

井资料直接反映了页岩压实程度的大小。因此, 根据正常的压实趋势, 应用声波测井资料推算沉积层的压实程度, 就可以估算被剥蚀地层的厚度。它的应用依赖于正确确定地下沉积层的孔隙度-深度和声波传播时间-深度关系。

1.1 压实模型

要定量压实过程, 必须建立正常的压实趋势, 确定合理的深度与孔隙度损失率的函数关系。孔隙度可由测井、钻孔等资料来确定, 是反映沉积层由于沉积作用、机械压实及化学过程等综合作用结果的重要特征。一般来说, 机械压实是控制岩石沉积沉降的主导因素。

描述岩石孔隙度随埋深的变化模型有多种。其中由 Athy^[3] 最早提出的泥页岩孔隙度-深度之间的简单指数模型得到了人们的广泛应用:

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-bX). \quad (1)$$

其中, Φ 表示岩石孔隙度, Φ_0 为地表岩石孔隙度, X 为岩石埋深。Athy 模型较好地预测了一定深度处的岩石孔隙度值: 如地表 $X = 0$ 时, $\Phi = \Phi_0$; 在大深度处 $X \rightarrow \infty$, $\Phi \rightarrow 0$ 。同时, 大量的野外资料和实验研究也表明岩石孔隙度-深度曲线呈现为一般的指数特征^[4]。因而, 本文认为随深度增大岩石孔隙度具有呈指数形式减小的趋势。

收稿日期: 2000-03-14.

基金项目: 国家自然科学基金(49772123).

作者简介: 刘景彦(1972-), 女(汉族), 黑龙江佳木斯人, 博士生, 主要从事沉积盆地的分析与模拟工作。

1.2 声波传播时间-深度模型

声波传播时间由测井资料获得,是声波从钻孔传到接收器的时间,它主要依赖于岩性、孔隙度和流体含量等因素。大量实验结果表明,在具有均匀分布的小孔隙的固结地层中,传播时间与孔隙度存在正比例线性关系^[5]。因而,不同深度的声波传播时间与不同深度的孔隙度变化可以相类比,即在正常压实情况下可以用指数函数形式来表达声波时差与深度的关系^[1]:

$$T = T_0 \exp(-bX). \quad (2)$$

其中, X 表示深度, T 表示声波传播时间, T_0 为声波在地表的传播时间($X = 0$), b 为指数衰变常数。

然而,在达到一定深度时,方程(2)与实际的声音测量值有偏差^[6]。Henry^[2]认为,方程(2)不能完全表达孔隙度-深度关系的一个重要原因是它错误地预测了声波在完全压实的岩石中的传播时间为0。事实上,声波即使在无孔隙岩石中的传播时间也不可能为0,而是趋向于一个恒定值——声波在岩石基质中的传播时间。因此,他认为孔隙度-深度之间的函数关系应为^[2]:

$$T = T_0 \exp(-bX) + c. \quad (3)$$

式中, c 代表偏移常量,大致等于声波在岩石基质中的传播时间。

Henry模型考虑了岩石声速的物理范围,在地层深部拟合得很好。但笔者在应用这种方法进行剥蚀量计算中发现,拟合结果在浅部出现了较大的偏差,原因是该模型忽略了声波在地表($X = 0$)处的传播时间应为一恒定值,即 T_0 ,它一般等于声波在沉积盆地的表面传播时间。由方程(3)不难看出,当 $X = 0$ 时, $T = T_0 + c$,这显然与理论模型不符。声波传播时间与深度之间更为准确的关系应同时满足不同深度地层的真实情况。因此,本文提出了如下改进模型:

$$T = (T_0 - c) \exp(-bX) + c. \quad (4)$$

在大深度处,如 $X \rightarrow \infty$, $T = c$,即深度无穷大时,岩石认为不可再压实,孔隙度为0,声波在这种岩石中的传播时间相当于声波在岩石基质中的传播时间;在地表 $X = 0$ 处, $T = T_0$,即声波在地表的传播时间基本上为一常数,相当于在水中的传播时间。这一改进的指数模型在浅部和深部都能较好地反映

地质真实,从而提高了压实趋势的预测能力。

2 计算方法

2.1 统计拟合技术

方程(4)中的 T 和 X 分别表示声波测井资料中的声波传播时间和地层深度,为已知参数; T_0 为声波在地表附近(相当于在纯水中)的传播时间,范围大约在 $591 \sim 689 \mu\text{s}/\text{m}$ 之间^[1];方程中 b 和 c 为未知数,需要用统计方法拟合出最佳值。对方程两边取自然对数,有:

$$\ln(T - c) = \ln(T_0 - c) - bX. \quad (5)$$

即转化为线性方程 $Y = mX + b$ 的形式,可用标准的最小平方技术拟合。

式中 c 的物理意义代表的是声波在岩石基质中的传播时间,其大小取决于岩石类型、岩石孔隙度及孔隙中包含的流体。实验室研究表明,一般情况下声波在岩石基质中的传播时间在 $128 \sim 223 \mu\text{s}/\text{m}$ 之间^[7]。因此,在 c 的有效物理范围内,给定一个 c ,就可以确定唯一的 b ;通过误差估计找到最合适的一组 b 和 c ,可以建立合理的压实趋势方程。

2.2 统计拟合误差评价

一般来说,要用相关系数来评价统计拟合量。然而,方程(5)是用经过对数转化后的声波资料计算的,它的最小平方拟合的相关系数很难解释,因而用平均绝对值(AAV)和均方根(RMS)来定量对数转化后的误差。这两个参数衡量了计算值与测量值之差,因而代表了两个不同的评价计算值和测量值密切程度的方法。

D_i 为测量值, C_i 为相应的经对数转化后的计算值。AAV和RMS的计算如下:

$$AAV = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |D_i - C_i|,$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_i - C_i)^2}.$$

在统计运算中, RMS 和 AAV 越小,实测资料点和计算曲线就越接近。计算中, RMS 把误差平方了,因此它比 AAV 对误差的反映更灵敏。如果两种统计拟合的 RMS 相近,那么具有较低的 AAV 的拟合被认为是较好的拟合。把 RMS 和 AAV 值结合起来考虑,是评价对数转化后指数拟合的可靠工具^[2]。

3 应用分析

应用声波测井资料计算剥蚀量一般要求剥蚀厚度要大于再沉积的上覆地层厚度, 因为当再沉积地层厚度明显大于剥去的地层厚度时, 再沉积厚度可能会对先存地层的压实趋势有所改造。

东海西湖凹陷第三系地层经历了多次挤压反转、构造抬升作用, 形成了多个不整合界面。其中中新统末发生的龙井运动规模较大, 在地震剖面上可见大型的背斜隆起和地层的上超、削截等。它们形成了区内广泛分布的区域性角度不整合, 在地震剖面上为 T_1^0 反射界面。根据地震剖面显示的地层结构推算的剥蚀厚度达 1200~ 3000m, 该界面现今的埋深约为 1000m。因此, 本文选择了这一界面进行剥蚀量的模拟计算。

3.1 理想压实曲线的建立

一般情况下, 一个地区在一定的盆地背景下, 地层具有统一的压实趋势。因此, 在对一个地区进行压实趋势分析时, 应首先建立该区理想的压实曲线, 来反映沉积层的总体压实程度; 同时, 通过建立的理想压实曲线的拟合程度分析, 也检验了我们所采用的拟合方法的优劣。

建立理想的压实曲线, 要选择沉积比较连续、受

后期岩浆和构造等活动影响较小的地层和相应的测井资料。研究表明, 西湖凹陷的构造运动具有北强南弱、东强西弱的特点^[8]。盆地东缘和北部地层高角度抬升, 大面积剥蚀; 而西部斜坡带和盆地南部构造反转相对弱, 造成的剥蚀较小。因此, 本文选择了盆地西南部基本上不受剥蚀的钻井的声波资料作压实趋势的拟合比较(图 1、2)。

图 1 是应用位于西湖凹陷南部的孤山 1 井的声波资料作的全井压实拟合结果, 分别用简单指数函数和本文改进的函数进行了拟合计算, 后者得到的最佳的 b 和 c 值分别为 0.000 36 和 134。不难看出, 两种方法得到的曲线中部分离较大, 趋势存在差异。从总趋势上看, 本文改进方法得到的曲线的拟合程度比简单指数函数模型得到的曲线的拟合程度要高, 在预测地表附近及大深度处的压实趋势时具有更大的合理性。

图 2 是用西湖凹陷西部斜坡带上的一口井作的拟合结果, 这次采用了 3 种方法进行计算和拟合比较。本文改进模型得到的最佳的 b 和 c 值分别是 0.000 497 和 156, Henry 模型得到的 b 和 c 值分别是 0.001 094 和 225。由图可见, 简单指数模型得出的拟合曲线与实测点偏差较大, 特别是在大深度处, 偏离了实测点范围; Henry 模型在中部和大深度处有极好的拟合效果, 但在浅部突然向下弯曲, 大大地

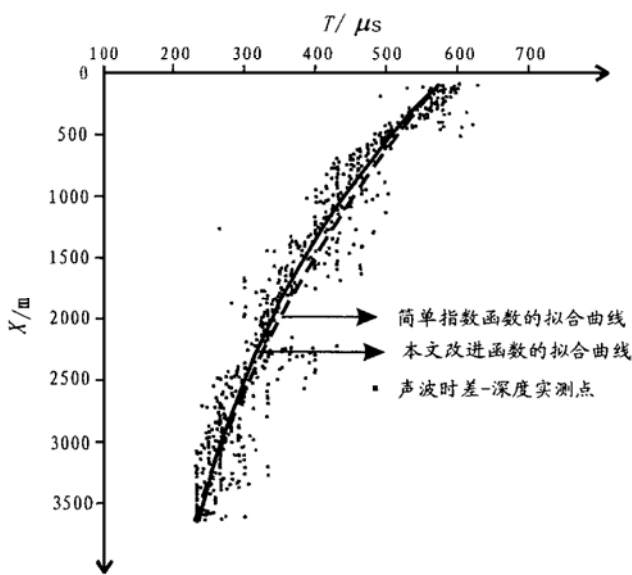


图 1 西湖凹陷理想压实趋势拟合 (以孤山 1 井为例)

Fig. 1 Fitting curves of ideal compaction trend for well Gushan 1 in the Xihu Depression

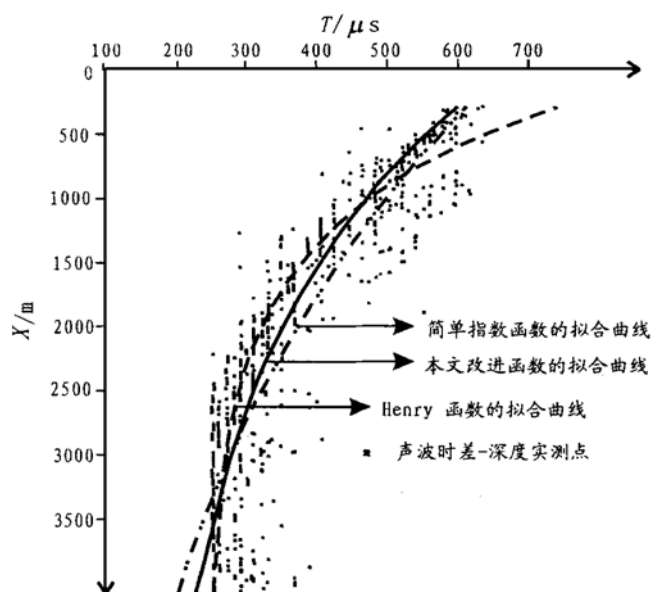


图 2 几种方法得出的理想压实趋势拟合比较

Fig. 2 Comparison of fitting curves of ideal compaction trend calculated by three different methods

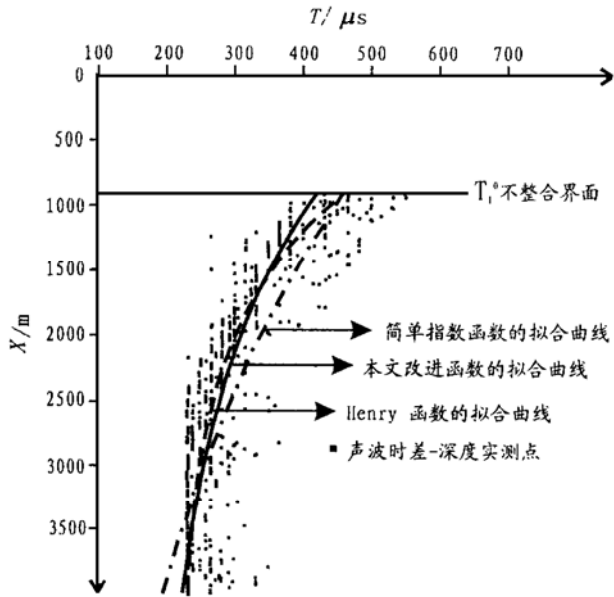


图 3 东海 1 井 T_1^0 不整合面下的地层压实趋势拟合

Fig. 3 Fitting curves of stratigraphic compaction trend under the T_1^0 unconformity plane of well Donghai 1, the Xihu Depression

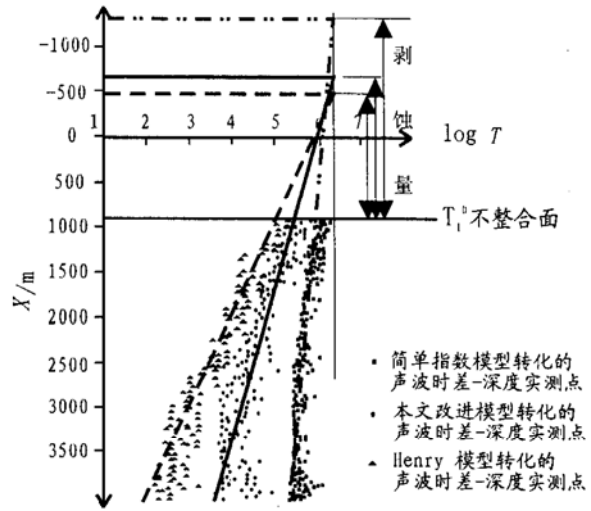


图 4 东海 1 井 T_1^0 不整合面剥蚀量计算比较

Fig. 4 Comparison of denuded amount estimated by three methods for the T_1^0 unconformity plane of well Donghai 1, the Xihu Depression

偏离了实测点范围。总体来说, 本文改进的方法得出的拟合曲线与实测点间有较好的拟合程度, 在深部和浅部都具有较高的预测能力。

3.2 剥蚀量的计算

西湖凹陷北部的东海 1 井位于一个大型背斜隆起的顶部, 该区 T_1^0 界面与下伏地层呈高角度不整合。本文同时应用 3 种方法, 对 T_1^0 不整合面下的地层进行压实趋势拟合及界面上的剥蚀量计算(图 3、图 4)。由本文改进模型得到的最佳的 b 值为 0.000 587, c 值为 189; Henry 模型得到的最佳的 b 值为 0.000 969, c 值为 220。图 3 的 3 条拟合曲线的比较可见, 本文改进的方法具有更好的压实趋势预测能力。

图 4 是分别根据 3 种方法得出的压实趋势进行的剥蚀量计算结果, 为了表达直观方便, 用半对数坐标表示。由图可见, 应用本文改进方法计算出的剥蚀量约为 1 750m, 用 Henry 模型计算的剥蚀量约为 1 550m。而用简单指数函数得出的剥蚀量达 2 300 多米。前面两种方法得到的结果相差不大, 与从地震剖面等资料得到的剥蚀量估算也较为接近。但从总的规律上来说, Henry 模型存在着普遍的估算结果偏小的趋势; 简单指数模型得到的结果与实际情况相差较远, 由于模型没有考虑到一些边界条件的

限制, 计算结果普遍偏大。

4 结论

(1) 几种方法的比较分析表明, 直接应用简单指数模型计算的剥蚀量偏大, 而应用 Henry 模型计算的剥蚀量偏小。

(2) 本文改进的应用声波测井资料计算剥蚀量的方法同时考虑了沉积层表面和大深度处的声波传播时间的物理限制, 比以往的压实模型更符合实际情况, 提高了剥蚀量估计。

(3) 应用本文改进模型计算的西湖凹陷东海 1 井 T_1^0 界面的剥蚀量达 1 750m。

参考文献:

[1] Magara K. Thickness of removed sedimentary rocks, paleopore pressure, and paleotemperature, southwestern part of Western Canada basin[J]. AAPG Bulletin, 1976, 60: 554- 566.

[2] Henry P H. Analysis of sonic well logs applied to erosion estimates in the Bighorn basin, Wyoming[J]. AAPG Bulletin, 1996, 80: 630- 647.

[3] Athy L F. Density, porosity and compaction of sedimentary rocks [J]. AAPG Bulletin, 1930, 14: 1- 24.

[4] Pittman E D, Larese R E. Compaction of lithic sands: experimental results and applications[J]. AAPG Bulletin, 1991, 75:

1279–1299.

- [5] Wyllie M R J, Gregory A R, Gardner L W. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media[J]. *Geophysics*, 1956, 21(1): 41–70.
- [6] Kumar N. Thickness of removed sedimentary rocks, paleopore pressure, and paleotemperature, southwestern part of Western Canada basin: discussion [J]. *AAPG Bulletin*, 1979, 63: 812–

814

- [7] Schlumberger. Log interpretation principles/ applications [M]. Schlumberger Educational Services, 1989. 46.
- [8] 刘景彦, 林畅松. 东海西湖凹陷第三系主要不整合面的特征、剥蚀量的分布及其意义[J]. *现代地质*, 1999, 13(4): 432–439.

AN IMPROVED METHOD TO CALCULATE DENUDED AMOUNT BY SONIC WELL LOGS

LIU Jing-yan¹, LIN Chang-song¹, YU Yue-yu¹, WU Fa-dong¹, JIANG Liang², CHEN Zhi-yong²

(1. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

2. *Geological Research Institute, China Offshore Oil Donghai Corporation, Shanghai 200030, China*)

Abstract: An improved method to calculate denuded amount by the exponential model of sonic propagation time vs. depth is suggested in this paper. The method considered the physical range of sonic propagation time in rock matrix and the sonic propagation time in Earth's surface, and can well reflect geologic reality and predict compaction trend in shallow and great depths so as to improve the estimation of denuded amount. The improved method is applied to the Triassic strata of the Xihu Depression, the East China Sea by the authors to fit compaction trend and to calculate the denuded amount of major unconformity planes. The estimated denuded thickness of T_1^0 interface at the end of the Miocene in well Donghai 1 is about 1 750m.

Key words: sonic propagation time; compaction trend; denuded amount calculation

(上接第296页)

下 $1\ 000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的探明储量。与此同时,对已有的地震资料(在补作少量高分辨率地震资料的情况下)结合钻井和测井资料,对整个区块作岩性和岩相的层序地层解释,找出可能形成地层圈闭的最有利地区 and 目标(变质岩基底之上有泥质岩类作直接盖层的地区)作为拿储量的第二个目标。

参考文献:

- [1] 朱夏. 我国中生界含油气盆地的大地构造特征及有关问题 [A]. *中国大地构造* [M], 北京: 科学出版社, 1965.
- [2] 地质部第三普查勘探大队. 陕甘宁盆地石油普查地质成果总结报告. 内部资料, 1975.
- [3] Watson M P. Plate tectonic history, basin development and petroleum source rock deposition [J]. *Marine Petroleum Geology*, 1987, (4).

- [4] 孙肇才. 鄂尔多斯盆地北部地质构造格局及前中生界油气远景 [J]. *石油学报*, 1980, 1(3).
- [5] Moore P S, Hobday D K, Mai H, SUN Z C. Comparison of selected non-marine petroleum-bearing basins in Australia and China [J]. *APEA*, 26: 1.
- [6] 孙肇才, 谢秋元. 叠合盆地的发生及其含油气性 [J]. *石油实验地质*, 1980, (1).
- [7] 孙肇才, 谢秋元, 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地——一个不稳定的克拉通内部盆地的典型 [A]. *中国中生代盆地* [M]. 北京: 石油工业出版社, 1990.
- [8] 孙肇才. 碰撞山链与前陆盆地演化——学习朱夏教授盆地研究思想的一点启示 [A]. *中国油气盆地分析——朱夏学术思想研讨文集* [C]. 北京: 石油工业出版社, 1993.
- [9] 王双明, 吕道生, 张玉平. 鄂尔多斯盆地形成演化和聚煤规律 [A], 第30届国际地质大会论文集 [C]. 北京: 地质出版社, 第18卷, 第2部分.