

东海陆架盆地西湖凹陷不整合面 剥蚀厚度恢复

王震¹, 张明利², 王子煜³, 武法东¹, 王林生³

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 3. 石油大学, 北京 102249)

摘要: 东海陆架盆地西湖凹陷晚中生代末期以来, 经历了裂陷阶段、坳陷阶段和区域沉降阶段, 形成了多个广泛分布的区域性不整合面(地震反射界面): T_1^0 , T_1^1 , T_1^2 等, 地层遭受了强烈剥蚀。以东海西湖凹陷为例, 对声波时差法和镜质体反射率法求取地层剥蚀厚度的基本原理和计算方法进行了简要介绍, 分析了地层剥蚀对油气成藏的影响, 对该方法的适用性进行了探讨。

关键词: 声波时差; 镜质体反射率; 地层剥蚀; 不整合面; 西湖凹陷; 东海陆架盆地

中图分类号: TE132.1

文献标识码: A

东海西湖凹陷位于东海陆架盆地东北部, 面积 $4.6 \times 10^4 \text{ km}^2$, 新生代最大沉积厚度超过 10 000 m, 是东海陆架中最具油气潜力、规模最大的一个盆地^[1]。西湖凹陷新生代划分为 3 个构造演化阶段: 裂陷阶段(古新世—始新世)、坳陷阶段(渐新世—中新世)、区域沉降阶段(上新世—第四纪)^[2,3], 形成了多个广泛分布的区域性不整合面, 其中 T_2^0 是中新统柳浪组与上新统三潭组的分界面, 是盆地裂后坳陷期发育的规模较大的区域性角度不整合面; T_1^2 反射界面是渐新统花港组与中新统龙井组的分界面, 是盆地裂后坳陷期发育的第一个区域性角度不整合面; T_1^0 是花港组的底界面, 与下伏裂陷期沉积的平湖组分开, 是坳陷与裂陷期沉积的分界面。

在不整合面研究中, 剥蚀量的估算十分重要。它不仅反映了构造隆升的强度和剥蚀时间的相对长短, 也为研究地层中油气的运移和保存等提供了重要依据。付广研究认为, 地层剥蚀使油沿断裂渗滤散失量增大, 而使气沿断裂渗滤散失量减小^[4]。目前剥蚀量的计算方法很多, 牟中海等概括了国内外估算地层剥蚀厚度的方法: 1) 砂岩孔隙度法; 2) 泥岩声波时差法; 3) 古地温法, 包括古地温梯度法、包体测温法、磷灰石裂变径迹法等; 4) 镜质体反射率法, 包括 R_o-H 深度法和同层多点 R_o 对比法以及 R_o-TTI 法; 5) 沉积速率法, 包括沉积速率比值法和沉积速率趋势法; 6) 物质平衡法; 7) 未被剥蚀地层

厚度趋势延伸法, 包括内插和外插法; 8) 地质年龄差比与残留厚度乘法^[5]。但各种方法都对资料有些特殊要求, 并在应用方面具有局限性。在本次研究中, 根据西湖凹陷的具体情况, 主要采用了声波时差法和镜质体反射率法。

1 基本原理

1.1 声波时差法恢复地层剥蚀量的基本原理

在正常压实情况下, 页岩的压实程度与上覆负荷或其埋深有关; 孔隙度是页岩压实程度的度量; 声波传播时间是孔隙度的函数, 因此由声波测井资料可以建立正常的压实趋势, 从而恢复原始沉积厚度和估算剥蚀量^[6]。泥页岩声波时差与深度满足: $\Delta t = \Delta t_0 e^{-bx}$, 其中 x 为深度, Δt 为深度 x 处的声波时差值, Δt_0 为原始地表的声波时差值, b 为压实常数。在半对数坐标系中, Δt 与深度 x 呈线性相关, 如果某一地区经历了抬升和剥蚀, 那么泥页岩声波时差与深度的正常压实趋势曲线与未遭受剥蚀的地区相比, 向压实程度增大的方向偏移。根据这一偏移趋势, 将其压实趋势线上延到未经历压实的 Δt_0 处, 则 Δt_0 与剥蚀面处的高差即为剥蚀厚度(图 1)。

1.2 镜质体反射率法恢复地层剥蚀量的基本原理

据镜质体反射率 R_o 确定的有机质热演化曲线的间断或跳跃, 可以判定不整合面的存在并计算地

收稿日期: 2003- 12- 25; 修订日期: 2004- 11- 09。

作者简介: 王震(1976—), 男(汉族), 河北保定人, 博士生, 主要从事石油构造地质研究。

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科技部项目(P00033)。

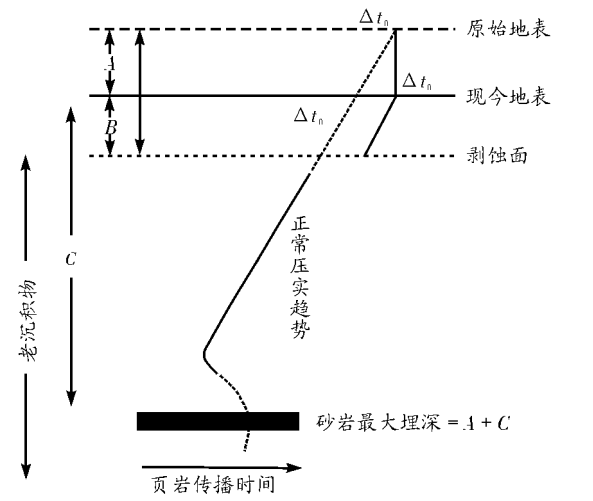


图 1 声波时差法计算剥蚀量原理图

A. 原始地表与现今地表深度差; B. 剥蚀后沉积的新沉积物厚度; C. 砂岩现今埋深

Fig. 1 Principle for calculating erosion amount using sonic velocity data

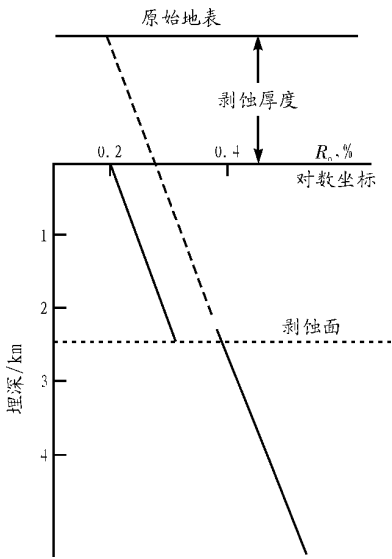


图 2 镜质体反射率法求剥蚀厚度原理图

Fig. 2 Principle for calculating erosion amount using vitrinite reflectance data

层的剥蚀厚度。在正常情况下, 镜质体反射率 R_v 是深度 x 的函数, 对连续沉积的地层而言, 镜质体反射率与深度呈对数关系, 在半对数直角坐标系中, 两者线性相关。依据间断面之下地层中保留下来的剥蚀前的镜质体成熟度剖面趋势线, 将其上延至古地表附近的 R_v 最小值处(目前人们普遍认为地表附近 R_v 最小值为 0.18% ~ 0.20%), 也就是延至 R_v 为 0.20% 处, 则该点在成熟度剖面中所代表的深度值与间断面所在深度的差值即为地层剥蚀厚度(图 2)。

2 计算方法

2.1 声波时差法恢复地层剥蚀量的方法

收集了西湖凹陷资料较全的 16 口钻井的 30×10^4 个声波时差数据, 筛选出其中的泥岩段数据用于回归分析。以 T_3^0, T_2^0, T_2^4 3 个不整合面为界, 在单对数坐标系(声波时差取对数)中对声波时差与深度的关系进行分段回归, 两者成线性相关关系。不整合面上下拟合线发生突变, 根据前述研究方法, 将间断面以下的声波时差拟合曲线向上延伸至 Δt_0 处相交于一点, 交点与不整合面的深度差为剥蚀厚度。如果近地表的声波时差资料不完整导致无法回归出近地表处的 Δt_0 , 根据有关测定值, 一般取 189 $\mu s/m$ 。由于西湖凹陷钻井的声波时差数据中浅部数据相对较少, 深部数据由于存在欠压实等原因而出现异常, 因而计算的地层剥蚀量大多为 T_2^4 不整合面上的地层剥蚀量。实际工作中, 根据钻井录井图, 选择其中大段的泥岩段数据进行回归分析。

2.2 镜质体反射率法恢复地层剥蚀量的方法

收集了西湖凹陷 14 口钻井的 300 余个镜质体反射率数据, 选取其中资料较全的 10 口钻井的 200 余个镜质体反射率数据, 以 T_3^0, T_2^4, T_2^0 3 个不整合面为界, 在单对数坐标系(镜质体反射率数据取对数)中就镜质体反射率数据与深度的关系进行分段回归, 两者成线性相关关系, 不整合面上下拟合线发生突变。此外, 断层、岩浆作用等都可以造成 R_v 的突变、重复或缺失。西湖凹陷断层发育, 岩浆活动较频繁。因此, 应用这种方法必须排除断层、测点分布及岩浆作用等造成的影响, 数据点的选择十分重要。实际上, 该方法计算出的地层剥蚀厚度只是实际地层剥蚀厚度中的一部分。卢鸿、王铁冠认为, 鉴于地质地层演化的压实效应, 用镜质体反射率方法求得的数值应为可能的最小剥蚀幅度^[7]。

研究过程中, 声波时差法的计算结果与镜质体反射率法有误差时, 分析误差原因, 若计算无误, 优先采用数据量较大的声波时差法计算出的结果。

3 计算结果

3.1 声波时差法恢复西湖凹陷钻井不整合面地层剥蚀量结果

通过对 11 口钻井不整合面上下声波时差变化趋势的分析, 计算出不整合面上地层剥蚀厚度(表 1; 图 3)。龙井 2 井、残雪 2 井、武北 1 井因存在数据异常或因地层分层数据不清而未被采用。残雪 1 井 T_2^4 不整合面上的剥蚀厚度为 1 000 m, 与该区其

表 1 声波时差法计算的地层剥蚀量表

Table 1 Erosion amount calculated from sonic velocity data

编号	井号	不整合面	地层剥蚀厚度/m
1	断桥 1 井	T_2^0	450
2	断桥 1 井	T_3^0	350
3	天外天 1 井	T_2^4	350
4	秋月 1 井	T_2^4	200
5	孤山 1 井	T_2^4	500
6	残雪 1 井	T_2^4	1 000
7	孔雀亭 1 井	T_2^4	250
8	来鹤亭 1 井	T_2^4	100
9	花港 1 井	T_2^4	300
10	春晓 3 井	T_2^4	650
11	武云亭 1 井	T_2^4	80
12	宝云亭 1 井	T_2^4	150

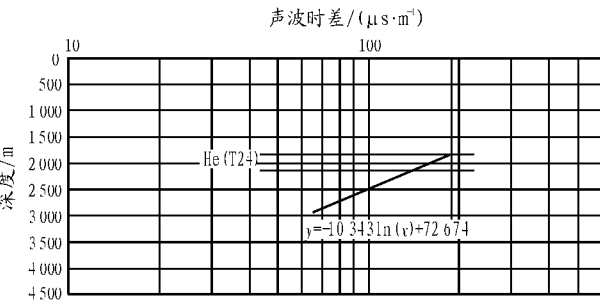


图 3 声波时差法恢复天外天 1 井 T_2^4 不整合面剥蚀厚度图

Fig. 3 T_2^4 unconformity's erosion amount of the Well TWT 1 using sonic velocity data

它钻井的地层剥蚀量相比偏高。本次声波时差法计算的地层剥蚀量与尚可耘计算的基本吻合^[8]。

3.2 镜质体反射率法恢复西湖凹陷钻井不整合面地层剥蚀量结果

经计算(表 2; 图 4), 宝云亭 2 井 T_2^4 不整合面的剥蚀厚度为 800 m。由于该井 T_2^4 上下 R_o 值较少, 与附近的宝 1 井 T_2^4 剥蚀厚度相差较大, 研究认为该井镜质体反射率法计算结果偏大, 未予采用。断桥 1 井 T_2^0 的剥蚀厚度为 500 m, 与声波时差法计算出的 450 m 基本一致。孔雀亭 1 井 R_o 数据点较少而且层位集中, 秋月 1 井镜质体反射率数据点存在异常, 无法取得有效计算结果。通过镜质体反射率法计算出的钻井剥蚀量与声波时差法的计算结果基本一致。

4 不整合面剥蚀量分布特征

T_2^0 反射界面上地层的剥蚀模式可以归纳为斜坡-褶皱型地层剥蚀模式, 具有如下特点: 地层剥蚀以中央背斜带为主, 西部斜坡区次之。该时期的构

表 2 镜质体反射率法计算的地层剥蚀量表

Table 2 Erosion amount calculated from vitrinite reflectance data

编号	井号	不整合面	地层剥蚀厚度/m
1	断桥 1 井	T_2^0	500
2	天外天 1 井	T_2^0	150
3	天外天 1 井	T_3^0	450
4	秋月 1 井	—	—
5	净寺 1 井	T_2^0	400
6	净寺 1 井	T_2^4	750
7	残雪 1 井	T_2^0	600
8	孔雀亭 1 井	—	—
9	来鹤亭 1 井	T_2^0	500
10	花港 1 井	T_2^0	750
11	玉泉 1 井	T_2^0	1 300
12	宝云亭 2 井	T_2^4	800

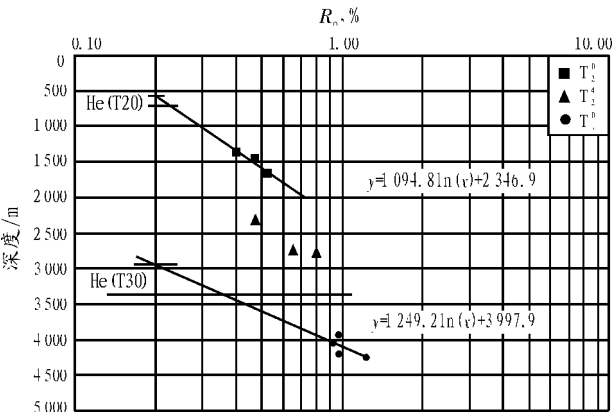


图 4 镜质体反射率法恢复天外天 1 井 T_2^0 和 T_3^0 剥蚀厚度图

Fig. 4 T_2^0 and T_3^0 unconformity's erosion amount of Well TWT 1 using vitrinite reflectance data

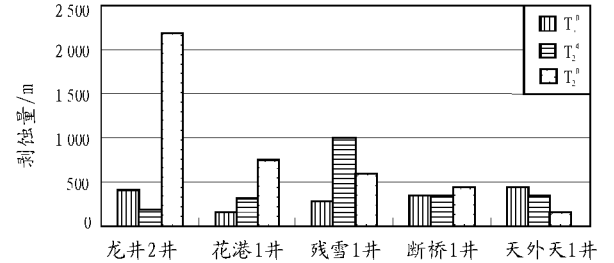


图 5 西湖凹陷中央背斜带钻井地层剥蚀量对比图

Fig. 5 Comparison of erosion amount between wells in the Central Anticlinal Zone of Xihu Sag

造运动主要集中在中央背斜带; 地层剥蚀量沿中央背斜呈带状分布; 中央背斜带挤压变形北强南弱导致地层剥蚀量的南北差异(图 5)。

T_2^4 反射界面上地层的剥蚀模式可以归纳为过渡型地层剥蚀模式, 具有如下特点: 该时期的构造反转活动主要集中在凹陷东部边缘区; T_2^4 过渡型剥蚀模式在构造演化上不是挤压作用最强烈期的产物;

T_2^4 反射界面上地层的剥蚀处于 T_3^0 反射界面的断块-斜坡型地层剥蚀模式向 T_2^0 反射界面的斜坡-褶皱型剥蚀模式的过渡过程中; T_2^4 反射界面在凹陷东部边缘剥蚀明显, 引起西湖凹陷构造反转的动力主要来自东部, 在早期影响东部边缘构造带, 晚期影响到中央背斜构造带, 西湖凹陷该时期的挤压变形序次由东向西。

T_3^0 反射界面上地层的剥蚀模式可以归纳为断块-斜坡剥蚀模式, 具有如下特点: T_3^0 反射界面上地层的剥蚀量以西部斜坡最大, 中央背斜带局部构造有剥蚀; 该时期西部斜坡区的断块抬升是影响地层剥蚀的关键因素。

5 结论

盆地构造运动一方面易形成有利于油气聚集的背斜和断块等圈闭构造; 另一方面, 若运动过于强烈, 地层受到剥蚀, 破坏了油气的盖、储条件甚至源岩, 将导致油气的泄漏和逸散。剥蚀量的大小和分布反映了构造作用的强度和活动范围, 同时也与盆地内的油气聚集密切相关。西湖凹陷地层剥蚀量的分布特征表明, T_3^0 不整合面上地层的剥蚀影响古新

统、始新统的圈闭与油气成藏; T_2^4 不整合面上地层的剥蚀对东部圈闭影响最大; T_2^0 不整合面中央背斜带北部剥蚀量大而不利成藏, 南部剥蚀量小而有利成藏。

参考文献:

- 1 叶 军, 郭迪孝. 东海西湖凹陷天然气地化特征[J]. 石油实验地质, 1996, 18(2): 174~ 181
- 2 徐旭辉, 江兴歌, 魏 武等. 东海 TB 线剖面构造模拟研究[J]. 石油实验地质, 1997, 19(1): 25~ 33
- 3 武法东, 周 平. 东海陆架盆地西湖凹陷第三系层序与沉积体系分析[M]. 北京: 地质出版社, 2000
- 4 付 广, 王朋岩, 马福建. 地层剥蚀对油气沿断裂渗滤散失影响的定量研究[J]. 断块油气田, 2001, 8(5): 8~ 12
- 5 牟中海, 唐 勇, 崔炳富等. 塔西南地区地层剥蚀厚度恢复研究[J]. 石油学报, 2002, 23(1): 40~ 45
- 6 刘景彦, 姜 亮. 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~ 438
- 7 卢 鸿, 王铁冠, 徐忠辉. 成熟度指标在恢复地层假整合面剥蚀幅度中的应用[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 2001, 16(3): 29~ 32
- 8 尚可耘, 贾健谊, 周祖翼等. 利用声波测井数据估算西湖凹陷地层剥蚀量[J]. 海洋石油, 2001, (3): 12~ 15

EROSION THICKNESS RESTORATION OF UNCONFORMITIES IN THE XIHU SAG, THE SHELF BASIN OF EAST CHINA SEA

Wang Zhen¹, Zhang Mingli², Wang Ziyu³, Wu Fadong¹, Wang Lisheng³

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Research Institute of Exploration and Production, SINOPEC, Beijing 100083, China; 3. Petroleum University, Beijing 102249, China)

Abstract: Since the final stage of Cretaceous, the Xihu Sag has undergone paar stage, depression stage and regional subsidence stage, developing several extensive surfaces of unconformity (seismic reflection sequence): T_2^0 , T_2^4 , T_3^0 , etc. This paper explains the basic principles and calculating methods of obtaining erosion amount using sonic velocity and vitrinite reflectance data of the Xihu Sag. It also analyses the influence of strata erosion on petrloeum accumulation, probing into the applicability of those methods.

Key words: sonic velocity; vitrinite reflectance; strata erosion; unconformity; the Xihu Sag; the shelf basin of East China Sea