

物质平衡法计算地层剥蚀厚度 ——以南堡凹陷东营组为例

武鲁亚, 庞雄奇*, 周立明, 陈迪, 于瑞

(油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 中国石油大学盆地与油藏研究中心, 北京 102249)

摘要:地层剥蚀厚度的恢复是盆地模拟中非常重要的一项工作,是反演盆地埋藏史和热史的前提条件。物质平衡法恢复地层剥蚀厚度是充分利用钻井、测井、地震等方法获得的地层物性资料来恢复地层剥蚀量的一种方法。该方法首先利用上下相邻地层的物性差别判断接触关系,在被剥蚀地层的顶部加入一厚度为 H 、岩性与残留部分相同的一段地层,使上下地层界面的物性差得到弥补,最后利用物质平衡原理得到初始沉积时的被剥蚀量。根据恢复地层剥蚀厚度的物质平衡计算模型编写计算机程序,使模型的计算更加准确、高效。基于物质平衡法模拟计算了南堡凹陷东营组地层的剥蚀厚度,计算出高 35 井、高 62 井、柳 4 井和柳 13 井东营组地层剥蚀厚度分别为 486、466、573、634 m。模拟结果与前人研究成果对比表明,物质平衡法恢复地层剥蚀厚度是可行和有效的,与传统方法相比,物质平衡法所需要的物性资料较容易获取,适用于各个勘探阶段开展地层剥蚀量的研究。

关键词:地层埋藏史;剥蚀厚度恢复;物质平衡;计算机模拟

中图分类号: P315.3

文献标识码: A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2016.08008

地层剥蚀是在沉积盆地发育过程中普遍存在的一种地质现象^[1]。在地层抬升剥蚀过程中,沉积物的成岩演化、排液作用及地温场等均将发生改变,且改变程度与剥蚀量大小密切相关。在盆地演化史分析中,地层剥蚀厚度的准确恢复是重建埋藏史的重点和难点,是反演盆地热史、油气生排烃史和成藏史的前提条件。前人通常笼统地将剥蚀厚度定义为被剥蚀地层骨架与孔隙厚度之和^[2]。本文将剥蚀厚度定义为从现今地层剖面上恢复出的、在初始沉积时被剥蚀地层的骨架和孔

隙厚度之和。国内外常用的估算地层剥蚀厚度的方法很多^[1-3],归纳起来主要有 4 类:①地热学方法,包括镜质体反射率法^[4-8],磷灰石裂变径迹法^[9-11],流体包裹体法^[12-14]等;②地质学方法,包括地层对比法^[15,16],沉积波动分析法^[17-19]等;③地球物理学方法,包括孔隙度法^[20-22],声波时差法^[23-25]等;④地球化学方法,包括天然气平衡浓度法^[26],宇宙成因核素法^[27-29]等。但是这些剥蚀厚度恢复方法往往存在自身的局限性,要在一定的地质条件下进行应用。例如孔隙度法和声波时差法要求地层的被剥蚀厚度大于现今地层的上覆厚度;地层对比法、沉积波动分析法只适用于研究程度较高的地区;而天然气平衡浓度法只能计算出地层总的剥蚀厚度,不能分别计算各层的剥蚀厚度。基于物质平衡原理恢复地层剥蚀厚度具有获取基础资料方便,计算结果定量化等优点。本文主要讨论了物质平衡模拟计算地层剥蚀厚度的方

收稿日期:2016-01-25

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05006)

作者简介:武鲁亚(1993—),女,在读硕士,主要从事油气成藏机理与分布规律方面的研究工作. E-mail:deyue123@163.com

* 通讯作者:庞雄奇(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事油气成藏机理与资源评价方面的研究工作. E-mail: pangxq@cup.edu.cn

法和原理,并编写了其计算程序。运用该地层剥蚀厚度恢复方法对南堡凹陷的 4 口实例井进行应用,验证了物质平衡法恢复剥蚀厚度在计算机上实现的可行性和高效性。

1 地层剥蚀厚度物质平衡模拟计算方法及原理

1.1 基本原理

在地质演化历史中,岩层的物理性质变化主要表现为厚度减小、孔隙度降低、密度增大和波速提高,造成这些变化的根本原因是岩层的机械压实^[30]。在岩性、年代、沉积压实过程完全相同的理想剖面中岩层的孔隙度随着深度的变化可以用式(1)来描述。

$$\varphi(Z) = \varphi_0 e^{(-C \cdot Z)} \quad (1)$$

式中: $\varphi(Z)$ 为地层随埋深 Z 变化的孔隙度;

φ_0 为地表岩层的孔隙度,与岩性等因素有关;

C 为地层压实系数,与压实过程、岩性等因素有关。

地史中岩层的埋深、厚度、物性及重量的变化关系满足物质平衡原理,即地层岩柱体沉积前的重量等于沉积后的重量与排出流体重量之和,可以用式(2)来表示:

$$\int_{Z_0}^{Z_0+H_0} \rho_0 dZ = \int_Z^{Z+h} \rho dZ + \left(\int_{Z_0}^{Z_0+H_0} \varphi_0 dZ - \int_Z^{Z+h} \varphi dZ \right) m_0 = m_i + w_i \quad (2)$$

式中: ρ 、 φ 分别为当前地层的密度和孔隙度;

ρ_0 、 φ_0 分别为当前地层在某一古地史时期的密度和孔隙度;

Z 、 h 分别为当前地层的顶界埋深和厚度;

Z_0 、 H_0 分别为当前地层在某一古地史时期的顶界埋深和厚度;

m_0 、 m_i 、 w_i 分别为单位面积上岩柱体初始重量、压实后重量和压实排量。

采用物质平衡法恢复地层剥蚀厚度是充分利用钻井、测井、地震等方法获得的地层物性资料来恢复地层剥蚀量的一种方法,包括利用地层界面间上下地层校正了岩性和欠压实后的物性差判别

接触关系,计算地层当前埋深下的“缺失量”,然后利用物质平衡的基本原理恢复地层初始沉积时的剥蚀量。

1.2 地层接触关系判别

对于同一岩性的沉积物,随着埋深增加,其物性变化是连续的,现实地层剖面中并非统一岩性,而且还会出现欠压实或者剥蚀,层与层之间的物性差就表现出不连续的现象。地层的岩石物性主要由地层的岩性、埋深等因素决定的。

岩性对地层埋藏史的影响主要表现为不同岩性的岩石具有不同的可压性。对于不同岩性组成的地层,其孔隙度—深度关系采用综合岩性孔隙度公式表示^[31]。

对于砂泥岩剖面:

$$\varphi(Z) = r_{sh} \varphi_{0sh} e^{-C_{sh} \cdot Z} + (1 - r_{sh}) \varphi_{0s} e^{-C_s \cdot Z} \quad (3)$$

式中: r_{sh} 、 r_s 分别为泥岩、砂岩在地层中所占比例;

C_{sh} 、 C_s 分别为与泥岩、砂岩相关的系数;

φ_{0sh} 、 φ_{0s} 分别为泥岩、砂岩在沉积时初始孔隙度;

$\varphi(Z)$ 为某一深度 Z 处的孔隙度, %。

关于地层物性随埋深的变化规律,采用下列数学地质模型,式(4)—(6)分别表示密度、孔隙度和波速随着埋深的变化:

$$\rho_r = B \cdot Z^{D_0} \quad (4)$$

$$\varphi = \varphi_0 \cdot e^{(-C \cdot Z)} \quad (5)$$

$$V = A \cdot Z^{N_0} \quad (6)$$

通过已有的物性资料,用公式(3)—(6)得到每个地层中与岩性和深度相关的密度函数,将上下相邻地层的密度在校正了埋深、岩性因素影响后进行比较,据二者差值 $\Delta\rho_{ab}$ 的大小判定地层的接触关系:

$$\Delta\rho_{ab} = \rho_b(Z_1, R_1) - \rho_a(Z_1, R_1) \quad (7)$$

式中: $\rho_a(Z_1, R_1)$ 和 $\rho_b(Z_1, R_1)$ 分别为上下地层校正到接触点统一埋深(Z_1)、统一岩性(R_1)上的密度;

$\Delta\rho_{ab}$ 为界面间的密度差。

比较结果分 3 种情况:

$\Delta\rho_{ab} = -\epsilon \sim +\epsilon$, 说明界面上下岩层的物性基本一致,不存在地层剥蚀;

$\Delta\rho_{ab} > +\epsilon$, 说明界面下的密度比界面上的密

度大,下伏地层受到过剥蚀作用;

$\Delta\rho_{ab} < -\epsilon$,说明界面上的密度比界面下的密度大,下伏地层为欠压实泥岩或者其他低密度岩层。

ϵ 是用于地层接触关系判别允许的随机偏差,其数值大小视研究区资料的精度确定,引入 ϵ 可以消除成岩作用、资料精度、实测偏差等随机因素对判别结果的影响。当随机干扰小、资料精度高时, ϵ 取值可以较小,因为上下地层间微小的物性差就能反映地层的受剥蚀情况;当随机干扰大,资料精度低时, ϵ 需要给的大些,这样才能消除随机干扰。本文确定 ϵ 的方法是在统计分析相邻上下地层的物性资料建立函数关系式时,直接依据地层的实测物性参数值与理论拟合值的偏差大小确定。

1.3 地层剥蚀量计算

这里首先对剥蚀厚度定义做一些讨论,前人通常笼统的将剥蚀厚度定义为被剥蚀地层骨架与孔隙厚度之和^[2]。通过调研以往的研究资料,本文将剥蚀厚度定义为从现今地层剖面上恢复出的、在初始沉积时被剥蚀地层的骨架和孔隙厚度之和。

在计算剥蚀量时,首先计算被剥蚀地层与上覆正常沉积压实条件下的地层之间的密度差,然后用物质平衡原理恢复被剥蚀地层的剥蚀量。由于剥蚀地层的密度函数是根据实测的资料可以得到的,因此,它在深度上的变化梯度是已知的。在受剥蚀地层的顶部加入一厚度为 H 、岩性与残留部分相同的一段地层,通过不断调整 H ,使上下地层界面的物性差得到弥补(图 1),

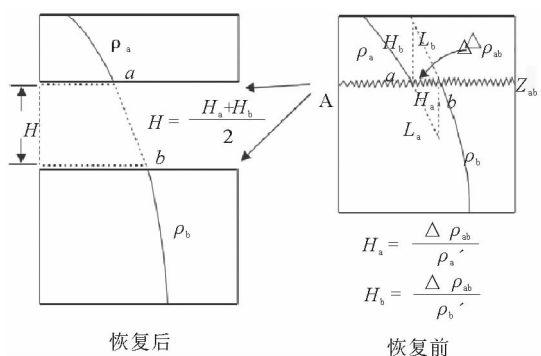


图 1 地层被剥蚀厚度恢复计算理论模型(据文献[32])

Fig. 1 The theoretical model of erosion strata thickness calculation (from reference [32])

H 为现今地层被剥蚀厚度,可近似地由下式求解:

$$\Delta\rho_{ab} = H \times \rho'_A \quad (8)$$

$$H = \frac{\Delta\rho_{ab}}{\rho'_A} = \frac{2 * \Delta\rho_{ab}}{\rho'_a(Z) + \rho'_b(Z)} \quad (9)$$

式中: $\Delta\rho_{ab}$ 为上下相邻地层在界面接触点上的密度差;

ρ'_A 为 A 界面上上下岩层密度函数的平均值;

$\rho'_a(Z)$, $\rho'_b(Z)$ 分别为界面上、下密度函数在界面接触点处的一阶导数。

这里最终计算出的现今剥蚀厚度 H 只是相当于受剥蚀地层当前埋深下的地层缺失量,它在初始沉积时实际被剥蚀了的地层厚度 H_0 。比 H 要大,用物质平衡原理(式(2))可以由 H 恢复到 H_0 。在公式(2)中,除 Z_0 、 H_0 外,其他参数均为已知量。 Z_0 为古厚度恢复的基准面,因为要计算地层初始沉积时的古厚度,所以恢复基准面一般取 0,这样计算出来的 H_0 即为地层初始沉积时的剥蚀厚度。

1.4 程序设计

从前文的分析可以看出,用物质平衡原理恢复地层剥蚀厚度的模型具有资料容易获取、计算结果定量化等优点。只要有地震或者测井资料,即使研究程度较低的地区也可以大规模的应用此法来恢复地层剥蚀厚度。为了使模型计算过程更加准确、高效,笔者根据前边介绍的的原理和方法,编写了物质平衡法恢复地层剥蚀厚度的计算机程序,程序实现的流程如图 2 所示。程序设计语言采用功能强大以及应用广泛的 C 语言。程序运行前需要输入的基础资料包括各地层埋深、孔隙度和岩性。模拟计算输出的结果包括各地层界面的接触关系(包括整合、剥蚀和欠压实 3 种)和被剥蚀地层在初始沉积时剥蚀量的大小。

地层随埋深、岩性变化的物性参数可以根据测井资料,地震速度谱等资料计算得到。为了提高计算结果的精度和可靠度,在程序设计中,可以通过利用密度、孔隙度和波速 3 种资料综合判定地层的接触关系和计算地层的剥蚀量。如果只给计算机输入一种资料,则选用公式(10)~(12)关系模型将其中的一种物性资料换算成另外 2 种,然后再利用式(4)~(6)的模型拟合。

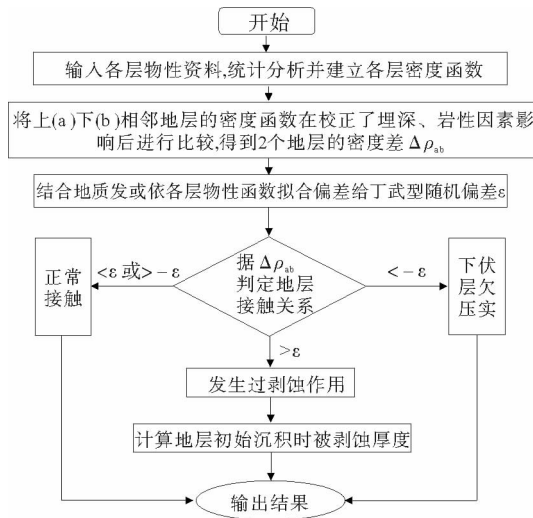


图2 物质平衡法恢复地层剥蚀厚度流程

Fig. 2 The flowchart of erosion strata thickness calculation based on mass balance method

$$\varphi = \frac{2181}{V} - \frac{1}{2.75} \quad (10)$$

$$\rho_r = 0.86V^{0.2} - 1.95 \quad (11)$$

$$V = \frac{6\,000}{1 + 2.75\varphi} \quad (12)$$

式中: φ 、 ρ_r 、 V 分别为地层中孔隙度、密度和波速。

2 南堡凹陷东营组剥蚀厚度恢复

2.1 南堡凹陷地质概况

南堡凹陷位于渤海湾盆地黄骅坳陷北部,面积为 1 932 km²,凹陷北部以西南庄断层为界,与老王庄凸起相隔;东部以柏各庄断裂为界与柏各庄凸起、马头营凸起相连;南与沙垒田凸起呈断超式接触;西以涧东断层与北塘凹陷相邻。构造单元分别为陆上的北堡构造、老爷庙构造及高尚堡—柳赞构造;滩海的南堡 1 号、南堡 2 号、南堡 3 号、南堡 4 号及南堡 5 号构造(图 3)。南堡凹陷是在华北地台的基底上发育起来的一个东断西超、北断南超的复合箕状凹陷。

中生代以来,受太平洋北部库拉板块俯冲作用,经历了多次拉张构造演化的历史,受基底断裂活动控制,形成了多凸多凹、凹陷相间、南北分带、

东西分块的构造格架。南堡凹陷主要是在古近纪形成和发展起来的,经历了强烈拉张断陷期、稳定发展期和凹陷期 3 个阶段。发生于古近纪与新近纪之间(23.8 Ma)的喜山早期构造反转运动导致南堡凹陷东营组地层遭受不同程度的剥蚀^[33]。



图3 南堡凹陷地理位置及构造单元

Fig. 3 Geographical location and structural units of the Nanpu Sag

2.2 物质平衡法计算剥蚀厚度

通过对南堡凹陷基本地质概况和地层剥蚀情况分析,选取地层剥蚀比较明显的高柳地区高 35 井、高 62 井、柳 4 井和柳 13 井作为研究对象,采用物质平衡原理对这 4 口井东营组地层剥蚀厚度进行恢复,模拟结果显示(图 4),高 35 井、高 62 井、柳 4 井和柳 13 井东营组地层剥蚀厚度分别为 393、576、451、459 m。将物质平衡法计算的地层剥蚀量与前人采用声波时差法、镜质体反射率法等传统方法计算的剥蚀量进行对比发现,计算结果吻合度较高,二者对于南堡凹陷高柳地区东营组剥蚀量的认识较为一致^[34-36]。

3 讨论

(1) ϵ 取值的大小对于判断地层接触关系具有重要的影响,因此 ϵ 的选取要与实际地质条件和实际资料的精度结合起来,本文通过综合分析实测物性参数值与理论拟合值的偏差大小, ϵ 取值为 0.02 g/cm³。

(2) 物质平衡法计算剥蚀量适用于以机械压

实作用为主的砂泥岩地层,碳酸盐岩地层孔隙度随深度变化规律复杂,不能用此法来计算剥蚀量。

(3)目前恢复地层剥蚀厚度的方法有很多,实际研究工作中要综合运用多种方法,使计算的结果更加可靠。

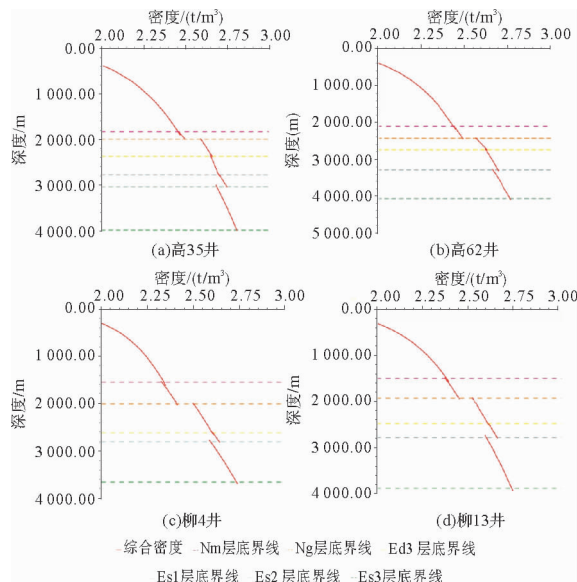


图4 地层密度随深度变化关系

Fig. 4 Variation of strata density with depth

4 结论

(1)利用物质平衡法判别地层间接接触关系,恢复地层剥蚀量是可行和有效的,通过对南堡凹陷高柳地区东营组地层剥蚀厚度的研究,计算出高35井、高62井、柳4井和柳13井东营组地层剥蚀厚度分别为486、466、573、634 m。

(2)与传统的一些方法相比,利用物质平衡法恢复地层剥蚀厚度所需要的物性资料较易获取,适用于各个勘探阶段开展地层剥蚀量的研究。

参考文献:

- [1] 李伟. 恢复地层剥蚀厚度方法综述[J]. 中国海上油气(地质), 1996, 10(3): 167-171.
- [2] 曹强, 叶加仁, 王巍. 沉积盆地地层剥蚀厚度恢复方法及进展[J]. 勘探技术, 2007, 6: 41-46.
- [3] 袁玉松, 郑和荣, 涂伟. 沉积盆地剥蚀量恢复方法[J]. 石油实验地质, 2008, 30(6): 636-642.
- [4] Dow W G. Kerogen studies and geological interpretations[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1977, 7: 79-99.

- [5] 何生, 王青玲. 关于用镜质体反射率恢复地层剥蚀厚度的问题讨论[J]. 地质论评, 1989, 35(2): 119-126.
- [6] 胡圣标, 张容燕. 利用镜质体反射率数据估算地层剥蚀厚度[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(4): 42-45.
- [7] 佟彦明, 宋立军, 曾少军, 等. 利用镜质体反射率恢复地层剥蚀厚度的新方法[J]. 古地理学报, 2005, 7(3): 417-424.
- [8] 王玮, 周祖翼. 镜质体反射率剖面反演中的不确定性分析: 以鄂西渝东茶园1井为例[J]. 石油实验地质, 2008, 30(3): 392-396.
- [9] 周礼成, 王世成. 用裂变径迹长度分布模拟地层剥蚀量和热史[J]. 石油学报, 1994, 15(3): 26-34.
- [10] 王毅, 金之钧. 沉积盆地中恢复地层剥蚀量的新方法[J]. 地球科学进展, 1999, 14(5): 482-486.
- [11] 周祖翼, 廖宗廷. 裂变径迹分析及其在沉积盆地研究中的应用[J]. 石油实验地质, 2001, 23(3): 332-337.
- [12] 赵力彬, 黄志龙, 李君等. 包裹体测温法在剥蚀厚度恢复中的应用[J]. 新疆石油地质, 2005, 26(5): 580-583.
- [13] 史长林, 纪友亮, 李清山等. 包裹体测温恢复剥蚀厚度新方法在准噶尔盆地车—莫古隆起的应用[J]. 2011, 41(1): 64-70.
- [14] 刘斌. 利用流体包裹体计算地层剥蚀厚度——以东海盆地3个凹陷为例[J]. 2002, 24(2): 172-176.
- [15] 陈瑞银, 罗晓容, 陈占坤, 等. 鄂尔多斯盆地中生代地层剥蚀量估算及其地质意义[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 685-693.
- [16] 王敏芳, 黄传炎, 徐志诚, 等. 浅述地层剥蚀量恢复的基本原理与方法[J]. 海洋石油, 2006, 26(1): 28-33.
- [17] 刘国勇, 杨明慧. 沉积盆地波动过程分析方法在中国的应用[J]. 世界地质, 2004, 23(3): 295-300.
- [18] 张庆石, 张吉, 张庆晨. 应用波动分析法研究三肇深层沉积剥蚀史[J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 20(6): 23-24.
- [19] 张一伟, 李京昌. 原型盆地剥蚀量计算的新方法: 波动分析法[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(1): 88-91.
- [20] 何将启, 王宜芳. 计算剥蚀厚度的优化孔隙度法: 程序及应用[J]. 高校地质学报, 2002, 8(2): 207-214.
- [21] 何将启, 周祖翼, 江兴歌. 优化孔隙度法计算地层剥蚀厚度: 原理及实例[J]. 石油实验地质, 2002, 24(6): 561-565.
- [22] 马立祥, 万静萍. 利用砂岩孔隙度演化趋势估计古地层剥蚀量的简易方法[J]. 石油实验地质, 1991, 13(1): 53-56.
- [23] 胥立声. 声波时差曲线对确定生油岩高压带和地层剥蚀厚度的应用[J]. 中国海上油气(地质), 1989, 3(4): 37-41.
- [24] Magara K. Thickness of removed sedimentary rocks, paleopore pressure, and paleotemperature, southwestern part of Western Canada basin[J]. AAPG Bulletin, 1976, 60: 554-566.
- [25] 付晓飞, 李兆影, 卢双舫, 等. 利用声波时差资料恢复剥蚀量方法研究与应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2004, 23(1): 9-11.

- [26] 李明诚,李 伟. 利用平衡浓度研究天然气的扩散. 天然气工业,1996,16(1):1-5.
- [27] Gosse J C, Phillips F M. Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: Theory and application[J]. Quaternary Science Reviews, 2001, 20(14): 1475-1560.
- [28] Lal D, Chen J. Cosmic ray labeling of erosion surfaces II: Special cases of exposure histories of boulders, soils and beach terraces[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 236(3/4): 797-813.
- [29] 李储华,纪有亮,张世奇,等. 应用宇宙成因核素 ^{10}Be 和 ^{26}Al 估算剥蚀面的暴露时间及剥蚀速率和剥蚀厚度[J]. 石油大学学报:自然科学版,2004,28(1):1-5.
- [30] Magara K. Mechanisms of nature fracturing in a sedimentary basin[J]. AAPG, 1981,65(1):123-132.
- [31] 庞雄奇,邱楠生,姜振学,等. 油气成藏定量模拟[M]. 北京:石油工业出版社,2005.
- [32] 庞雄奇,陈章明,陈发景. 含油气盆地地史、热史、生留排烃史数值模拟研究与烃源岩定量评价[M]. 北京:地质出版社,1993.
- [33] 范柏江. 南堡凹陷源控油气作用及有利勘探方向:[D]. 北京:中国石油大学(北京),2012.
- [34] 彭清华,周江羽,揭昇新. 声波时差法对南堡凹陷东营组剥蚀量的恢复[J]. 断块油气田,2009,16(6):50-53.
- [35] 彭清华,周江羽,揭昇新. 镜质体反射率法在南堡凹陷东营组剥蚀厚度恢复中的应用[J]. 沉积与特提斯地质,2013,33(2): 89-94.
- [36] 彭清华,周江羽,蒋少斌,等. 南堡凹陷不整合类型及剥蚀量恢复[J]. 新疆石油地质,2013,34(6):657-660.

EROSION THICKNESS RESTORATION BY MASS BALANCE METHOD: A CASE STUDY IN DONGYING FORMATION, NANPU SAG

WU Luya, PANG Xiongqi*, ZHOU Liming, CHEN Di, YU Rui

(State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, Beijing 102249, China;

Basin and Reservoir Research Center, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: The restoration of erosion strata thickness, as a precondition of burial history and thermal history inversion, is a very important work in basin simulation. Mass balance method is used to restore the strata erosion thickness through stratigraphic physical property obtained from drilling, well logging and seismic data. Firstly, the contact relationship of adjacent formations is judged by the physical property difference. A layer with a thickness of H and same lithology is put at the top of the eroding formation to balance the physical property difference. Therefore, the erosion strata thickness can be obtained by mass balance method. According to the computer program based on mass balance method, the calculation process of erosion strata thickness becomes more and more accurate and efficient. In this paper, according to mass balance method, the erosion strata thickness of Dongying Formation of Nanpu Sag has been calculated, which are 486m, 466m, 573m and 634m in Well G35, Well G62, Well L4 and Well L14 respectively. Simulation result indicates that it is feasible and effective to restore the erosion strata thickness using the mass balance method. Compared with traditional methods, the physical properties data needed by mass balance method are more accessible, so it is applicable to calculate the stratigraphic erosion amount in various exploration stages.

Key words: strata burial history; restoration of erosion thickness; mass balance method; computer simulation