

文章编号:1009-3850(2013)02-0089-06

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

彭清华¹, 周江羽², 揭异新²

(1. 成都地质矿产研究所, 四川 成都 610081; 2. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北武汉 430074)

摘要:利用镜质体反射率趋势线法对南堡凹陷高柳地区、柳赞构造带、林雀次凹、柳南次凹等地区的地层剥蚀厚度进行了恢复;结合泥岩声波时差法和地层对比法,恢复了南堡凹陷东营组地层剥蚀厚度。认为利用镜质体反射率法来求取剥蚀厚度的前提是选取合适的 R_o 数据。当缺乏足够的单井 R_o 数据时,位于同一构造单元内、具有相同埋藏史的不同井的 R_o 数据可以整合利用以恢复剥蚀厚度。作出了研究区地层剥蚀厚度等值线图,南堡凹陷东营组的剥蚀强度大致可分为两个区:东北部为强剥蚀区、中部为弱剥蚀区。

关键词:南堡凹陷;剥蚀厚度;镜质体反射率;东营组

中图分类号:TE122.1⁺13

文献标识码:A

地层剥蚀是沉积盆地中普遍存在的现象。如果剥蚀量不大,其对油气生成、运移和聚集的影响可以不考虑;而当剥蚀量较大时,则会对盆地中油气的生成、运移和聚集等产生影响,此时就要对剥蚀厚度进行恢复。南堡凹陷位于渤海湾盆地黄骅凹陷的北部,为一个中-新生代断陷盆地。东营组地层普遍遭受不同程度的剥蚀。区内断裂多、构造复杂,剥蚀厚度的恢复对油田工作者来说一直是个难题。为了对南堡油气成藏进行深入的研究,更好地服务油气的勘探,结合实际资料,选取了镜质体反射率趋势线法恢复了该凹陷部分地区的剥蚀厚度。提出利用镜质体反射率法来求取剥蚀厚度的前提和缺乏足够的单井 R_o 数据时进行剥蚀厚度恢复的方法。并结合泥岩声波时差法、地层对比法对整个地区东营组剥蚀厚度作出了恢复,作出东营组剥蚀厚度等值线图,得出了南堡凹陷东营组的剥蚀强度在高柳地区强,在凹陷中心弱的结论。

1 地质背景

南堡凹陷位于渤海湾盆地黄骅拗陷东北部,面

积约 1932km²,东北部以柏各庄控盆断裂为界与柏各庄凸起、马头营凸起相连;西北部以西南庄控盆断裂为界与老王庄凸起相隔;南部缓坡与沙垒田凸起呈超覆关系(图1)。

南堡凹陷作为华北地台的组成部分,与华北地台经历了相同的构造演化历程:沙一段以来经历了裂后热沉降(沙河街组一段时期)-裂陷(东营组时期)-裂后热沉降(馆陶组、明化镇组下段时期)-构造再活动(明化镇组上段时期、第四纪)的构造演化过程,并在渐新世东营组沉积时期和新近纪具有明显的右旋走滑特征。发生于古近纪、新近纪之间(23.8 Ma)的喜山早期构造反转运动在整个华北乃至东亚地区均有表现,受其影响,东营组地层遭受不同程度的剥蚀,造成南堡凹陷及周边地区古近系、新近系之间广泛角度不整合接触(东营顶部不整合面)。受近北东走向断裂特别是近东西走向的高柳断层的影响,南堡凹陷东营组地层表现为在柳南次凹、林雀次凹残留厚度大,高尚堡、柳赞地区残留厚度小的现象。

收稿日期:2013-01-16; 改回日期:2013-02-23

作者简介:彭清华(1984-),男,硕士,助理工程师,主要从事石油地质研究工作。E-mail:pqh1984yes@126.com

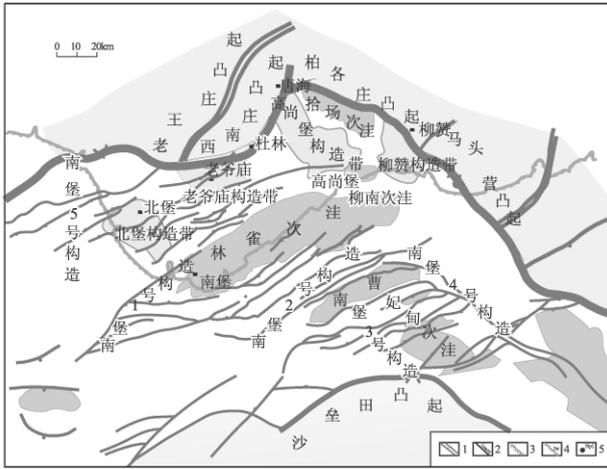


图1 南堡凹陷构造纲要图(据冀东油田,修改)

1. 断层; 2. 地震解剖剖面; 3. 海岸线; 4. 水深线; 5. 钻井

Fig. 1 Tectonic outline of the Nanpu depression

1 = fault; 2 = seismic profile; 3 = coastal line; 4 = bathymetric line; 5 = borehole

2 常用地层剥蚀厚度恢复方法

剥蚀厚度恢复方法较多,归纳国内外学者提出的不同方法,主要有以下4种:(1)Wyllie公式模型法,如声波时差法、孔隙度法等^[1-3];(2)地层对比法,如传统的地层对比法、地震地层对比法等^[4-5];(3)与古温标有关的方法,如镜质体反射率法、流体包裹体测温法、磷灰石裂变径迹法等^[4,6];(4)沉积速率法,如传统的沉积速率法、沉积盆地波动分析法等^[7,8]。目前比较常用的剥蚀厚度恢复方法有孔隙度法、泥岩声波时差法、沉积速率法、镜质体反射率法等^[9]。每种方法都有不同的优缺点。

2.1 孔隙度法

在一定的深度范围内(通常小于4000m)^[10]、正常的压实状态下,碎屑岩的孔隙度随埋藏深度的增加而成指数衰减,即使地层遭受抬升剥蚀,其孔隙度也不会因埋深变浅而变大。碎屑岩(主要为泥岩和砂岩)初始孔隙度(ϕ_0) 在沉积之后的埋藏过程中随深度增加呈指数减小,剥蚀面之下碎屑岩孔隙度(ϕ_z)与埋深之间的关系可表示为:

$$\phi_z = \phi_0 \exp[-c(Z+H_e)]$$

式中: Z 为剥蚀面深度; H_e 为剥蚀厚度; c 为压实系数。

初始孔隙度 ϕ_0 为经验值,砂岩一般给定为45%,泥岩为62%^[11],压实系数 C 为一经验值,由区域资料得到;已知 ϕ_0 , C 时,只要给定 ϕ_z , Z 数据,就可以求得剥蚀厚度 H_e 。但需要指出的是 ϕ_0 的与碎

屑沉积物组成颗粒的粒径、分选性、颗粒形态(球度)、颗粒圆度(棱角度)和填集以及沉积物固结程度有关。为了避免人为因素对 ϕ_0 的影响,何将启^[12]提出了一种优化处理的方法。

2.2 泥岩声波时差法

Magara等在1976年提出泥岩压实外推法^[1],认为泥岩的声波时差(Δt)与埋深(H)呈如下关系:

$$\Delta t = \Delta t_0 e^{-cH}$$

式中: Δt_0 为地表未固结泥岩的声波时差值($\mu s/m$); C 代表正常压实曲线的斜率; Δt 为任一埋深的泥岩的声波时差值($\mu s/m$); H 为泥岩埋藏深度(m)。 Δt_0 的理论值为620~650 $\mu s/m$,某一地区的 Δt_0 值可根据该地区多口井正常压实曲线外推至地表平均求得。

当不整合面以下的地层压实规律未被改变时,岩石声波时差随深度变化存在的标准指数关系并不因为遭受过剥蚀而发生改变,通过对现有不整合面下未遭受剥蚀的地层的声波时差数据与深度数据的统计拟合,可以建立一条标准指数压实趋势曲线,将其外延至 $\Delta t = \Delta t_0$ 处即为古地表,古地表与不整合面之间的距离即为剥蚀厚度(图2)^[13]。

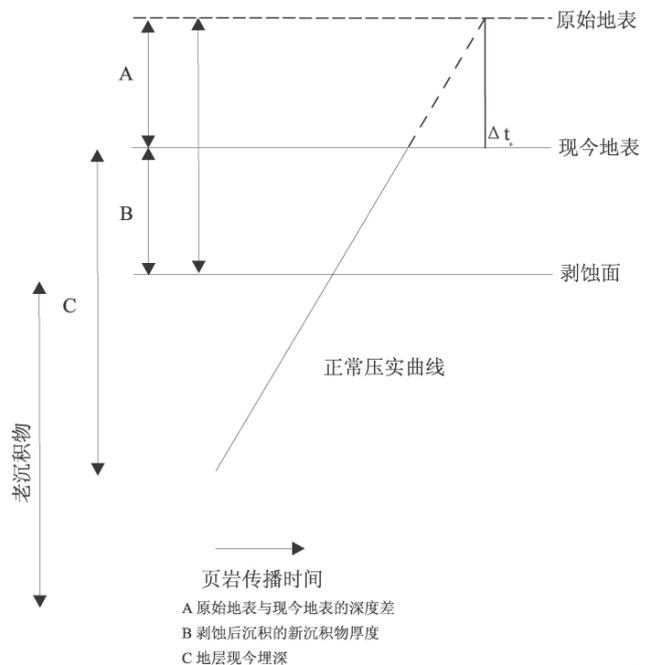


图2 声波时差法计算剥蚀量原理图(据王震修改,2004)

Fig. 2 Plot showing the principle for the erosion estimates by using sonic well logs (modified from Wang Zhen, 2004)

A. Depth difference between the original and present-day Earth's surface; B. Sediment thickness posterior to the erosion; C. Present-day burial depth of the strata

分析认为,能否根据压实规律来恢复剥蚀厚度,关键因素并非厚度,而是剥蚀面(不整合面)以下老地层的压实规律未被改变^[14]。

2.3 沉积速率法

该方法最早由 Van Hinte(1978)提出,其原理针对平行不整合,可根据不整合面上、下地层的沉积速率、剥蚀速率及地层的绝对地质年龄来研究和恢复剥蚀厚度。该方法应用的前提条件是要知道剥蚀面(不整合面)所代表的时限,在这个时限内有某一厚度的沉积物被剥蚀了。这段时限包括两部分:一部分是该厚度的沉积物沉积所用的时间;另一部分是该厚度的沉积物被剥蚀所用的时间。如果知道被剥蚀岩层的沉积速率和不整合上、下岩层的绝对年龄,就可以计算出被剥蚀掉的沉积物厚度^[15,16]。国内许多学者也对沉积速率法做了很多有价值的探索性研究^[17-19],如姜素华等(2007)提出波动分析约束下的沉积速率法;谭思哲等(2010)应用该方法对准噶尔盆地白家海凸起侏罗系顶部剥蚀厚度的恢复,取得了良好的效果^[20]。根据研究区不同的资料获取情况结合地质模型的建立,可将沉积速率法归纳为以下两种类型:

(1)沉积速率比值法:基于地史沉积过程中沉积特征的继承性和相似性进行,假定相邻点的沉积速率比值相等来对剥蚀厚度进行估算;设沉积速率比值为 P 、 A 点邻层的沉积厚度为 H_a ,沉积时间为 T_a ;计算层的沉积时间为 t_a ,残余厚度为 h_c ,则 A 点计算层的剥蚀厚度(h)为: $h = (P \times H_a \times t_a) / T_a - h_c$ 。

(2)沉积速率趋势法:根据沉积速率在横向上的变化具有一定趋势来对剥蚀厚度进行计算。设 A 点的沉积速率为 h/t , B 点的沉积速率为零,由此可以得到 C 点沉积速率的内插值,从而求得原始沉积厚度,再将其减去残留厚度,即为 C 点的剥蚀厚度。

应用上述两种方法恢复剥蚀厚度的优势在于其适用于不同的地质状况,可以不考虑沉积层的岩性,也可以不考虑后期沉积厚度是否大于剥蚀量,更不用考虑盆地内有多少个不整合面,因而适应性较强。但缺陷是地层的绝对年龄不易确定,同时构造活动强的地区该方法应用效果相对较差。

2.4 镜质体反射率法

目前具有代表性的利用 R_o 数值恢复剥蚀厚度的方法主要有4种:(1) R_o 差值法(Dow,1977);(2)最高古地温法(胡圣标等,1999);(3) R_o - TTI 法(陈增智等,1999);(4)趋势线外延法(佟彦明等,2005)。下面仅对 R_o 差值法和趋势线外延法这两

种具有代表性的方法进行简单介绍。

(1) R_o 差值法

1977年,Dow发现镜质体反射率在不整合面上下会发生突变,进而提出利用镜质体反射率差值来估算地层剥蚀厚度的方法。基本原理为假设下构造层没遭受剥蚀时,上、下两套地层连续沉积, R_o 值应该是连续的,构造层上下 R_o 的自然对数($\ln R_o$)与深度(H)应该呈一条线性关系。当遭受剥蚀时,将下构造层的 $\ln R_o$ - H 回归线段上延到与上构造层底界处的 R_o 值相等的地方,即上延到能够弥补上、下构造层 R_o 的差值处,就能找到下构造层未被剥蚀前的地表的位置(古地表),古地表与不整合面的深度差即为剥蚀厚度。

(2) 趋势线外延法

该方法由佟彦明于2005年提出,是对最高古地温法的改进,继承了最高古地温法的合理思想,简化了具体操作过程,增强了实用性。

基本原理可概括为:大量的事实表明,镜质体反射率 R_o 与深度 H 之间一般存在指数回归关系式:

$$R_o = ab^H \quad (1)$$

式中 R_o 为在深度 H 处的镜质体反射率, a 、 b 为常数。将(1)式进行对数变换,可得到下式:

$$\ln(R_o) = c + dH \quad (2)$$

式中 c 和 d 为常数,(2)式表明镜质体反射率(R_o)的对数与埋藏深度(H)之间为一直线方程关系。

正常连续沉积情况下,埋藏深度(H)与地层温度(T)之间存在正线性相关关系,即使地层整体抬升遭受剥蚀时,因为 R_o 值已记载下了剥蚀前该套地层所达到的最高温度的信息,并且不可逆,所以用 R_o 值换算得到的 T_{peak} 是该套地层剥蚀前的温度, T_{peak} 与 H 之间仍应存在正线性相关关系:

$$T_{peak} = a_1 + b_1 H \quad (3)$$

(2)、(3)式说明 $\ln(R_o)$ - T_{peak} 的线性关系是可以被确定的。深度域上最终用最高古地温 T_{peak} 回归的线段 T_{peak} - H 总是应该相当于直接用 $\ln(R_o)$ 回归得到的线段 $\ln(R_o)$ - H 在平面内作一旋转和平移。因此直接将 $\ln(R_o)$ - H 线段外推至 $\ln(0.2)$ 处即可得到古地表的位置(古地表可近似地取定值 $R_o = 0.2\%$)然后就可用地表位置和剥蚀面位置的差值求得剥蚀厚度(图3)。

3 镜质体反射率法应用

剥蚀量恢复方法的选取不但要考虑方法适用

条件,也要视具体资料情况而定^[23]。本文根据资料收集情况,选用镜质体反射率趋势线法恢复东营组地层剥蚀厚度。

3.1 数据的选取

合理的选取镜质体反射率与深度数据是对剥蚀厚度进行恢复的前提条件,经过综合分析,笔者认为选取镜质体反射率数据时应注意以下几点:(1)首先确定 R_o 数值在不整合面上下存在不连续的突变,说明下伏构造层 R_o 值未被补偿,仍保存古沉积信息。并且这种突变是由于地层剥蚀引起的,因为断层、岩浆作用等都可以造成 R_o 数值的突变;(2)综合利用钻井、测井以及地震资料数据,确定不整合面的准确位置,以便求取正确的剥蚀厚度;(3)研究区要有大量的合理并且可用的 R_o 数据。

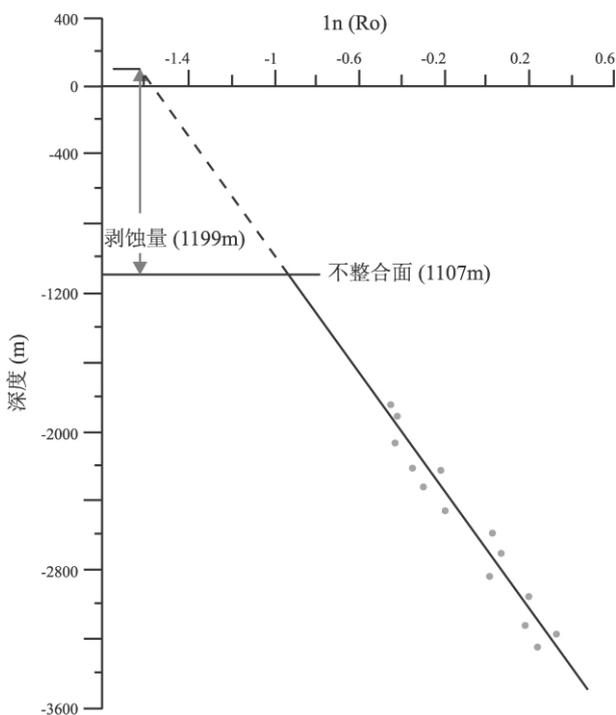


图3 镜质体反射率趋势线法剥蚀厚度恢复示意图(据程晓敢修改,2006)

Fig.3 Sketch to show the restoration of erosional thickness by using vitrinite reflectance trend method (modified from Cheng Xiaogan, 2006)

南堡凹陷缺乏足够的单井 R_o 数据,依据上述选取 R_o 数据的原则,选取了凹陷内高尚堡地区位置相邻的高3104、高3105、高17、高3102、高14、高10井东营组顶部不整合面下的数据(如表1)来对高尚堡地区东营组剥蚀厚度进行恢复。这6口井都位于高尚堡地区高柳断层以北,被凹陷的3条主控断裂:高柳断裂、柏各庄断层、西南庄断裂所围限,

位于同一个构造单元内,经历了相同的沉积与剥蚀史,因此可以近似的把这6口井的 R_o 数据与深度对应关系恢复到同一 R_o - H 关系图上来。

3.2 剥蚀厚度计算

根据钻井、地震、测井等资料进行综合分析可以判定:高3104、高3105、高17、高3102、高14、高10井东营组与馆陶组的分界线为一不整合面,东营组顶部遭剥蚀,不整合面深度为2070 m。

将表1中数据绘制于半对数坐标系中,并对不整合面以下地层的数据用线性函数进行拟合。将不整合面下部地层的 $\ln R_o$ - H 曲线反向延长,直到 R_o 值等于古地表 R_o 值的深度(取 $R_o = 0.2\%$),则该深度与不整合面深度的差值即为东营组剥蚀厚度。用镜质体反射率趋势线法经计算,求出东营组剥蚀厚度(H_e)为520 m,如图4所示。

表1 南堡凹陷高尚堡地区镜质体反射率与埋深数据表
Table 1 The vitrinite reflectances (R_o) and burial depths in the Gaoshangpu region, Nanpu depression

井位	深度(m)	R_o (%)
高3104	2650	0.44
高3104	2746	0.52
高3104	2845	0.54
高3104	2974	0.61
高3104	3081	0.59
高3105	2740	0.46
高3105	2912	0.59
高3105	2996	0.59
高3105	3204	0.60
高3105	3348	0.66
高17	2870	0.54
高17	2975	0.54
高3102	3351	0.69
高14	3432	0.83
高10	2953	0.62

3.3 计算结果

通过上述方法可以得到南堡凹陷东营组在不同构造单元的剥蚀厚度:柳赞构造带剥蚀617m;林雀次凹剥蚀293m;老爷庙构造带剥蚀323m;柳南次凹剥蚀145m。利用 R_o 镜质体反射率趋势线法,再综合地震、构造剖面图等资料,结合地层对比法和泥岩声波时差法,恢复出了约60个不同位置的剥蚀厚度估算值,经过综合分析,可以大致绘出南堡凹陷东营组遭剥蚀程度分布图(图5)。

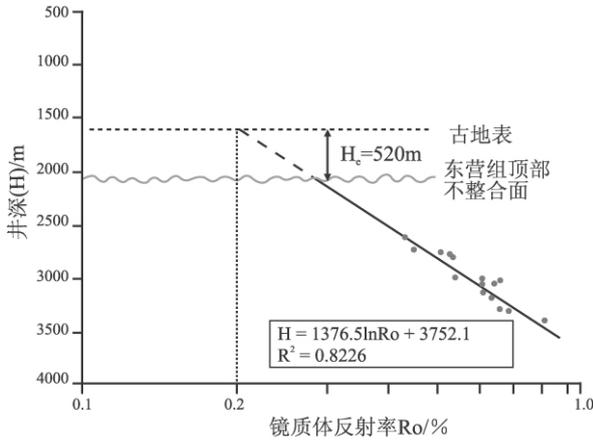


图4 镜质体反射率趋势线法计算剥蚀厚度

Fig. 4 Erosion estimates by using vitrinite reflectance method

如图5所示,南堡凹陷高柳地区东营组剥蚀厚度最大,老爷庙、北堡地区次之,中心凹陷地区最小。高柳地区,位于高柳断层以北的高尚堡地区,剥蚀严重区域剥蚀厚度达到了500m以上,柳赞地区剥蚀厚度达到了600m以上。高柳断层以南剥蚀

厚度明显变小,一般小于300m。南堡中心凹陷地区林雀次凹、柳南次凹内,东营组遭剥蚀厚度最少,大部分地区只有百米左右甚至更少。

4 结论与认识

(1) 利用镜质体反射率法来求取剥蚀厚度的前提是选取合适的 Ro 数据,应综合分析研究区的地质特征,对数据进行分析,选取能反映镜质体反射率随深度变化规律 Ro 数据。

(2) 当缺乏足够的单井 Ro 数据时,对比分析相邻井位的地质特征,对于位于同一构造单元内、经历相同的沉积、埋藏史的不同位置数据可以整合利用以恢复剥蚀厚度,否则不能使用。

(3) 用镜质体反射率趋势线法恢复剥蚀厚度只能得到大概的估算值,其结果在缺乏资料时大多未经过压实校正,因此恢复的剥蚀厚度应该理解为最小剥蚀厚度。并且其结果的准确性受测试精度、数值选取等多方面地质和非地质因素影响。因此,应在研究区资料允许的情况下结合多种方法进行剥蚀

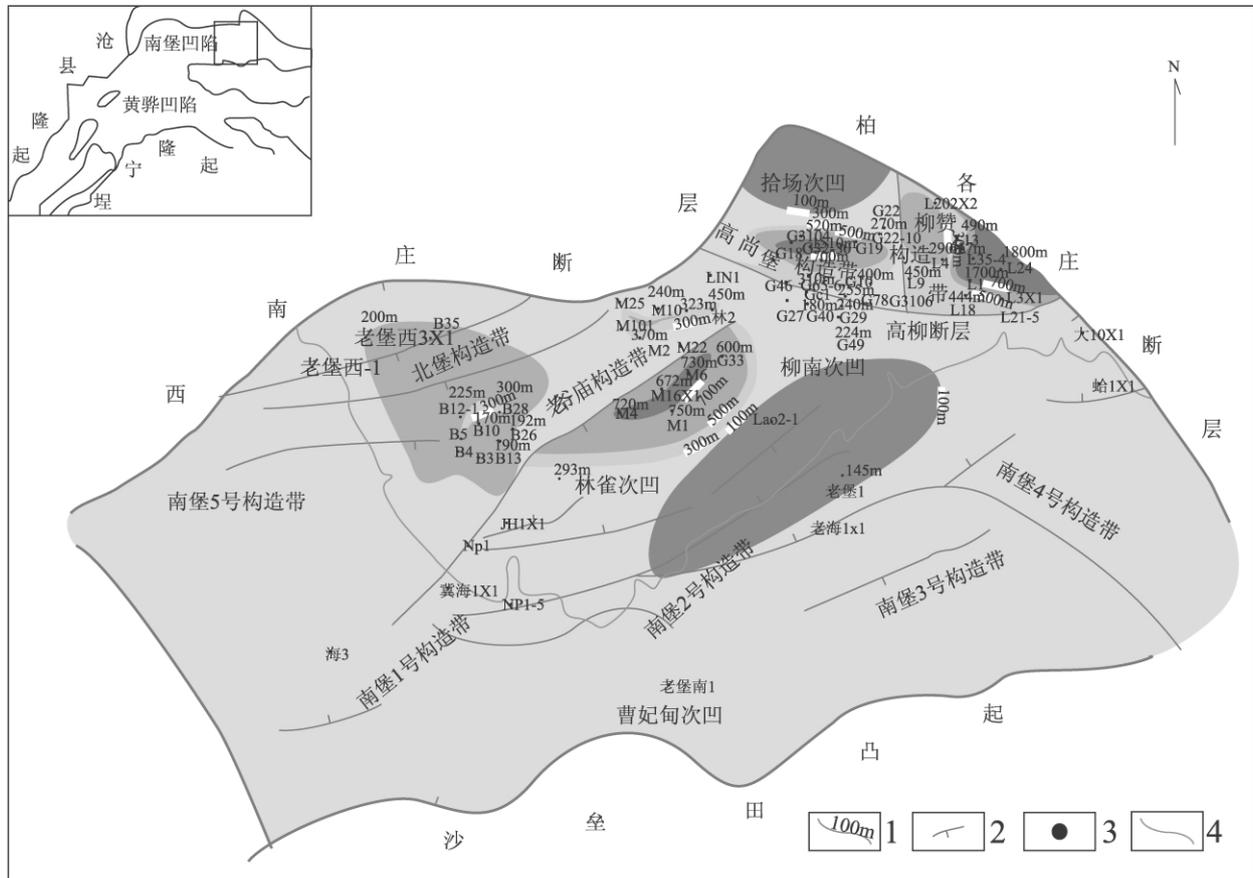


图5 东营组剥蚀厚度等值线图

1. 等值线; 2. 断层; 3. 井位; 4. 海岸线

Fig. 5 Contour diagram of the erosional thickness in the Dongying Formation

1 = contour line; 2 = fault; 3 = well site; 4 = coastal line

厚度的恢复与检验,找到最可信的剥蚀恢复厚度值。

(4)南堡凹陷东营组地层普遍遭受剥蚀,构造高部位(高柳地区)剥蚀量最大,中心凹陷区域(林雀、柳南次凹)剥蚀量小,总体呈北大南小、中心小四周大的特点。

参考文献:

- [1] MAGARA K. 压实与油气运移[M]. 北京:石油工业出版社,1981.
- [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] 刘景彦,林畅松,喻岳钰,等. 用声波测井资料计算剥蚀量的方法改进[J]. 石油实验地质, 2000, 22(4): 302-306.
- [4] 李伟. 恢复地层剥蚀厚度方法综述[J]. 中国海上油气, 1996, 10(3): 167-172.
- [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): 40-44.
- [6] 何生,王青岭. 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): 119-125.
- [7] 刘国臣,金之钧,李京昌. 沉积盆地沉积-剥蚀过程定量研究的一种新方法[J]. 沉积学报, 1995, 13(3): 23-32.
- [8] 张一伟,李京昌,金之钧,等. 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.
- [9] 胡少华. 基于地震资料的构造-沉积综合分析法-一种剥蚀厚度恢复新方法[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(4): 478-483.
- [10] 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.
- [11] 郑朝阳,罗秋霞. 应用计算机模型恢复盆地的热演化史[J]. 石油实验地质, 1991, 13(4): 380-389.
- [12] 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.
- [13] 王震,张明利,王子煜,等. 东海陆架盆地西湖凹陷不整合面剥蚀厚度恢复[J]. 石油实验地质, 2005, 27(1): 90-93.
- [14] 牟中海,陈志勇,陆廷清,等. 柴达木盆地北缘中生界剥蚀厚度恢复[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(1): 90-93.
- [15] 庞雄奇. 地质过程定量模拟[M]. 北京:石油工业出版社, 2003. 120-138.
- [16] GUIDISH T M. Basin evaluation using burial history calculations: an overview [J]. AAPG Bulletin, 1985, (1): 92-104.
- [17] 曹强,叶加仁. 沉积盆地地层剥蚀厚度恢复方法及进展[J]. 中国石油勘探, 2007, (6): 42-45.
- [18] 姜素华,许新明,等. 波动分析约束下的原型盆地剥蚀量恢复-以惠民凹陷为例[J]. 中国海洋大学学报, 2007, 37(4): 643-644.
- [19] 郭飞飞,曹强,唐文旭,等. 南黄海北部盆地东北凹陷地层剥蚀厚度恢复[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(5): 101-103.
- [20] 谭思哲,王振奇,等. 准噶尔盆地白家海凸起侏罗系顶部剥蚀厚度恢复[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(1): 20-21.
- [21] DOW W G. Kerogen studies and geological interpretations: Journal of Geochemical Exploration, 1977, 7(1): 79-99.
- [22] KATZ B J, PHELPER R N, SCHUNK D J. Interpretation of Discontinuous Vitrinite Reflectance Profiles [J]. AAPG Bulletin, 1988, 72(8): 926-931.
- [23] 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): 11-13.

An application of the vitrinite reflectance trend method to the restoration of erosional thickness in the Dongying Formation, Nanpu depression

PENG Qing-hua¹, ZHOU Jiang-yu², JIE Yi-xin²

(1. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, Sichuan, China; 2. Faculty of Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: The present paper deals with the application of the vitrinite reflectance trend method to the restoration of erosional thickness of the Dongying Formation in the Nanpu depression. The prerequisite for this method is the selection of suitable Ro data for a single well. Otherwise, the Ro data for different wells in the same burial history and same tectonic unit may also be available as well. The results of research in this study result in the construction of the contour diagram for the erosional thickness in the Dongying Formation. The erosional strength may be discriminated into two parts: relatively strong in the northeastern part and weak in the central part of the Nanpu depression.

Key words: Nanpu depression; erosional thickness; vitrinite reflectance; Dongying Formation