

张顺, 陈世悦, 吴智平, 等. 常用剥蚀厚度恢复法在东营凹陷南坡西部“红层”的应用[J]. 中国地质, 2015, 42(2): 720–736.

Zhang Shun, Chen Shiyue, Wang Yongshi, et al. The application of the erosion thickness restoration method to red beds in the western part of the south slope in Dongying Depression[J]. Geology in China, 2015, 42(2): 720–736(in Chinese with English abstract).

常用剥蚀厚度恢复法在 东营凹陷南坡西部“红层”的应用

张 顺¹ 陈世悦¹ 吴智平¹ 王永诗² 李 伟¹ 罗 阳¹ 侯旭波³ 张 林⁴

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 中石化胜利油田地质科学研究院, 山东 东营 257022;
3. 中石化胜利油田西部新区研究中心, 山东 东营 257022; 4. 中石化胜利油田物探研究院, 山东 东营 257022)

摘要: 东营凹陷南坡西部是指东营凹陷南坡石村断层以西的部分, 孔店期—沙四早期沉积主要是以红色陆相碎屑岩为主的地层, 即为通常所说的“红层”。受后期构造活动的影响, 沙四下—孔—地层遭受不同程度的剥蚀, 根据剥蚀厚度恢复方法的应用结果及适用性分析认为: 厚度趋势法主要用于对剥蚀厚度区间和剥蚀范围进行标定, 选用泥岩声波时差法和沉积速率比值法对剥蚀厚度数值的区间进行厘定。在凸起区及纯化构造带“红层”顶部削截明显区可直接使用厚度趋势法; 靠近林南断层上升盘和高青平南断层上升盘的区域, 选用声波时差法恢复“红层”顶部剥蚀厚度的效果好于其他构造带; 平方王潜山构造带优选沉积速率法恢复“红层”尤其是沙四下亚段剥蚀厚度; 优化的孔隙度法适合对孔隙度较大凸起区的沙四下亚段剥蚀厚度进行较为准确的标定; 包裹体测温法和镜质体反射率法的恢复结果为少数单井数据点, 仅作参考。

关键词: 东营凹陷; 不整合; 剥蚀厚度; “红层”

中图分类号: P512.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)02-0720-17

The application of the erosion thickness restoration method to red beds in the western part of the south slope in Dongying Depression

ZHANG Shun¹, CHEN Shi-yue¹, WU Zhi-ping¹, WANG Yong-shi²,
LI Wei², LUO Yang¹, HOU Xu-bo³, ZHANG Lin⁴

(1. College of Geo-Resources and Information, China University of Petroleum, Qingdao 266555, Shandong, China;
2. Geophysical Research Institute of Shengli Oilfield, Dongying 257022, Shandong, China; 3. Research Center of New District in West China of Shengli Oilfield, Dongying 257015, Shandong, China; 4. Geological Scientific Research Institute of Shengli Oilfield, Dongying 257015, Shandong, China)

Abstract: The sedimentary rocks from Kongdian Formation to the early period of the fourth member of Shahejie Formation in the western part of the south slope of Dongying Depression consist of a set of red beds mainly comprising red terrestrial clastic

收稿日期: 2014-04-15; 改回日期: 2014-09-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372107)和国家重大油气专项课题(2008ZX05006)联合资助。

作者简介: 张顺, 男, 1985年生, 博士生, 研究方向为沉积学及储层地质学; E-mail: satisfactoryshun@163.com。

sediments. Based on an analysis of applicability of erosion thickness with different restoration methods and a comparative evaluation of different methods for restoring erosion thickness, the authors have found that the tectonic cross section method can be mainly used to define the erosion thickness interval and eroding range of calibration, the mudstone acoustic time and deposition rate method is suitable for the identification of the numerical interval of erosion thickness, the acoustic interval transit time method is better than other methods in the area near the uplifted block of Linnan fault and Gaoqingpingnan fault, the optimization deposition rate method is better than other methods in Pingfangwang area, and the optimized porosity method is more accurate in the red layers, especially in the lower member of E_{s4} formation. The results from inclusion thermometry testing method and vitrinite reflectance method can only be regarded as the single well data points for reference.

Key words: Dongying Depression; unconformity; erosion thickness; red beds

About the first author: ZHANG Shun, male, born in 1985, doctor candidate, majors in sedimentary and reservoir geology; E-mail: satisfactoryshun@163.com.

东营凹陷是济阳拗陷内最大的次级负向构造单元。东营凹陷南坡西部即是凹陷南部向洼陷过渡区中石村断层以西部分,具体指东至博兴洼陷,西抵惠民仁风潜山带,北起林樊家低凸起,南达鲁西隆起的范围(图1)。其中青城凸起、博兴洼陷、林樊家低凸起、平方王潜山构造带及纯化草桥鼻状构造带(简称纯化构造带)为本文重点研究区域。孔店期—沙四早期,在走滑拉分构造格局下^[1],东营凹陷沉积了一套干旱气候条件下以红色(紫红色)为主色调的洪水漫湖沉积,通称“红层”。主要发育砂岩、砂质泥岩、泥页岩、膏岩及玄武岩,总体呈砂泥岩互层的特征^[2]。多年的勘探实践表明,该层系具有良好的油气显示和勘探前景。红层沉积后,在后期构造活动作用下,地层在不同构造部位产生了不同程度的剥蚀(红层内部亦存在剥蚀)。剥蚀厚度的求取一直是地质研究中的难点和热点,在不整合识别以及构造期次划分的基础上求取地层的剥蚀厚度是原型盆地格局恢复的关键,也是进行油气演化史、流体运移、油气成藏等研究的基础。前人对东营凹陷红层的研究多集中在红层的划分、古沉积环境、储层特征以及工程地质等方面^[2-7],专门针对东营凹陷南坡西部红层剥蚀厚度的研究较为匮乏。

东营凹陷南坡西部孔—沙四下地层剥蚀存在强度和地区的明显差异,现今构造面貌不能反映红层沉积时期的构造格局。在现有的诸多求取剥蚀厚度的方法中,尚无一种成熟有效的方法可以精确恢复所有地质条件下地层的剥蚀厚度,因此要运用多种方法并相互验证。结合工区地质资料的掌握情况,本文选用厚度趋势法、泥岩声波时差法、沉积速率比值法、地热法及优化的孔隙度法等几种常规方法针对“红层”进行剥蚀厚度恢复,选定部分井位作为控制剥蚀厚度

的数据点,尽量实现固定井点的多方法求取,从而实现方法和结果的对比与评价。

1 剥蚀特征分析

1.1 剥蚀面的识别

辨识不整合面是恢复剥蚀厚度的前提。识别不整合面的方法有很多,包括地质现象法(沉积、构造标志,古生物识别标志、岩浆活动和变质作用标志等)、地震地层学法、测井曲线法、地热学法等^[7-9]。根据东营南坡西部红层横向厚度变化大、岩性变化快、缺乏化石等特征,本文主要采用地震地层学法、测井曲线法进行不整合面的判断和识别。方法及原理在此不作赘述。地震剖面揭示,红层层系与上覆地层和下伏地层呈不整合接触,红层层系内部在部分构造带也存在剥蚀,即孔一段与沙四下亚段之间的剥蚀面,但该剥蚀面在地震剖面上较难识别,区域性较差。利用泥岩声波时差趋势线的变化来识别和分析沉积间断(图2)。

1.2 剥蚀范围及特征

红层沉积时期处于中生代NW向控盆断裂体系向古近纪NEE向控盆断裂体系演化的过渡阶段,沙四上—东营组断裂体系和新近纪断裂体系将红层切割改造^[10-11]。在地震精细解释的基础上,利用凸起区及其与周边地层的地震反射资料,结合断层活动性,进行平衡剖面分析,对东营凹陷西部内部及周边的鲁西隆起、林樊家低凸起、青城凸起的形成时间进行了确定,从而更好地说明构造活动对红层沉积和剥蚀的控制作用,圈定剥蚀范围。

1.2.1 平衡剖面分析

从断层活动、地层剥蚀角度,选取过青城凸起

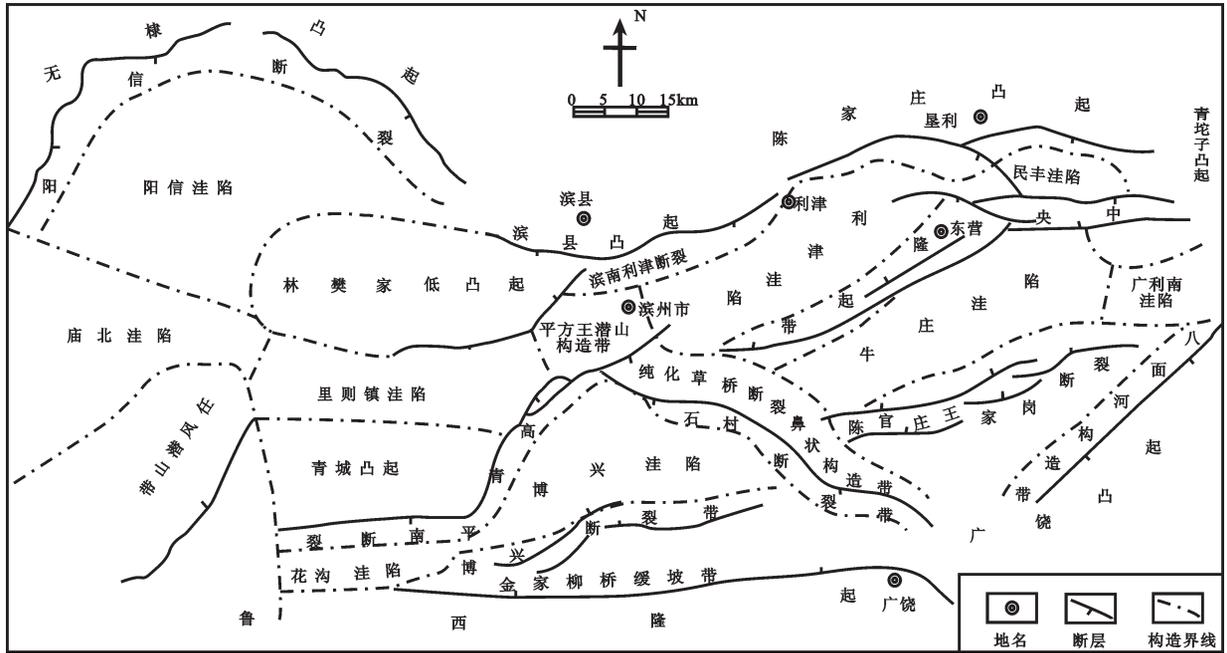


图1 东营凹陷构造位置及主要构造单元

Fig.1 Structural location and major structure units of Dongying Depression

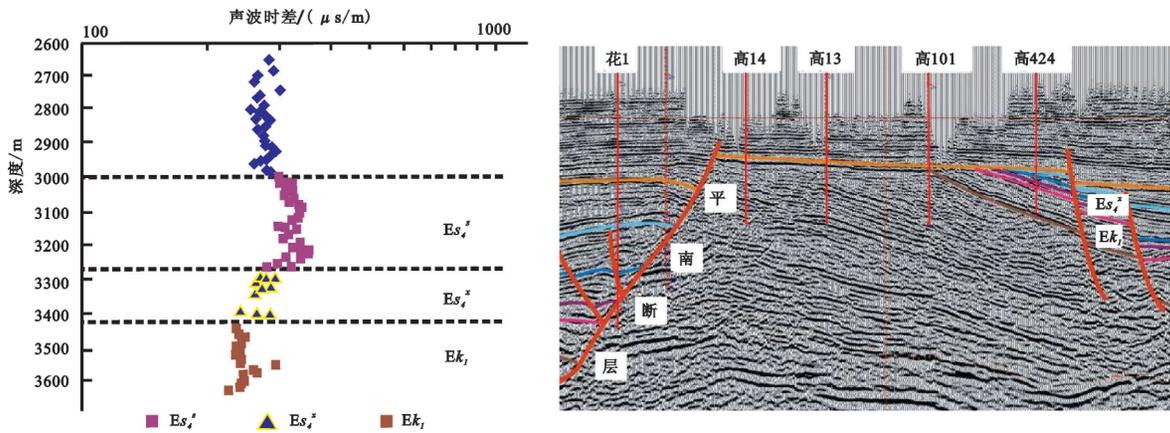


图2 测井曲线法(高942井)及地震地层学法识别孔一段—沙四下不整合面

Fig.2 Identification of unconformity surface by sonic-logging curve method and seismic stratigraphy method

(过花14井—林28井南北向测线)和林樊家低凸起(南北向I-850测线构造演化剖面)的南北向测线构造演化剖面进行平衡剖面分析。青城凸起区地层主要为近东西向展布,主体为馆陶组,与中生界不整合接触,孔店—沙四下地层无沉积,近洼陷处孔店—沙四下地层削截。孔店—沙四下时期,青城凸起处于斜坡位置,接受了较薄的“红层”沉积;沙四上时期,花沟断层开始活动,导致沙四下—孔一段地层发生倾翘、剥蚀;沙三—东营期,花沟断层继续

沉降,上盘沉积了沙二—沙三组地层,下盘继续遭受剥蚀(图3)。沙四上沉积时期之前林樊家地区地层平缓,低凸起尚未形成,控制林樊家地区的林南断层在沙三期才开始明显活动,上盘地层翘倾开始遭受剥蚀;沙一期,随着断层活动,沙四下—孔店地层顶部大面积被剥蚀,到东营期末,沙四下地层几乎没有残留(图4)。博兴洼陷属于构造活动相对稳定区,中生代以来一直是南坡的沉积中心。进入沙四晚期,靠近洼陷西部的次级断裂开始发育,控制

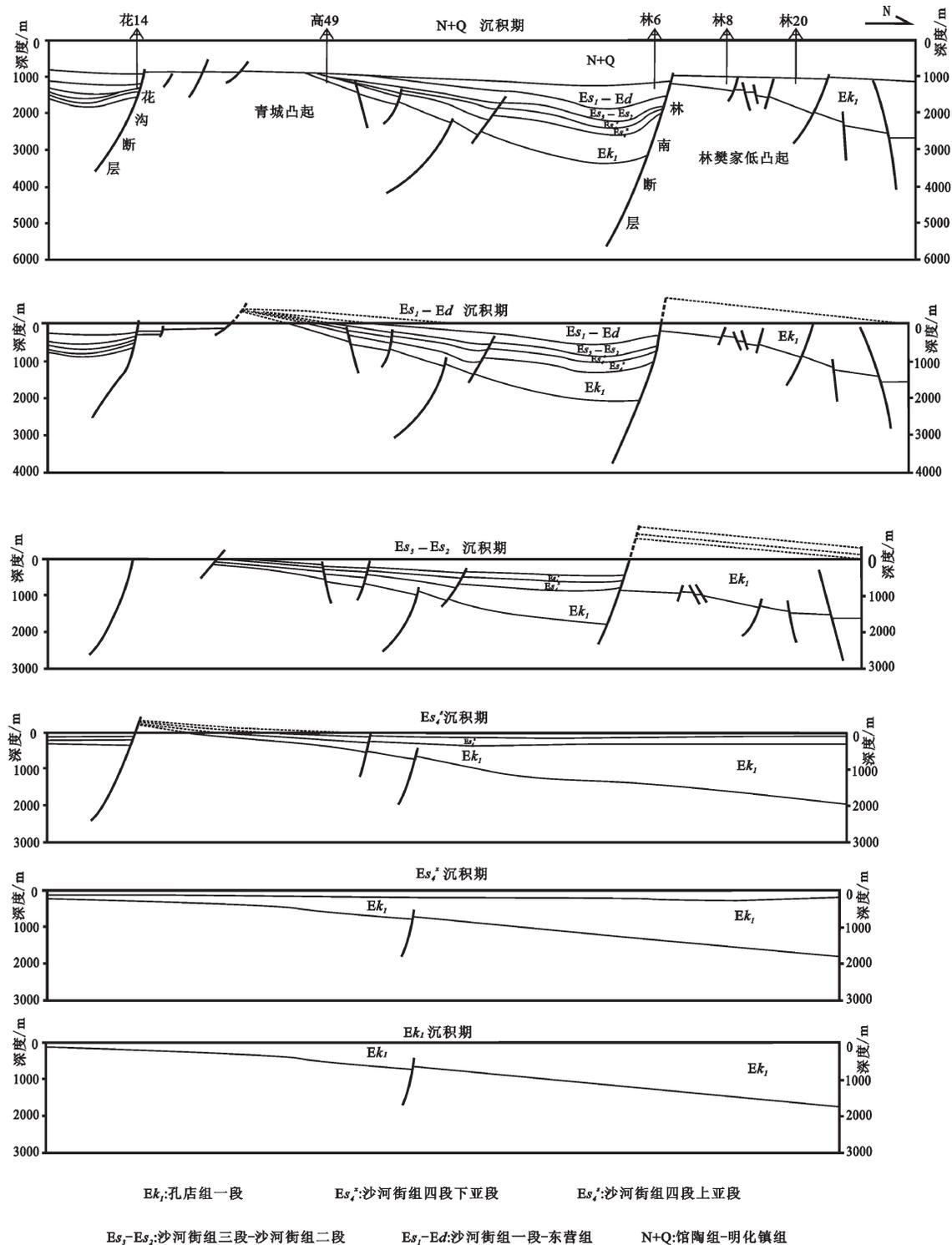


图3 过花14井—林28井南北向测线构造演化剖面

Fig.3 The structural evolution section of Well Hua14–Well Lin28 along NS-trending survey line in the western part of the south slope, Dongying Depression

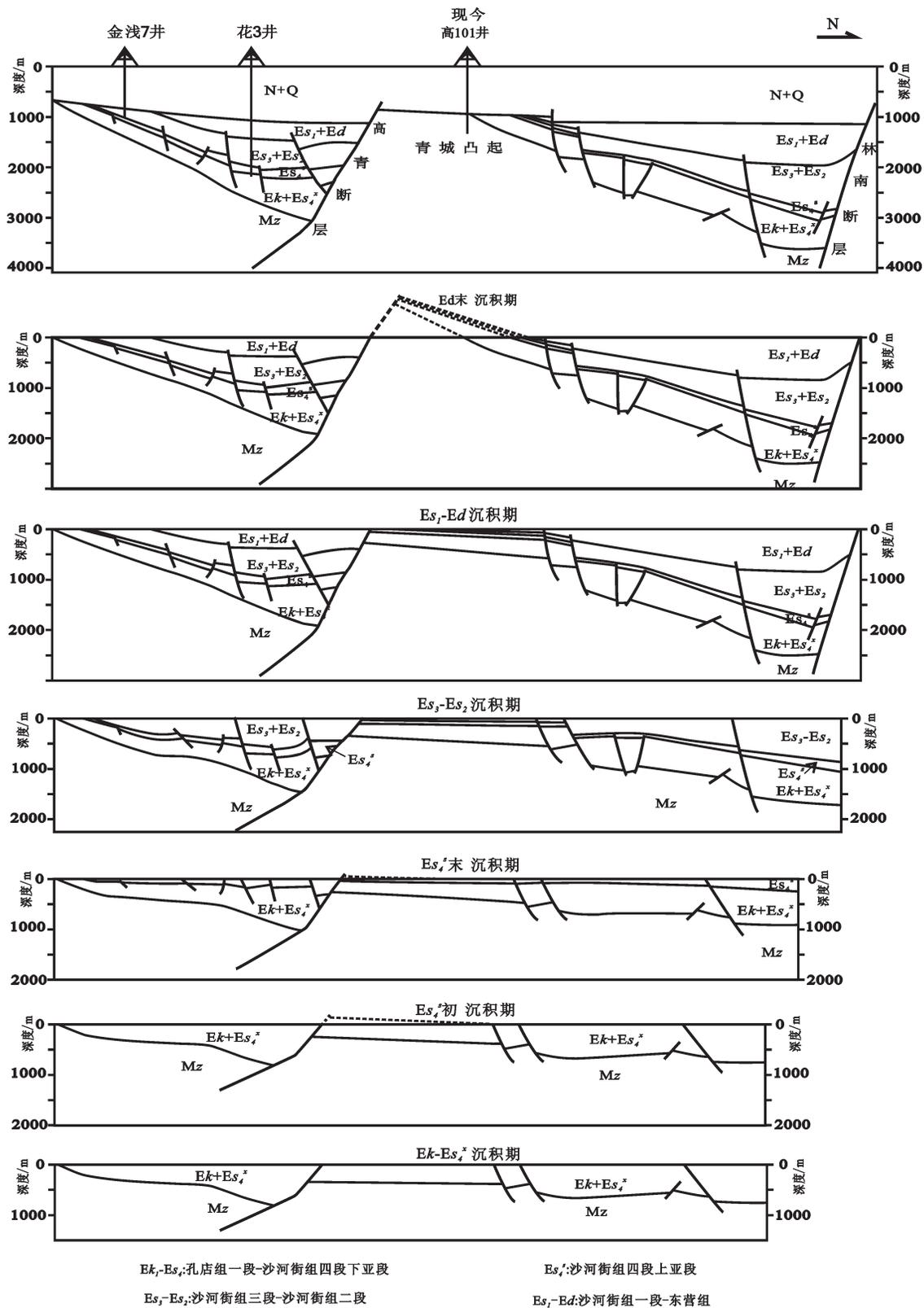


图4 南北向I-850测线构造演化剖面

Fig.4 Structural evolution section of NS-trending I-850 survey line, Dongying Depression

了之后地层的沉积。从孔店期到沙四早期,形成了石村断层下降盘和高青—平南断层下降盘的一小一大2个次级沉积中心。

1.2.2 剥蚀范围及特征

结合该区构造特征和现今残留地层的发育特征的研究,依据地震剖面上同相反射轴的截、超关系,可以大致圈定剥蚀范围及特征。通过地震解释剖面可知,断块剥蚀和坳垒剥蚀是东营凹陷南坡西部红层最主要的剥蚀类型^[12-13]。综合剥蚀间断面的判识、平衡剖面分析以及构造控制作用分析,总体看,沙四下地层在全区分布相对稳定,在林樊家低凸起上被剥蚀殆尽,红层顶部反射轴削截明显;沙四下亚段内部的次一级不整合面在测井曲线上表现不明显,不具有全区稳定的可对比性。这些都说明了沙四下地层与其上部地层呈角度不整合接触,而孔店—沙四下地层内部则不具有明显的全区性的不整合。

孔一地层在平方王潜山地区普遍遭受剥蚀,而博兴洼陷和林樊家低凸起区孔一地层发育较完整,从测井资料上可以区分出两个明显的次级不整合

面。地震资料上,孔一地层顶部被削截,底部与中生界呈角度不整合接触。在地震精细解释的基础上,结合断层活动性分析和平衡剖面分析,对东营凹陷西部内部及周边的鲁西隆起、林樊家低凸起、青城凸起的形成时间进行了确定。其中,鲁西隆起、平方王潜山、纯化构造带形成于“红层”沉积前;林樊家低凸起及青城凸起形成于红层沉积之后。

结合埋藏史分析可发现,东营凹陷“红层”的剥蚀在时间上具有分期性(图5):青城凸起和林樊家低凸起在红层沉积后到东营期长期处于剥蚀状态;纯化构造带受到红层沉积后的剥蚀作用,沙四晚期之后处于沉降状态;缓坡地区受到凸起形影响,各个时期均存在剥蚀与沉积共存的状态。

2 剥蚀厚度恢复法的应用

因为与沉积盆地油气勘探密切相关,恢复地层剥蚀厚度的研究和探讨一直是地质学领域关注的热点;残留地层保存的地质信息有限,且剥蚀的起止时间、次数均难以确定,剥蚀过程复杂、受影响因素(压实、塑性变形、构造切割和破坏)较多等,因此

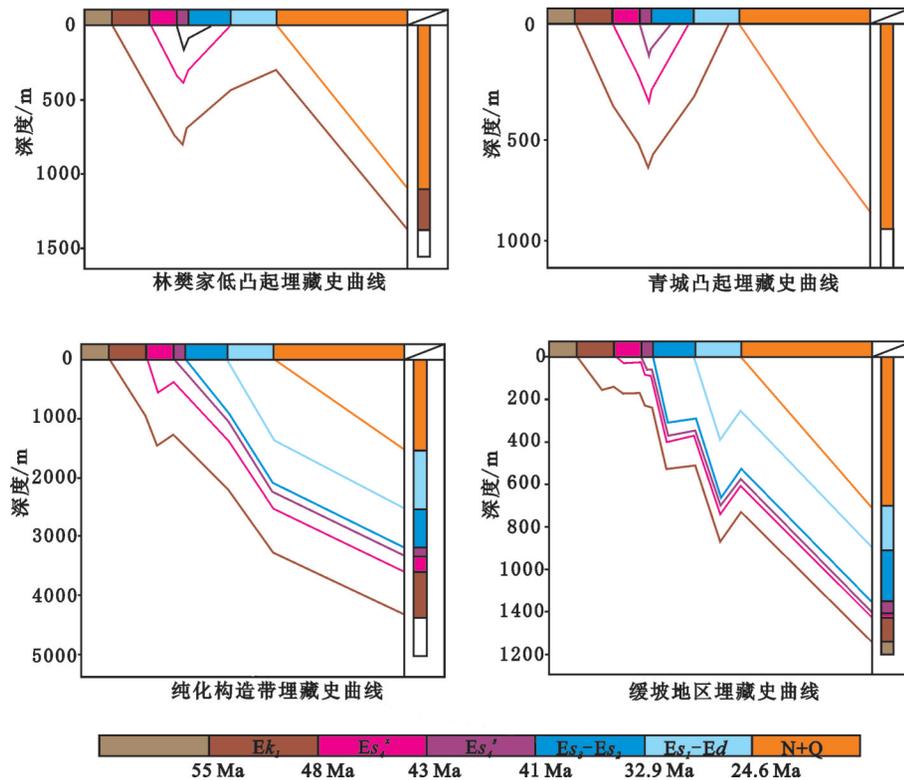


图5 各构造单元埋藏史曲线
Fig.5 Burial history curve of various structural units

剥蚀厚度的恢复一直是地质研究中的难点^[14-25]。目前恢复剥蚀厚度的方法种类较多,归结起来,主要有:①地质分析对比法:厚度趋势法即地层对比法、沉积速率法、波动方程分析法;②地球物理法:测井技术法(泥岩声波时差法)、孔隙度法;③地热法:基于古温标的镜质体发射率法和包裹体测温法;④地球化学法:天然气平衡浓度法、宇宙成因核素法等。如何针对研究区孔—沙四下地层(“红层”)进行剥蚀厚度恢复,以及具体到不同构造部位、不同层段用哪种方法更为准确,是本论文探讨的重点。

结合研究区实际资料和测试结果,选取厚度趋势法、泥岩声波时差法、沉积速率法、地热法分别求取红层的剥蚀厚度。重点在根据沉积构造背景和实际情况,分别对不同方法的适用性进行分析,选取重点井位区域对不同方法恢复剥蚀厚度的结果进行了对比验证、取值及评价。

2.1 厚度趋势(外延)法

地层的沉积厚度在同一层系内具有连续性和持续性。通过地震资料识别不整合及确认消蚀点,再结合构造横演化剖面揭示的特定地质时期的构造特征,可以依据保存完整的地层界面的走向和延伸趋势来推算上覆沉积厚度,这便是地层厚度趋势(外延)法,也叫地层对比法。前人对东营凹陷西部的构造特征研究(构造样式,断裂发育特征等)较为深入。沙四下—孔—地层主要发育顺向和反向翘倾断块,其次是“Y”字型组合、堡垒组合等,用该方法恢复剥蚀厚度,恢复的剥蚀厚度相对准确(如青城凸起区域性的角度不整合)。而对于控盆边界断层,由于断距较大,上下盘残留地层厚度相差很大,利用现今地震地质解释剖面难以直接恢复剥蚀厚度,此时要通过平衡剖面技术恢复出某地质时期断层面上盘的剥蚀厚度(如过花14井—林28井南北向地震剖面及平衡剖面)。总体上,该方法操作方便且便于宏观把握全区的剥蚀范围及特征。

以I-850测线为例(图4):凸起区沙四下—孔—地层存在明显剥蚀,结合井震资料,可根据邻近区内未遭受剥蚀处地层特征和产状及其变化趋势,曲线拟合得到地层厚度大致的变化趋势及最大剥蚀厚度点位于高101井附近,约300 m。纯化构造带靠近石村断层上升盘区域,红层有一定程度的剥蚀。

由于不同岩性在沉积成岩过程中的压实程度不同,因此运用该方法一定要注意剥蚀厚度的去压实校正(压实系数见表1),使恢复的剥蚀厚度更加客观且具有时间和空间意义。

2.2 泥岩声波时差法

声波时差方法使用方便,估算起来比较简单,原理不做详述。用声波时差法求取地层剥蚀厚度的前提是:泥岩沉积物压实之后不发生回弹。红层中的矿物成分大多数是硬度并不大的粘土矿物和云母等,相对于其他岩层,红层在地质演化过程中易产生塑性变形。因此,单就矿物硬度而言,泥岩声波时差法适用于红层地层的剥蚀厚度的恢复。

相关学者对泥页岩声波时差与深度模型做了有益的探讨,笔者对比了传统指数模型与刘景彦模型^[24-26],系统读取了30口井的泥岩声波时差数据。排除连续沉积假象及剥蚀面之下地层欠压实的情况,选取其中压实曲线偏移明显且拟合结果较理想的井位作为数据点来恢复剥蚀厚度。

要明确剥蚀前地层的压实效应是否被后来沉积的地层所改造,这是使用泥岩声波时差法的关键^[27]。因此,在适当的条件下,声波时差法也可能适用于地层沉积厚度过补偿的情况,这一观点逐渐被认可。虽然上覆地层的厚度不是声波时差方法适用与否的决定性因素,但根据30口井声波时差曲线的拟合效果来看,上覆地层过厚难免产生压实改造,这也给泥岩声波时差趋势线的准确拟合带来了困难。凸起区地层剥蚀强烈,上覆地层厚度较薄,残留地层及中生代地层与上覆馆陶组地层多呈明显角度不整合接触,并且相对于持续接受沉积的洼陷区而言,凸起区剥蚀面之下地层的压实效应不容易被上覆地层改造。因此在青城凸起和林樊家低凸起,声波时差趋势线会出现明显跳跃,恢复的剥蚀厚度结果也较理想(图6-a)。在其他构造带尤其是博兴洼陷,声波时差恢复剥蚀厚度适用性差(图6-b,金32井)。如博兴洼陷柳参2井的恢复结果均过500 m,这对于原本剥蚀厚度非常小的洼陷区来说明显不合理。

2.3 沉积速率法

依据不整合面上下地层的沉积速率及绝对年龄计算地层剥蚀量,具体可分如下3种情形进行处理(图7)。沉积速率的确定有2种方法:沉积速率趋

势法和沉积速率比值法。沉积速率比值法的依据是地史过程中沉积特征的继承性和相似性;应用前提是:地层的确遭受剥蚀,且被剥蚀地层的沉积速率以及剥蚀面上下沉积地层的绝对年龄均已明确。因此,要根据东营南坡西部红层井位的钻穿钻遇情况,评价该方法在东营凹陷南坡西部红层的适用性。这对于适用于单井计算剥蚀厚度的沉积速率法尤其重要。

以平方王潜山梁902井为例计算地层剥蚀厚度:孔店期一沙四早期,梁902井位于平南断层上升盘,构造位置属梁902断块,为相对构造高部位,因此沙四下地层顶面的剥蚀厚度为: $He_{\text{沙四下}} = [(V_{\text{沙四上}} + V_{\text{孔一}})/2] \times [(T_{\text{沙四下}} - T_{\text{沙四上}})]/2 = [(32.33 + 47.73)/2] \times [(50.5 - 45.4)]/2 = 100(\text{m})$ 。

按照该方法,在林樊家低凸起、青城凸起、平方王潜山等构造带选取有代表性的井(沉积速率见表2~4),计算其剥蚀厚度。除了平方王潜山构造带,研究区多数井未钻穿沙四下一孔一地层,因此无法计算红层底部不整合面(孔一地层与下伏地层)之下地层沉积速率,很多井只能参照前人^[28-29]的计算结果,或者是统一采用研究区平均沉积速率值对剥蚀厚度进行求取,这种人为的估算大大降低了红层层系尤其是孔一段的剥蚀厚度结果的准确性。

2.4 地热法

2.4.1 镜质体反射率(R_o)法

镜质组反射率(R_o)是衡量烃源岩有机质热演化程度的重要指标,对于一套连续沉积的地层而言, R_o 是地温梯度和沉积速率的函数^[30-31]。倘若地层遭受剥蚀,在半对数直角坐标系下,将剥蚀面之下地层中 R_o 的趋势线上延到能够弥补上下构造层 R_o 的差值处(即 R_o 相等的深度),就可以找到地层未被剥蚀前地表的位置——这就是Wallace G. Dow于1977年提出的该方法的基本原理^[32]。

陈增智、胡圣标(1999)、胡胜彪、佟彦明(2005)改进了该方法^[33-34],提高了 R_o 法的适用性(外推法、古地温梯度法和等效深度法)。佟彦明^[33]指出,改进的方法在本质上和真柄钦次利用声波时差恢复剥蚀厚度的原理是一致的:只要剥蚀面之下地层没有被压实补偿,即可通过残留地层的数据找到古地表的位置,再结合不整合面的位置进而算出剥蚀厚度。将剥蚀面下斜率未改变的分支成熟度剖面正

向延伸到古地表附近的最小 R_o (通常认为该值介于0.18~0.20)处,那么该点所对应的深度就是地层在未遭受剥蚀之前古地表的位置,它与剥蚀面对应的深度值之间的差值就是地层的剥蚀厚度。

林樊家低凸起区林30井红层顶部剥蚀面深度为1069 m,结合地震解释剖面,该井附近区域沙四下亚段全部剥蚀殆尽,部分孔一地层被剥蚀。将表2中 R_o 值和对应深度值绘制于半对数坐标系中并进行拟合,绘制出 R_o-H 趋势线,并将其反向延伸至与 $R_o=0.2\%$ 的网格线相交,在坐标系图中标出剥蚀面的位置,用图解法求出剥蚀厚度为300 m厚度(图8)。将此结果换算成沙四下一孔一地层沉积时期的去压实剥蚀厚度,乘以地层的压实系数1.363,地层的剥蚀厚度为409.0 m。

2.4.2 包裹体测温法

利用流体包裹体求取地层剥蚀厚度主要是利用包裹体的形成具有不可逆性这一特点,其原理与镜质体反射率法类似。计算地层剥蚀厚度时,需要现今地表温度以及古地表温度^[35-36]。综合前人对于东营凹陷地区的研究,取东营凹陷现今地表温度平均数值20℃。

纯化构造带官113井红层与上覆地层之间剥蚀面深度为2480 m,红层内部不存在剥蚀证据。回归法所拟合出的延伸直线斜率的倒数即为地温梯度,因此可以求出官113井附近区域的孔店一沙四下地层在剥蚀之前的地温梯度0.0311℃/m,这与前人在该区域所得的地温梯度数值吻合,选择温度为20℃与不整合面深度2480 m作为交汇原点(图9)。拟合出的直线延伸与深度坐标交于2430 m处,因此2430 m便是红层在未遭受剥蚀之前地层顶面的埋深,相当于古地表。深度差值为50 m,即为沙四下地层的剥蚀厚度。

在数据点非常少(甚至只有一个样品)无法实现多样品回归的情况下,可以通过简单的运算得到一个近似的剥蚀量。例如,青城凸起区高16井孔店组地层样品(紫红色细粉砂岩)埋深为2342.2 m,已经测定的样品均一温度为91℃,可以得到该包裹体样品的形成温度为106℃,在前人经验公式的基础上进行简单计算即可得到地层未遭受剥蚀时的埋深:

$$Da = \frac{T_a - T_o}{dT/dD}$$

式中: Da —未剥蚀时样品埋深(m); T_a —包裹体

表1 东营凹陷地层压实系数
Table 1 Coefficients of consolidation

井号	Nm	Ng	Ed	Es ₁	Es ₂	Es ₃	Es ₄ ^s	Es ₄ ^x	E _{k1}
青城凸起	高 63		5.41	3.73			52	59.6	60.59
	高 12	191.61	7.32		16.79	19.2		32.94	14.77
	高 6	229.35	17.27	28.8	42.5	23.12	104.7	31.67	4.51
	高 16		10.41	19.76	91.43	26.25	114.2	59.67	11.76
	高 424		10.05						29.43
	高 49	200.97	7.89						29.1
	高 55		9.28		33.93			24.3	24.4
	高 43		8.35		46.43			8.13	44.33
	高 425		5.1		26.79		13.61		32.16
	花 1	196.45	10.31	27.59	100	24.06	134.2	60	
	花 6	193.54	10.1		14.46				
	花 9	198.38	10.51	21.8	80	28.13	123	25.56	22.74
	花 10					63.75	56.87	24	
	花 14				41.79	25.94	32.19	20	11.96
	平均值	201.72	9.33	20.34	49.41	31.88	74.75	33.93	25.86
平方王 潜山构造带	滨斜 232						47	61.2	67.6
	梁 229	241.3	14	12	40.4	10.9	18.8	35	24.5
	梁 232		19.1	27.2	73.2			41.7	18
	梁 206	293.5	16.8	63.5	111	39.4	90.1	53	
	滨 25	248.7	18.1	54.3	81.6	25.5	113	43	7.5
	滨古 20	255	12	25	79		36.1	36.6	
	滨古 12		13	17	90		33.3	91.7	
	滨古 17		11	15	29	14	123	30	28.4
	滨 185	244.8	15	15	25	7.8	23.3	34.7	82.6
	滨 180	205.8	14	31	62	25.3		29.5	58
	梁 902		16	59	24		42.5	32.3	39.4
平均值	232	13.4	27.1	51.7	15.7	51.6	43.1	40	61.4
林樊家凸起	林 2		8.56						138.1
	林 4	34.38	9.71	2.17			6	8.43	131.8
	林 30								193
	林 1		9.69	20.84					
	林 6	346.7	9.74	30.9	46.43		79.17	18	13.57
	滨 306	233.55	10.34	20.3	52.86	22.66	78.47	37	16.86
	林气 2								133
	林 28		10.26						65.57
	林 23		9.48	1.93					
	林 100		9.79	1.93					
	滨 509	236.77	8.86		28.93		10.42	27.67	17
	滨 545	224.19	7.57	1.68					
	滨 546	222.25	9		26.78		12.5		11.37
平均值	199.64	9.37	11.39	38.75	22.66	45.14	22.17	13.45	111.7

注: Nm—明化镇组; Ng—馆陶组; Ed—东营组; Es₁—沙河街组一段; Es₂—沙河街组二段; Es₃—沙河街组三段; Es₄^s—沙河街组四段上亚段; Es₄^x—沙河街组四段下亚段; E_{k1}—孔店组一段。

样品的形成温度(°C); To—工区平均地表温度(°C)。dT/dD为井附近区域地温梯度, °C/m。结合包裹体样品现今埋深Db=2342.2 m, 地温梯度 dT/dD=0.032°C/m, 工区平均地表温度 To=20°C。经过计算可以得到红层剥蚀厚度: De=Da-Db=2687.5-2342.5=345 m; 同样的方法可以得到王 100 井(样品埋深 2197 m, 样品形成时温度 110°C)红层的剥蚀厚度约为 145 m; 可以看出, 此方法求取的结果和其他

求取方法所得结果相比偏大。在单井包裹体数据少的情况下可以结合地温梯度, 建立两者之间的关系式, 从而估算剥蚀厚度。从实际情况来看, 研究区包裹体数据有限, 所以该方法求得的剥蚀厚度结果仅作为最终结果的参考。

2.5 孔隙度法

正常压实埋藏过程中, 碎屑岩原始孔隙度随埋深的增加呈指数减小。倘若地层连续接受沉积无

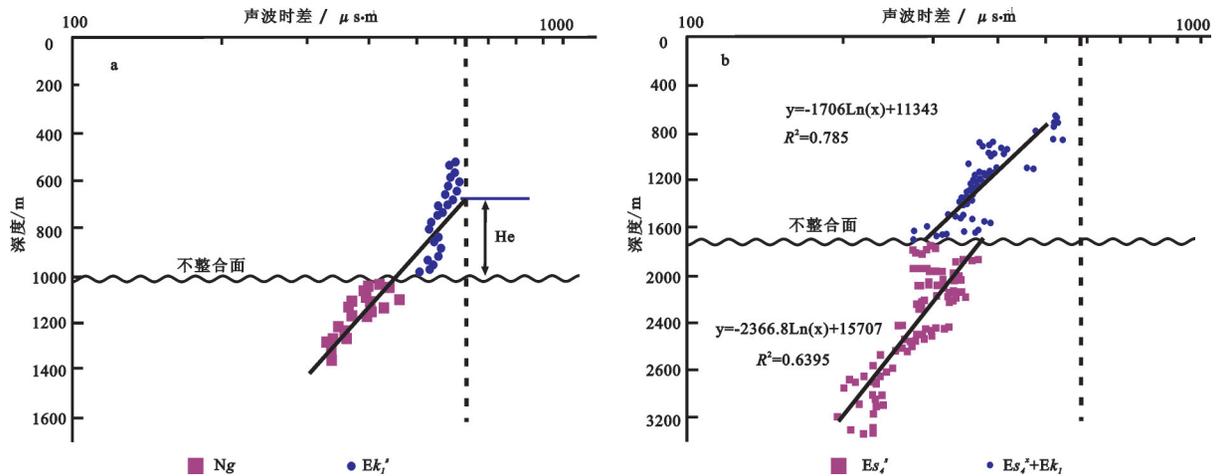


图6 泥岩声波时差法计算剥蚀厚度的实际应用(林30井,a)及不适用的情况(金32井,b)(单位:m)
Fig.6 Cross plots of sonic log-depth in Well Lin30 (a) and Well Jin32(b)

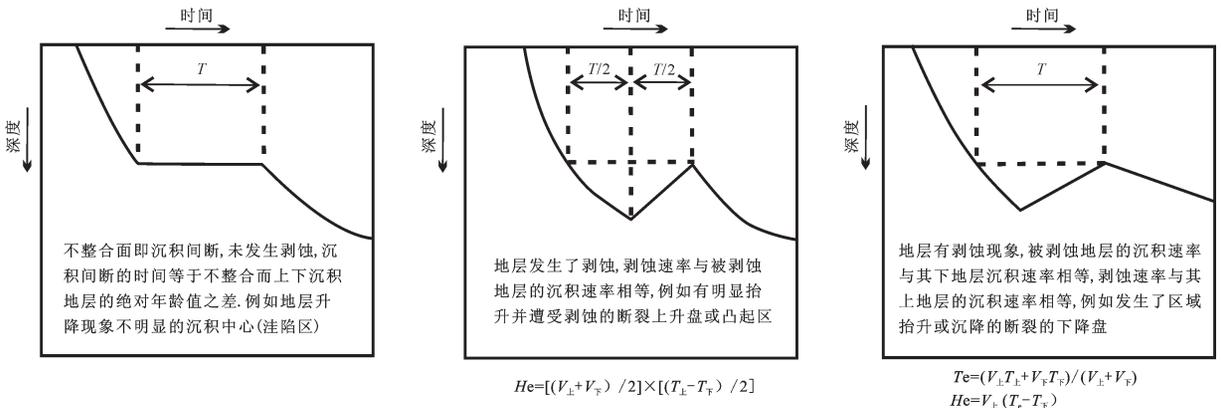


图7 模拟井的地史图—沉积速率比值法的应用
Fig.7 Simulation geohistory diagram of wells: the application of deposition rate ratio method

间断且正常压实,这种关系可以表示为: $\Phi = \Phi_0 \cdot e^{-c \cdot H}$, 式中 Φ_0 为地表的原始孔隙度; Φ 为深度 H 处的孔隙度值; e 为自然对数的底; c 为因次常数。因此可推测倘若地层遭受剥蚀, 则对于现今的不整合面之下某一深度 Hm 的孔隙度值与其所在地层未遭受情况下所对应的深度 Hn 在理论上应该会有一个差值, 即是地层的剥蚀厚度。以平方王地区滨 180 井为例进行计算, 滨 180 井沙四下红层顶部不整合面深度为 1706 m, 选取不整合面之下深度为 1868 m 的泥岩声波时差 ($377 \mu s/m$) 数据进行计算。通过经验公式(张立强等), 该深度点泥岩声波时差对应的孔隙度数值为 16%, c 取前人研究经验值 0.0007, 地表孔隙度泥岩取 62%。可以得到若地层不遭受剥蚀时该声波时差-孔隙度对应的深度为 1935 m, 滨 180

井沙四下地层的剥蚀厚度为 $He = 1935 - 1868 = 67$ m, 与之前沉积速率所得的计算结果吻合。

不难发现该方法的弊端: 计算时所需地表泥岩孔隙度 62% 以及因次常数 0.0007 均为经验值。对于红层而言, 成岩作用对其储层有效性影响大。 Φ_0 的大小与组成颗粒的粒径、分选、磨圆、孔隙充填以及地层沉积压实程度均有关系; 因次常数 c 一般在 0.0002~0.0009 变化, 其取值大小也直接影响到最终剥蚀厚度的结果。由此可知, 如何确定不同区域的地表原始孔隙度以及因此常数 c , 是采用优化孔隙度法求取地层剥蚀厚度的关键所在。优化的孔隙度法^[37]通过编写应用程序、分步骤计算, 得到地表孔隙度这个关键参数, 避免了人为给值带来的误差。因此对于沙四下一孔一段(红层)而言, 如果能得到

表2 林30井镜质体反射率与埋深数据
Table 2 The Ro and burial depths in Well Lin30

深度/m	层位	Ro/%	测点数
2669.8	Ek ₁	0.96	9
2669.8	Ek ₁	1.01	6
2677.8	Ek ₁	0.94	12
2677.8	Ek ₁	0.95	9
2775.2	Ek ₁	0.86	18
2775.2	Ek ₁	1.15	15
2775.2	Ek ₁	0.79	13
2775.2	Ek ₁	0.99	7
2775.2	Ek ₁	0.86	13
2788.8	Ek ₁	0.87	22
2879.5	Ek ₁	1.04	19
2879.5	Ek ₁	1.13	8

剥蚀面之下理想的孔隙度数据(表3),优化的孔隙度法得到的剥蚀厚度结果不失为一种较好的恢复剥蚀厚度的方法。

3 地层剥蚀厚度恢复

3.1 结果比较及方法评价

结合上述各种剥蚀厚度恢复方法的使用及适用性分析,对不同方法恢复剥蚀厚度的结果进行对比验证和评价(表4),总结出适合东营凹陷南坡红层剥蚀厚度求取的方法。

通过对比表(表4)可以看出,各种方法所恢复的剥蚀厚度结果既有吻合也有偏差,甚至有些方法求取的结果偏差很大。这就需要在结果对比的基础上,对这几种剥蚀厚度恢复方法进行评价,保证最终结果的相对准确。声波时差法、镜质体放射率法和包裹体测温法大都是针对研究区沙四下一孔一段地层顶面的剥蚀厚度进行恢复;沉积速率法分别对沙四下亚段地层及孔一段地层的剥蚀厚度恢

复;构造横剖面法视地震、地质剖面地层的具体情况而定。对于沙四下地层来说,各种方法求取结果的吻合度明显好于孔一地层。

厚度趋势法恢复剥蚀厚度的结果在构造变形明显的区域较理想,尤其是在青城凸起区。该区红层层系仅在凸起边缘有分布,中生界遭受剥蚀,孔一段与沙四下亚段的剥蚀特征一致,上下界限基本保持平行且与之上的馆陶组地层成明显的角度不整合。此时通过构造横剖面法恢复的剥蚀厚度结果较为理想,且由于红层层系内部界限清晰可辨,还可以分别求出沙四下亚段和孔一段的剥蚀厚度。

在系统读取的30口井的声波时差拟合效果有好有差,虽然上覆地层的厚度不是声波时差方法是否适用的决定性因素,但总体来说,在凸起区声波时差恢复的结果明显好于其他构造带。利用声波时差法恢复剥蚀厚度的缺点在于,多数情况下恢复的剥蚀厚度是红层层系总的剥蚀厚度,很难实现沙四下亚段与孔一段剥蚀厚度的分别求取。

通过结果对比表可知,对于沙四下地层来说,各种方法求取结果的吻合度明显好于孔一地层,这在沉积速率法的求取结果中尤其明显。原因在于求取孔店组地层剥蚀厚度时,孔一段剥蚀厚度的求取与中生代地层沉积速率的计算结果有关,尤其是中生界经历了多期次的剥蚀与沉积过程,利用公式计算的沉积速率与实际构造阶段的沉积速率差别较大。因此在用沉积速率法恢复剥蚀厚度时沙四下亚段的恢复结果较孔一段更为可靠。

结合红层本身特点,优化孔隙度法对孔隙度较大的地层应用效果较好。东营凹陷南坡沙四下一孔一红层储集物性显示出由浅层到深层逐渐降低的趋势(孔一储层平均孔隙度14.8%,沙四下储层

表3 东营凹陷西部部分井距红层顶面的深度与其孔隙度对应关系

Table 3 Correlation between primary mudstone porosity and relative depth to the erosion surface of red bed formation in wells of Dongying Depression

井号	深度(Hi)/孔隙度(Φi)								
林30	6.6/0.37	43/0.37	51.3/0.39	53.1/0.39	61.4/0.35	62.3/0.36	72.3/0.37	85.6/0.36	95.1/0.35
林5	1.2/0.44	4/0.44	11.3/0.39	39.7/0.39	42.5/0.4	44.7/0.37	48.3/0.38	53.7/0.38	55.4/0.38
滨古17	5.2/0.28	7.6/0.27	17.1/0.3	19.2/0.27	21.7/0.27	23/0.27	270.29	53.8/0.23	55.8/0.21
高424	25.4/0.34	29.9/0.34	32.5/0.32	38.7/0.29	46.2/0.32	49/0.33	66.1/0.29	67.8/0.3	73.3/0.33
高12	14.6/0.34	56.1/0.34	60.9/0.39	62.8/0.4	92.6/0.3	102.5/0.33	104.6/0.31	108.5/0.27	110.9/0.27

表4 各种方法恢复剥蚀厚度结果对比
Table 4 Comparison of erosion amount results of Es₄^x & Ek₁ by different methods

井号	地层	沉积速率法 (①)	厚度趋势法 (②)	声波时差法 (③)	地热法 (④)	孔隙度法 (⑤)	吻合度	取值
林 2	Es ₄ ^x	173	220				较好	173(①)
	Ek ₁	243	200				较好	200(②)
林 6	Es ₄ ^x	43	50				好	50(②)
	Ek ₁	114	100				好	100(②)
林 5	Es ₄ ^x	350	350	320		384	好	320(③)
	Ek ₁							
林 30	Es ₄ ^x	130	300	270	409	325	中	270(③)
	Ek ₁	142						
林 8	Es ₄ ^x	180	400				好	400(②)
	Ek ₁	220						
林 20	Es ₄ ^x		200					200(②)
	Ek ₁							
林气 2	Es ₄ ^x	122	150	300		369	中	369(⑤)
	Ek ₁							
林 28	Es ₄ ^x	167	300	280			中	280(③)
	Ek ₁	190						
滨 306	Es ₄ ^x	110	150	300		269	中	269(⑤)
	Ek ₁	187						
滨 509	Es ₄ ^x	147	300	280			好	147(①)
	Ek ₁	100						100(②)
滨 180	Es ₄ ^x	65	60	80		70	好	60(②)
	Ek ₁	88	80				好	84(均值)
滨 185	Es ₄ ^x	85		100			中	100(③)
	Ek ₁	55						
梁 902	Es ₄ ^x	86	100				中	93(均值)
	Ek ₁	209	80				差	80(②)
滨斜 232	Es ₄ ^x	142	60			78	差	69(②⑤均值)
	Ek ₁	142	80			110	差	95(②⑤均值)
滨古 12	Es ₄ ^x	118	80				中	80(②)
	Ek ₁	222						
高 12	Es ₄ ^x	135		280		300	较好	300(⑤)
	Ek ₁	370						
高 13	Es ₄ ^x	76	90				较好	83(均值)
	Ek ₁	378	130				差	130(②)
高 53	Es ₄ ^x		300	300			好	300(均值)
	Ek ₁	159						
高 46	Es ₄ ^x		60	260			较好	60(②)
	Ek ₁		170					170(②)
花 14	Es ₄ ^x	53	150				较好	53(①)
	Ek ₁	84						84(①)
官 113	Es ₄ ^x		50		50		好	50
	Ek ₁							
纯 40	Es ₄ ^x	88	80		366		好	84(①②均值)
	Ek ₁	89						89(①)
通古 4	Es ₄ ^x	40	50				好	45(①②均值)
	Ek ₁		50					50(②)

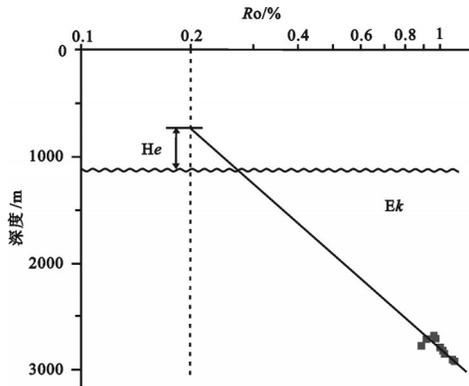


图8 林30井ln(Ro)-H线性回归关系曲线
Fig.8 The linear regressive relationship between ln(Ro) and H for well Lin30

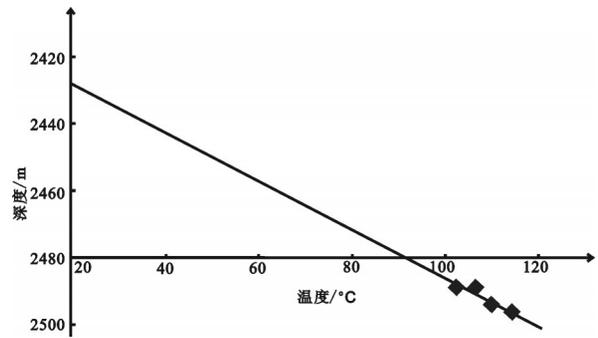


图9 包裹体测温法恢复官113井地层剥蚀厚度
Fig.9 The utilization of fluid inclusion to restore the thickness (Well Guan113)

平均孔隙度 16.8%);高青断层上升盘的漫湖三角洲储层孔隙度为26%~34%,下降盘的漫湖三角洲储层孔隙度为14%~16%。因此该方法更适合凸起区沙四下亚段的剥蚀厚度的恢复。

通过以上分析,可以总结出适合东营凹陷西部沙四下一孔一地层(红层)剥蚀厚度求取的方法及步骤:①选用构造横剖面法圈定剥蚀范围,估算剥

蚀厚度值的大致区间。该方法适合凸起区孔一段地层的剥蚀厚度恢复,在纯化构造带红层顶部削截明显区可直接使用该方法恢复剥蚀厚度,孔一段与沙四下亚段剥蚀特征一致的断块剥蚀区可分别求出孔一和沙四下地层的剥蚀厚度;②选用泥岩声波时差法和沉积速率法对剥蚀厚度数值的区间进行厘定。靠近林南断层上升盘和高青平南断层上升盘的区域选用声波时差法恢复剥蚀厚度,平方王潜山等地区优选沉积速率法恢复剥蚀厚度。③用优

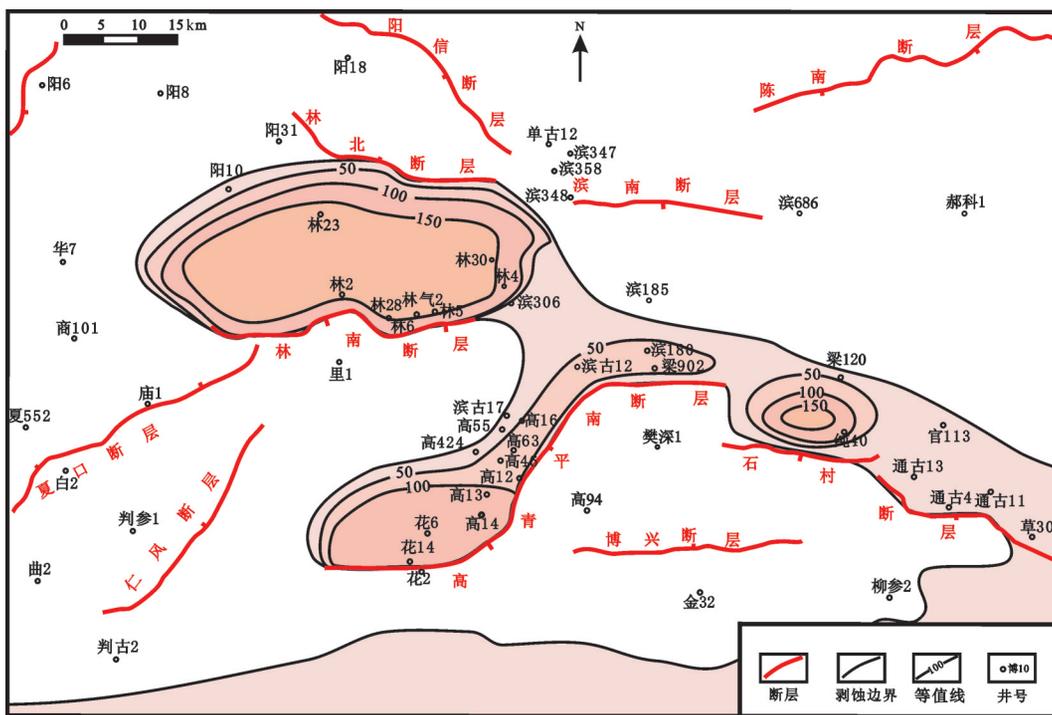


图10 东营凹陷西部沙四下地层顶部剥蚀厚度等厚图
Fig.10 Contour diagram of the erosional thickness in the Es₄³ Formation

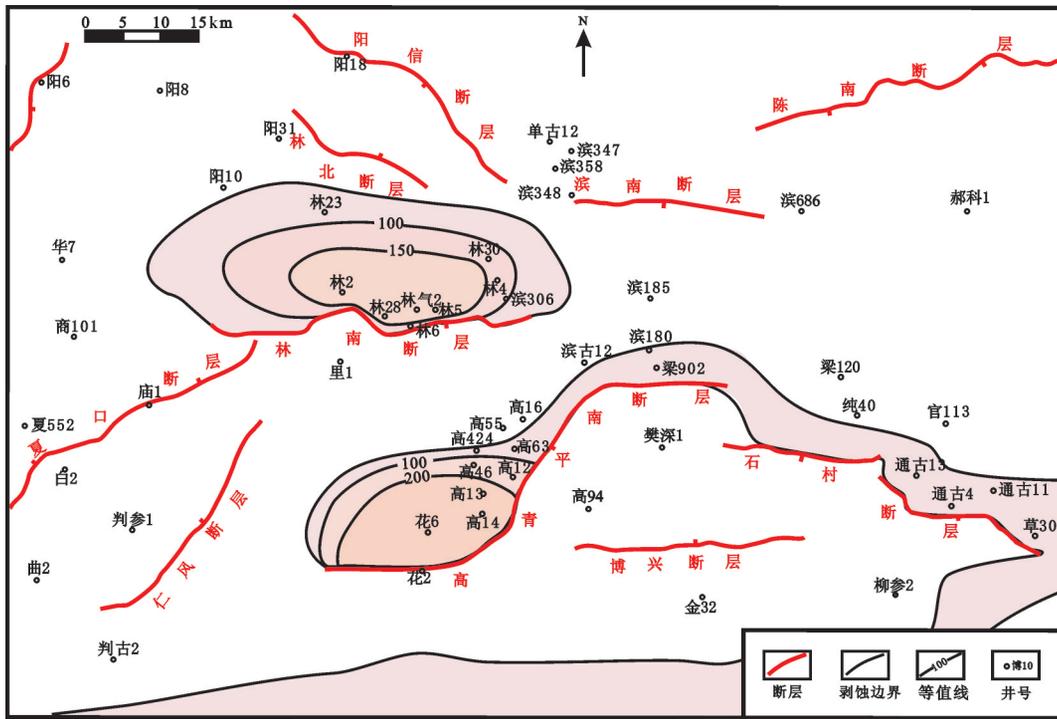


图 11 东营凹陷西部孔一地层顶部剥蚀厚度等厚图
Fig.11 Contour diagram of the erosional thickness in the E_{k1} Formation

化的孔隙度法对红层尤其是凸起区的沙四下亚段剥蚀厚度进行较为准确的标定,综合确定剥蚀厚度。在此过程中由于研究区地化测试数据极少,包裹体测温法和镜质体反射率法的求取结果为少数单井数据点,因此只能作为参考。最终取值主要依据结果之间的吻合度,吻合较好的一般可取平均值作为最终剥蚀厚度点的取值,偏差较大的则依据不同方法在东营南坡西部红层的适用性及其最终评价,分别进行取值标定。对于声波时差拟合效果好的,若没有孔隙度法计算结果,则直接采用声波时差法;多数情况下,只有厚度趋势法和沉积速率法的恢复结果,通常对沙四下亚段采用沉积速率法,孔一段采用厚度趋势法来进行剥蚀厚度的恢复;不同方法求取结果差值小于 10 m 的,一般采用相对较小值或者平均值。

3.2 地层剥蚀厚度恢复

结合前人^[13]对东营凹陷南坡剥蚀范围的标定,消除盐膏层在 seismic 反射上的削截剥蚀假象,对剥蚀范围进行了重新厘定。综合上述各种方法所得结果以及东营凹陷各构造区带的地质背景,对孔一段、沙四下亚段进行剥蚀厚度恢复,绘制了东营凹

陷西部红层层系剥蚀等厚图(图 10~11)。

受后期近东西向断层活动影响,东营凹陷南坡西部红层的剥蚀厚度整体呈近东西向展布。剥蚀区主要分布在凸起区,剥蚀厚度明显大于其他地区。孔一段顶部剥蚀厚度最大处位于青城凸起,剥蚀厚度可达 300 m。在纯化草桥构造带、平方王地区、鲁西隆起边缘地区以及南部缓坡带东南部剥蚀厚度相对较小(50~100 m)。剥蚀厚度中心分别位于高青断层花沟段以及纯化构造带石村断层上升盘区域和林樊家凸起靠近林南断层上升盘区域。

沙四下亚段地层的剥蚀范围比孔一段略大,尤其是在纯化地区。剥蚀区范围总体上也是西部区域大于东南部区域,总体上剥蚀厚度等值线的趋势与断层的走向基本一致。剥蚀厚度中心分别位于高青断层花沟段以及林樊家凸起区,在林樊家低凸起区剥蚀中心较孔一段向西北方向迁移。剥蚀厚度的求取对恢复东营凹陷孔店期—沙四早期古地貌及原型盆地格局有重要作用和意义。

4 结 论

(1)沙四下地层与其上部地层呈角度不整合接

触,而孔一段—沙四下亚段(红层)内部则不具有明显的全区性的不整合。“红层”的剥蚀在时间上具有分期性:青城凸起和林樊家低凸起在红层沉积后长期处于剥蚀状态;纯化构造带受到红层沉积后的剥蚀作用,沙四晚期之后处于沉降状态;缓坡地区受到凸起底形影响,各个时期均存在剥蚀与沉积共存的状态。

(2)结合研究区实际资料和测试结果,选取厚度趋势法、泥岩声波时差法、沉积速率法、地热法分别对“红层”求取剥蚀厚度。在各种剥蚀厚度恢复方法适用性分析的基础上,对不同方法恢复剥蚀厚度的结果进行对比验证和评价。笔者认为:在凸起区及纯化构造带“红层”顶部削截明显区可直接使用厚度趋势法;靠近林南断层上升盘和高青平南断层上升盘的区域,选用声波时差法恢复“红层”顶部剥蚀厚度的效果好于其他构造带;平方王潜山构造带优选沉积速率法恢复“红层”剥蚀厚度。优化的孔隙度法适合孔隙度较大的凸起区沙四下地层剥蚀厚度的求取。受数据的限制,地热法的求取结果为少数单井数据点,因此只能作为参考。各种方法求取沙四下剥蚀厚度结果的吻合度明显好于孔—地层。

(3)东营凹陷南坡西部红层的剥蚀厚度整体呈近东西向展布。凸起区剥蚀厚度明显大于其他地区。孔一段顶部剥蚀厚度最大处位于青城凸起,剥蚀厚度中心分别位于高青断层花沟段以及纯化构造带石村断层上升盘区域和林樊家凸起靠近林南断层上升盘区域;沙四下亚段地层的剥蚀范围比孔一段略大,剥蚀区范围总体上也是西部区域大于东南部区域,剥蚀厚度中心分别位于高青断层花沟段以及林樊家凸起区,在林樊家低凸起区剥蚀中心较孔一段向西北方向迁移。总体上剥蚀厚度等值线的趋势与断层的走向基本一致。

参考文献(References):

- [1] 姜慧超,张勇,任凤楼,等. 济阳、临清坳陷及鲁西地区中生代构造演化对比分析[J]. 中国地质, 2008, 35(5): 963-974.
Jiang Huichao, Zhang Yong, Ren Fenglou et al. Comparative analysis of Meso-Cenozoic tectonic evolutions of the Jiyang and Linqing depressions and Luxi area[J]. *Geology in China*, 2008, 35(5): 1269-1277(in Chinese with English abstract).
- [2] 张守鹏,刘成东,贺振建,等. 东营凹陷深部“红层”地层划分方法探讨[J]. 地学前缘, 2003, 10(2): 465-469.
Zhang Shoupeng, Liu Chengdong, He Zhenjian, et al. Stratigraphic division of red beds in deep Dongying depression, east China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(2): 465-469(in Chinese with English abstract).
- [3] 操应长,王健,高永进,等. 济阳坳陷东营凹陷古近系红层—膏盐层沉积特征及模式[J]. 古地理学报, 2011, 13(4): 375-386.
Cao Yingchang, Wang Jian, Gao Yongjing, et al. Sedimentary characteristics and model of red beds - gypsum salt beds of the Paleogene in Dongying Sag, Jiyang Depression [J]. *Journal of palaeogeography*, 2011, 13(4): 375-386 (in Chinese with English abstract).
- [4] 杨勇强,邱隆伟,孙宝强. 陆相“红层”等时地层对比新方法在东营凹陷南斜坡的应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(2): 16-21.
Yang Yongqiang, Qiu Longwei, Sun Baoqiang. Application of new method of time-stratigraphic comparison of terrestrial red beds in southern slope of Dongying depression[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2012, 36(2): 16-21(in Chinese with English abstract).
- [5] 才巨宏. 红层岩石物理特征与储层预测技术研究——以东营凹陷纯化地区为例[J]. 工程地球物理学报, 2012, 3: 306-310.
Cai Juhong. A study of red bed rock physical features and reservoir forecasting techniques: a case study on Chun Hua in Dongying depression[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2012, 3: 306-310(in Chinese with English abstract).
- [6] 贺振建,刘书会,王长轩,等. 基于气候变化特征的红层划分对比——以东营凹陷南坡为例[J]. 地质论评, 2012, 5: 839-845.
He Zhenjian, Liu Shuhui, Wang Changxuan, et al. Study on division and correlation of red beds based on climate change feature: a case study on southern slope of Dongying depression[J]. *Geological Review*, 2012, 5: 839-845(in Chinese with English abstract).
- [7] 张永安,李峰. 红层泥岩的剪切蠕变试验研究[J]. 工程勘察, 2010, 38(4): 23-26.
Zhang Yong'an, Li Feng. Experimental study on shear creep properties of the mudstone in red beds[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2010, 38(4): 23-26(in Chinese with English abstract).
- [8] 王飞飞,张参,邓辉,等. 含油气盆地剥蚀厚度恢复研究进展[J]. 地下水, 2013, 35(2): 154-157.
Wang Feifei, Zhang Shen, Deng Hui, et al. Research on eroded strata thickness restoration in petroleum basin[J]. *Ground Water*, 2013, 35(2): 154-157(in Chinese with English abstract).

- [9] 高长海, 彭浦, 李本琼. 不整合类型及其控油特征[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(6).
Gao Changhai, Peng Pu, Li Benqiong. Unconformity types and their constraints on hydrocarbon behavior[J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(6): 2-7(in Chinese with English abstract).
- [10] 高永进. 东营凹陷“红层”层系断裂体系发育特征[J]. 断块油气田, 2011, 18(1): 62-65.
Gao Yongjin. Fault development characteristics of red-bedding series in Dongying depression[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(1): 62-65(in Chinese with English abstract).
- [11] 王永诗, 吴智平. 济阳拗陷中一新生代叠合盆地及油气成藏[J]. 地质科技情报, 2009, 28(5): 53-59.
Wang Yongshi, Wu Zhiping. The Mesozoic-Cenozoic superposing basin of Jiyang depression and oil-gas accumulation[J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(5): 53-59(in Chinese with English abstract).
- [12] 史新磊. 应用构造沉积综合法恢复剥蚀厚度[D]. 青岛中国海洋大学, 2011.
Shi Xinlei. Structural-Sedimentary Synthetic Method for Restoring Denuded Thickness[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011(in Chinese with English abstract).
- [13] 吴智平, 张林, 李伟, 等. 东营凹陷孔店期—沙四早期构造格局恢复[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 1: 4.
Wu Zhiping, Zhang Lin, Li Wei, et al. Early Paleogene (Ek-Es4) structure framework restoration of Dongying sag[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 1: 4(in Chinese with English abstract).
- [14] 韩用兵, 王良书, 刘绍文. 渤海湾盆地济阳拗陷沙四段和孔店组地层剥蚀厚度恢复[J]. 高校地质学报, 2004, 10(3): 440-450.
Han Yongbing, Wang Liangshu, Liu Shaowen. The estimation of the erosion thickness of Es4 and Ek formation in Jiyang depression, Bohai bay basin [J]. Geological Journal of China Universities, 2004, 10(3): 440-450(in Chinese with English abstract).
- [15] 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.
Zhang Yiwei, Li Jingchang, Jin Zhijun, et al. A new calculating method of denuded amount for prototype basin—wave analysis[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(1): 88-91 (in Chinese with English abstract).
- [16] 李伟, 吴智平, 周瑶琪. 济阳拗陷中生代地层剥蚀厚度、原始厚度恢复以及原型盆地研究[J]. 地质论评, 2005, 51(5): 507-516.
Li Wei, Wu Zhiping, Zhou Yaoqi. Reconstruction of the thickness of the Mesozoic strata and Mesozoic proto-type basin in the Jiyang depression[J]. Geological Review, 2005, 51(5): 507-516(in Chinese with English abstract).
- [17] 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): 636-641.
Yuan Yusong, Zheng Herong, Tu Wei. Methods of eroded strata thickness restoration in sedimentary basins[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(6): 636-641(in Chinese with English abstract).
- [18] 纪友亮, 杜金虎, 邹伟宏, 等. 渤海湾盆地剥蚀量恢复中的综合分析法[J]. 同济大学学报, 2004, 32(5): 617-621.
Ji Youliang, Du Jinhui, Zou Hongwei, et al. Application of synthetical analysis method for seeking eroded strata thickness of Mesozoic in Bohai Bay Basin [J]. Journal of Tongji University, 2004, 32(5): 617-621(in Chinese with English abstract).
- [19] 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.
Wang Yi, Jin Zhijun. Progress of the methods on the recovery of the thickness of eroded strata in Basin [J]. Advance in Earth Sciences, 1999, 14(5): 482-486(in Chinese with English abstract).
- [20] 李勇, 黎兵, 周荣军, 等. 剥蚀-沉积体系中剥蚀量与沉积通量的定量对比研究——以岷江流域为例[J]. 地质学报, 2007, 03: 332-343.
Li Yong, Li Bin, Zhou Rongjun, et al. The quantitative correlation between denudation volume and sedimentary flux in the denudation-accumulation system: examples from Minjiang River drainage system[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 03: 332-343(in Chinese with English abstract).
- [21] 卢双舫, 刘新颖, 王振平, 等. 松辽盆地深层剥蚀量探讨及其意义[J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(1): 20-22.
Lu Shuangfang, Liu Xinyin, Wang Zhenping, et al. Denudation thickness and its significance in the deep part of Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2005, 24(1): 20-22(in Chinese with English abstract).
- [22] Magara K. 压实与油气运移[M]. 北京: 石油工业出版社, 1981.
Magara K. Compaction and Oil-Gas Migration[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1981.
- [23] Henry P H. Analysis of sonic well logs applied to erosion estimates in the Bighorn Basin, Wyoming [J]. AAPG Bulletin, 1960, 80: 630-647.
- [24] 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.
Liu Jingyan, Lin Changsong, Yu Yueyu, et al. An improved method to calculate denuded amount by sonic well logs[J].

- Experimental Petroleum Geology, 2000, 22(4): 302–306(in Chinese with English abstract).
- [25] 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.
Peng Qinghua, Zhou Jiangyu, et al. Unconformity types and erosion thickness restoration in Nanpu sag, Huanghua depression, bohai Bay Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(6): 657–659(in Chinese with English abstract).
- [26] 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.
Fu Xiaofei, Li Zhaoying, Lu Shuangfang, et al. Recovering denudation thickness by interval transit–time[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2004, 23(1): 9–11 (in Chinese with English abstract).
- [27] 牟中海, 陆廷清, 谢桂生, 等. 塔西南地区二叠系剥蚀厚度恢复[J]. 天然气工业, 2001, 21(2): 41–43.
Mou Zhonghai, Lu Tingqing, Xie Guisheng, et al. Restoration of the denuded thickness of Permian in the southwest part of Tarium Basin[J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(2): 41–43 (in Chinese with English abstract).
- [28] 许新明. 惠民凹陷沙四段–孔店组原型盆地厚度恢复[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
Xu Xinming. Restored Prototype Basin of the Thickness of the Fourth Member of the Shahejie Formation and Kongdian Formation in Huimin Depression[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008(in Chinese with English abstract).
- [29] 边凤青. 东营凹陷沙四段–孔店组剥蚀厚度与原型盆地的恢复[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
Bian Fengqing. The Restored Eroded Thickness and Prototype Basin of Kongdian Formation and the Fourth Member of the Shahejie Formation in Dongying Depression[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009 (in Chinese with English abstract).
- [30] 陈增智, 柳广弟, 郝石生. 修正的镜质体反射率剥蚀厚度恢复方法[J]. 沉积学报, 1999, 17(1): 141–144.
Chen Zengzhi, Liu Guangdi, Hao Shisheng. A corrected method of using vitrinite reflectance data to estimate the thickness of sediment removed at an unconformity[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(1): 141–144(in Chinese with English abstract).
- [31] 宋明水. 济阳拗陷中, 新生代成熟度曲线及其在剥蚀量计算中的运用[J]. 高校地质学报, 2004, 10(1): 121–127.
Song Mingshui. Mesozoic and cenozoic maturity curve of Jiyang depression and its application in calculation of strata denudation[J]. Geological Journal of China Universities, 2004, 10(1): 121–127(in Chinese with English abstract).
- [32] Dow W G. Kerogen studies and geological interpretations[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1977, 7 (1): 79–99.
- [33] 胡圣标, 等. 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.
Hu Shengbiao, et al. Estimation of the amount of uplift and erosion across an unconformity using vitrinite reflectance data[J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26 (4): 42–45 (in Chinese with English abstract).
- [34] 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.
Tong Yanming, Song Lijun, Zen Shaojun, et al. A new method by vitrinite reflectance to estimate thickness of eroded strata[J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(3): 417–424 (in Chinese with English abstract).
- [35] 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, 5: 122–125.
Zhao Libin, Huang Zhilong, Li Jun, et al. Application of homogeneous temperature of fluid inclusions to recovery of denuded strata thickness[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 5: 122–125(in Chinese with English abstract).
- [36] 朱传庆, 徐明, 单竞男, 等. 利用古温标恢复四川盆地主要构造运动时期的剥蚀量[J]. 中国地质, 2009, 36(6): 1268–1277.
Zhu Chuanqing, Xu Ming, Shan Jinnan, et al. Quantifying the denudations of major tectonic events in Sichuan basin: Constrained by the paleothermal records[J]. Geology in China, 2009, 36(6): 1269–1277 (in Chinese with English abstract).
- [37] 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.
He Jiangqi, Wang Yifang. Optimum estimation of the thickness of erosion by porosity data: Program and a case[J]. Geological Journal of China Universities, 2002, 8(2): 207–214 (in Chinese with English abstract).